

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Automatique

**Spécialité** : Automatique et informatique industrielle

**Par** : BOUROUBA Soufiane et CHERACHIR Youssouf

### **Sujet**

**Commande des puissances actives et réactive d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone double alimentation**

Soutenu publiquement, le 18/07/2019 , devant le jury composé de :

A.GORINE	Maitre de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
B.YACOUBI	Maitre-Assistant	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
S.BOURI	Maitre-Assistant	Univ. Tlemcen	Examineur

---

## Dedicaces 1

**J**E dédie ce travail :

- à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices , leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.
- à mon frère et mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.
- à ma chère grande mère.
- à toute ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Soufiane BOUROUBA  
Tlemcen, le 18 juillet 2019

---

## Dedicaces 2

**J**E dédie ce travail :

- à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices , leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.
- à ma chère sœur pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.
- à mes chères grandes mères.
- à toute ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Youssef CHERACHIR  
Tlemcen, le 18 juillet 2019

---

## Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Nous tenons à remercier premièrement Dieu Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur Boumedienne YACOUBI Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen , pour avoir d'abord proposé ce thème et suivi le déroulement de ce mémoire et pour la confiance et l'intérêt qu'ils nous ont accordé tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à Monsieur Ali GORINE Maitre de Conférences UABT et Madame Sihem BOURI Docteur à l'université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département génie électrique qui ont contribué notre formation.

Soufiane BOUROUBA    Youssouf CHERACHIR  
Tlemcen, le 18 juillet 2019

# TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	ix
GLOSSAIRE	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I ETAT DE L'ART DES SYSTÈMES DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 QUELQUES NOTIONS SUR LE VENT	4
I.3 DÉFINITION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	4
I.4 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE ÉOLIENNE	5
I.5 TYPES DES TURBINES ÉOLIENNES	7
I.5.1 Eoliennes à axe vertical	7
I.5.1-a Avantages	8
I.5.1-b Inconvénients	8
I.5.2 Eoliennes à axe horizontal	8
I.5.2-a Avantages	9
I.5.2-b Inconvénients	9
I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	9
I.6.1 Avantages	10
I.6.2 Inconvénients	10
I.7 CONVERSION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DU VENT EN ÉNERGIE MÉCANIQUE	10
I.8 ETAT DE L'ART SUR LES GÉNÉRATEURS UTILISÉS DANS LE SCE	13
I.8.1 Machine synchrone	13
I.8.1-a Avantage	14
I.8.1-b Inconvénient	14
I.8.2 La machine asynchrone a cage	14
I.8.3 la machine asynchrone a doublé alimentation	15
I.8.4 Les différents structure de la MADA	15
I.8.4-a Machine asynchrone à double alimentation à énergie roto- rique dissipée	15

I.8.4-b	Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer . . . . .	16
I.8.4-c	Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec cycloconvertisseur . . . . .	16
I.8.4-d	Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI . . . . .	17
I.8.5	Principe de fonctionnement de la mada . . . . .	17
I.9	CONCLUSION . . . . .	18
<b>II</b>	<b>MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION</b>	<b>19</b>
II.1	INTRODUCTION . . . . .	20
II.2	DESCRIPTION DE LA MADA . . . . .	20
II.3	HYPOTHÈSE SIMPLIFICATRICE . . . . .	20
II.4	MODÈLE MATHÉMATIQUE . . . . .	21
II.4.1	Equation électrique . . . . .	21
II.4.2	Equation de flux . . . . .	21
II.5	MODEL DE LA MACHINE DANS LE PLAN DE PARK . . . . .	22
II.5.1	la transformation du Park . . . . .	22
II.5.2	Les équations électriques dans le repère de Park . . . . .	23
II.5.3	Les équation magnétique dans le repère de Park . . . . .	23
II.5.4	Equation du couple électromagnétique . . . . .	23
II.6	CHOIX DE LA RÉFÉRENCE . . . . .	24
II.6.1	Référentiel lié au stator . . . . .	24
II.6.2	Référentiel lié au rotor . . . . .	24
II.6.3	Référentiel lié au champ tournant . . . . .	25
II.7	MODES DE FONCTIONNEMENT . . . . .	25
II.7.1	Fonctionnement moteur hyper/hyposynchrone . . . . .	25
II.7.2	Fonctionnement générateur hyper/hyposynchrone . . . . .	26
II.8	ONDULEUR DE TENSION TRIPHASÉ . . . . .	26
II.8.1	Modélisation de l'onduleur de tension . . . . .	26
II.8.2	Modulation de largeur d'impulsions (MLI) Sinus-Triangle . . . . .	28
II.9	CONCLUSION . . . . .	29
<b>III</b>	<b>MODÉLISATION DE L'AEROTURBINE</b>	<b>30</b>
III.1	INTRODUCTION . . . . .	31
III.2	MODÉLISATION DU VENT . . . . .	31
III.3	MODÉLISATION DE LA TURBINE . . . . .	31
III.4	MODÈLE DU MULTIPLICATEUR . . . . .	33
III.5	MODÈLE DE L'ARBRE MÉCANIQUE . . . . .	33
III.6	ZONE DE FONCTIONNEMENT . . . . .	34
III.7	STRATEGIE DE COMMANDE . . . . .	35
III.7.1	Système de contrôle de l'aéroturbine . . . . .	35
III.7.2	Principe de MPPT . . . . .	36
III.7.3	Technique d'extraction du maximum de puissance . . . . .	36
III.7.3-a	Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	36

---

III.7.3-b Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	37
III.7.3-c Modélisation du système d'orientation des pales(PITCH)	38
III.8 CONCLUSION	39
<b>IV COMMANDE VECTORIELLE DES PUISSANCES ACTIVES ET RÉACTIVES</b>	<b>40</b>
IV.1 INTRODUCTION	41
IV.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE	41
IV.3 ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE	41
IV.3.1 Relation entre les courants statoriques et rotoriques	42
IV.3.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques	42
IV.3.3 Relation entre tension rotorique et courant rotorique	43
IV.4 SYNTHÈSE DES RÉGULATEURS PI	46
IV.5 CONCLUSION	47
<b>V COMMANDE GLOBALE DU SYSTÈME CONVERTISSEURS-MACHINE POUR UN AEROGÉNÉRATEUR</b>	<b>48</b>
V.1 INTRODUCTION	49
V.2 SIMULATION DU SYSTÈME	50
V.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	53
V.4 CONCLUSION	53
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXE A : TITRE ANNEXE A</b>	<b>1</b>
<b>ANNEXE B : TITRE ANNEXE B</b>	<b>2</b>
<b>ANNEXE C : TITRE ANNEXE C</b>	<b>2</b>

# TABLE DES FIGURES

I.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
I.2	Principaux organes du système de conversion éolien	5
I.3	Les éléments d'une éolienne	6
I.4	Constitution de la nacelle	7
I.5	Technologie des éoliennes à axe vertical	8
I.6	technologie éolienne à axe horizontale.	9
I.7	Tube de courant autour d'une éolienne	11
I.8	Coefficient de puissance	12
I.9	Système éolien à vitesse variable à base de machine synchrone	13
I.10	connection directe d une machine asy sur le reseau	14
I.11	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	15
I.12	mada structur kramer	16
I.13	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	17
II.1	Représentation simplifié de la MADA	20
II.2	Position spatiale des différents référentiel	22
II.3	Fonctionnement moteur	26
II.4	Fonctionnement générateur	26
II.5	Onduleur de tension triphasé	27
II.6	Principe de la MLI triangle sinusoïdale	29
III.1	Modèle mécanique simplifiée de la turbine	31
III.2	Modél d'une turbine éolienne	32
III.3	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine	33
III.4	Schéma bloc du modèle de turbine	34
III.5	Les zones de fonctionnement de l'aéroturbine	35
III.6	Schéma bloc de la maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse mécanique	37
III.7	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse	38
IV.1	Orientation de l'axe d sur le flux statorique	41
IV.2	Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	44
IV.3	Schéma bloc de la commande directe	45
IV.4	Schéma bloc de la commande indirecte	45
IV.5	Système réguler par un PI	46
V.1	Schema simulink du système global (turb+MADA)	49

---

V.2	Profile du vent . . . . .	50
V.3	Chrono-gramme de couple et vitesse de la turbine . . . . .	50
V.4	Chrono-gramme de la puissance de la turbine . . . . .	50
V.5	Chrono-gramme de la vitesse de la MADA . . . . .	51
V.6	Variation de l'angle $\beta$ . . . . .	51
V.7	Chrono-gramme du couple électromagnétique . . . . .	52
V.8	Chrono-gramme des tensions et courants rotoriques . . . . .	52
V.9	Chrono-gramme des tension sur l'axe direct et quadratique . . . . .	52
V.10	Chrono-gramme des puissances actives et réactives de la MADA . . . . .	53
11	Schéma simulink de la turbine . . . . .	2
12	Schéma simulink de la MADA . . . . .	3
13	Schéma simulink du modèle électrique . . . . .	3
14	Schéma simulink du modèle mécanique . . . . .	3
15	Schéma simulink de la commande du système . . . . .	4
16	Schéma simulink de l'onduleur MLI . . . . .	4

---

## Nomenclature

Nom	Symbole	Unité
$C_{aer}$	Couple aérodynamiques	$N.m$
$Tm$	Couple issu du multiplicateur	$N.m$
$C_g$	couple de la génératrice	$N.m$
$\Omega_t$	la vitesse de la turbine	$rad/s$
$\Omega_{mec}$	la vitesse de la génératrice (rad / s)	$rad/s$
$\lambda$	Ration de vitesse	/
$\beta$	L'angle de calage des pales	$^\circ$
$K$	Gain du multiplicateur	/
$R$	Rayon de la turbine	$m$
$C_p$	Coefficient de puissance	/
$\phi$	Masse volumique de l'air	/
$v$	Vitesse du vent	$m/s$
$C_p$	Coefficient de puissance	/
$T_s$	Constante de temps statorique	/
$T_r$	Constante de temps rotorique	/
$L_s$	Inductance cyclique statorique par phase	$H$
$L_r$	Inductance cyclique rotorique par phase	$H$
$M_{sr}$	Inductance mutuelle cyclique	$H$
$J$	Moment d'inertie	$kg.m^2$
$p$	Nombre de paires de pôles	/
$R_s$	Resistance de l'enroulement statorique par phase	$\omega$
$R_r$	Resistance de l'enroulement rotorique par phase	$\omega$
$P_s$	Puissance active statorique	$W$
$Q_s$	Puissance réactive statorique	$W$
$V_s V_r$	La tension simple statorique et rotorique respectivement	$V$
$V_{ds} V_{qs}$	La tension statorique directe et en quadrature	$V$
$V_{dr} V_{qr}$	La tension rotorique directe et en quadrature	$V$
$I_s I_r$	Les courants de phase statorique et rotorique	$A$
$I_{ds} I_{qs}$	Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK	$A$
$I_{dr} I_{qr}$	Le courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK	$A$
$\omega_s$	Pulsation statorique	$rad/s$
$\omega_r$	Pulsation rotorique	$rad/s$
$\theta_r$	angle rotorique	$rad$
$\theta_s$	angle statorique	$rad$
$\phi_s, \phi_r$	Les flux statorique et rotorique respectivement	/
$\phi_{ds}, \phi_{qs}$	Les flux statoriques direct et en quadrature	/
$\phi_{dr}, \phi_{qr}$	Les flux rotoriques direct et en quadrature	/
$\phi_{dr}, \phi_{qr}$	Les flux rotoriques direct et en quadrature	/
$K_p$	Gain de l'action proportionnel du régulateur PI	/
$K_i$	Gain de l'action intégral du régulateur PI	/

---

## Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
MADA	Machine Asynchrone à Double alimentation
GADA	Génératrice Asynchrone à Double alimentation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PWM	Pulse With Modulation
DFIG	Double Feed Induction Generator
DFIM	Double Feed Induction Motor
MPPT	Maximum power point Tracking

---

## Introduction générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Ce n'est qu'au moyen âge qu'ils font leur apparition en Europe et leur utilisation se répand rapidement. [5]

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en électricité. lorsque le système est connecté au réseau on parlera d'aérogénérateur et s'il permet d'alimenter d'une charge (par exemple un pompe) on parlera d'éolienne. les éoliennes sont alors composées de deux sous-système à savoir :

-la turbine a l'axe horizontal ou vertical permettant la transformation de la puissance du vent en puissance mécanique.

-le générateur électrique peut être réalise soit à l'aide d'une machine asynchrone MADA ou une machine synchrone, la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) est devenue une solution persévérante grâce à l'accessibilité au stator et au rotor qui offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance. Un des avantages de la double alimentation est le pilotage du circuit du rotor par un convertisseur de faible puissance relativement par rapport au stator. Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la commande de l'ensemble turbine, machine, convertisseur et réseau en utilisant une génératrice asynchrone double alimentation (GADA) et qui fera l'objet de ces Cinq chapitres.

Le premier chapitre sera un état de l'art sur l'aérogénérateur. Qui donne en plus quelques généralités sur les systèmes éolien notamment sa description tout en donnant ses parties constitutives, son principe de fonctionnement, son énergie de production et les différents types de machines utilisées dans les systèmes éoliens en façon générale ; et en particulier le MADA en donnant son principe de fonctionnement et ses avantages et inconvénient.

Le deuxième chapitre sera l'objet de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en faisant appel à la transformée de Park, et les convertisseurs de puissances utilisées (onduleur et MLI) dans la suite du travail. En passant par le mode de fonctionnement de la MADA.

Le troisième chapitre est consacrée généralement à la modélisation de turbine, Par la suite on va présenter les zones de fonctionnement d la turbine après on va expliquer

quelques techniques de contrôle (extraction du maximum de la puissance issue du vent et le système PITCH d'orientation des pales).

La modélisation de la turbine, son contrôle avec et sans asservissement, le principe de la recherche MPPT et du système PITCH d'orientation des pales, sont détaillés.

Le quatrième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation en présentant ses différents types (commande directe et commande indirecte).

Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés par la suite dans le cinquième chapitre.

## Chapitre I

# Etat de l'art des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

---

### SOMMAIRE

---

I.1	INTRODUCTION . . . . .	4
I.2	QUELQUES NOTIONS SUR LE VENT . . . . .	4
I.3	DÉFINITION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	4
I.4	PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	5
I.5	TYPES DES TURBINES ÉOLIENNES . . . . .	7
I.5.1	Eoliennes à axe vertical . . . . .	7
I.5.2	Eoliennes à axe horizontal . . . . .	8
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	9
I.6.1	Avantages . . . . .	10
I.6.2	Inconvénients . . . . .	10
I.7	CONVERSION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DU VENT EN ÉNERGIE MÉCANIQUE . . . . .	10
I.8	ÉTAT DE L'ART SUR LES GÉNÉRATEURS UTILISÉS DANS LE SCE . . . . .	13
I.8.1	Machine synchrone . . . . .	13
I.8.2	La machine asynchrone a cage . . . . .	14
I.8.3	la machine asynchrone a doublé alimentation . . . . .	15
I.8.4	Les différents structure de la MADA . . . . .	15
I.8.5	Principe de fonctionnement de la mada . . . . .	17
I.9	CONCLUSION . . . . .	18

---

## I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des aérogénérateurs n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (turbine à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des turbines sont de plus en plus performantes. De plus, les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

## I.2 Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent change selon les zones géographiques et les saisons, elle est élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers, le vent est défini par sa direction et sa vitesse. [6]

## I.3 définition de l'énergie éolien

Un aérogénérateur, couramment appelé éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

La conversion de l'énergie se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor) : extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice : reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

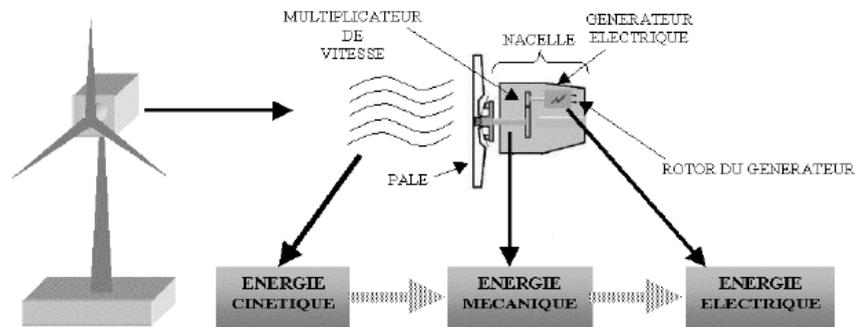


FIGURE I.1 – Conversion de l'énergie cinétique du vent

Système de Conversion Eolien est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

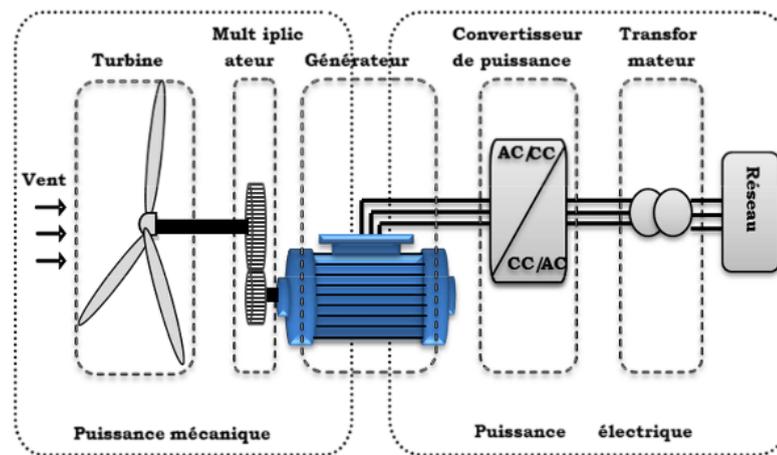


FIGURE I.2 – Principaux organes du système de conversion éolien

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse et sa source (vent) plus important en hiver. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Cependant, le captage et la conversion d'énergie sont complexes, les matériaux coûteux et la source d'énergie difficile à prévoir et reste aléatoire. [17] [7] [11]

## I.4 Principaux composants d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes :

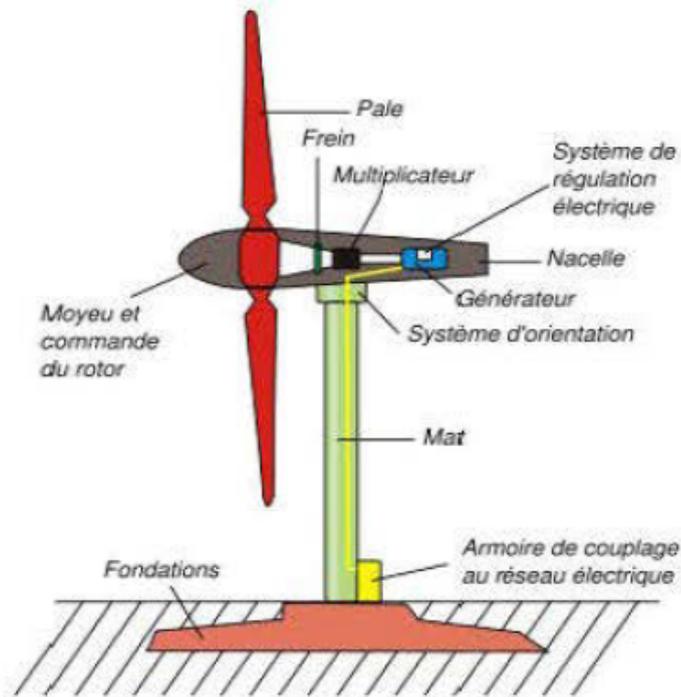


FIGURE I.3 – Les éléments d'une éolienne

- Le mat : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.
- Les pales : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient de 10% en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires.
- La nacelle : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme le montre la figure I.4.

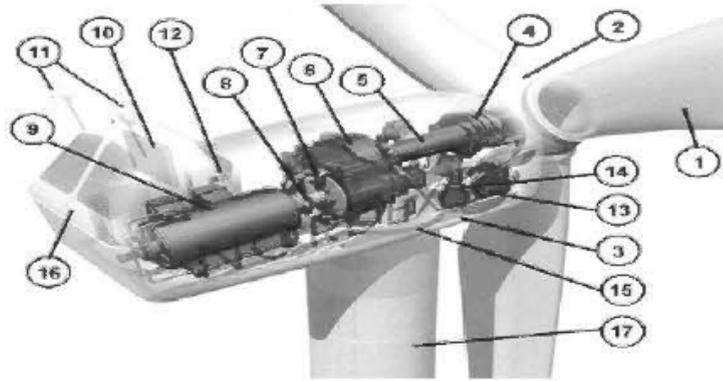


FIGURE I.4 – Constitution de la nacelle

1- Pales. 2- Moyeu rotor. 3- Nacelle. 4- Cardan. 5- Transmission. 6- Multiplicateur de vitesse. 7- Frein à disque. 8- Accouplement. 9- Génératrice. 10- Radiateur de refroidissement. 11- Centrale de mesures du vent. 12- Contrôle. 13- Centrale hydraulique. 14 -Mécanisme d'orientation face au vent. 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque. 16- Capot. 17- Tour.

## I.5 Types des turbines éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

### I.5.1 Eoliennes 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. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius, le rotor de Darrieux classique et Darrieux en forme de H.[15] [11]

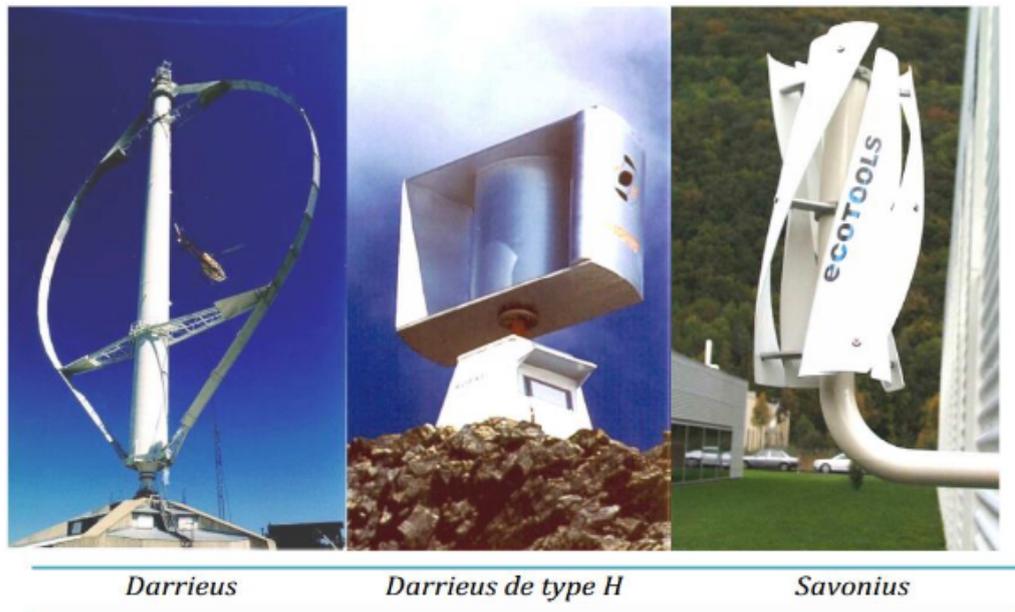


FIGURE I.5 – Technologie des éoliennes à axe vertical

#### I.5.1-a Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### I.5.1-b Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

#### I.5.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées de façon aérodynamique 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 tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables. [9] [2]

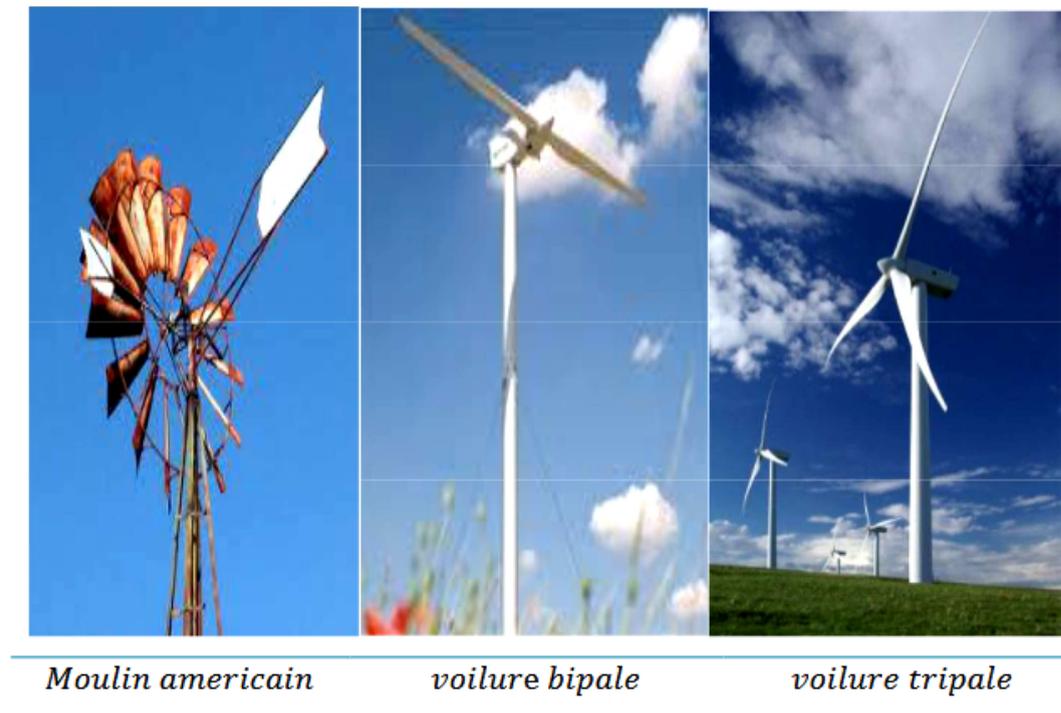


FIGURE I.6 – technologie éolienne à axe horizontal.

### I.5.2-a Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

### I.5.2-b Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

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

## I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.[9] [16]

### I.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
  - Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
  - L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
  - L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres gazes à effet de serre. [9] [16]

### I.6.2 Inconvénients

- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- Le bruit qui vient du multiplicateur.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. [16]

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

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active  $s$  de la voilure.[8]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.7 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit :  $\frac{V_1+V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité traversant une surface  $s$  des pales en une seconde est : [8] [2] [15]

$$m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\rho$  est la densité de l'air =  $1.22\text{kg}/\text{m}^3$  a la pression atmosphérique de 15Co.

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) :

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

Remplaçons  $m$  par son expression dans  $P_m$  on trouve :

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

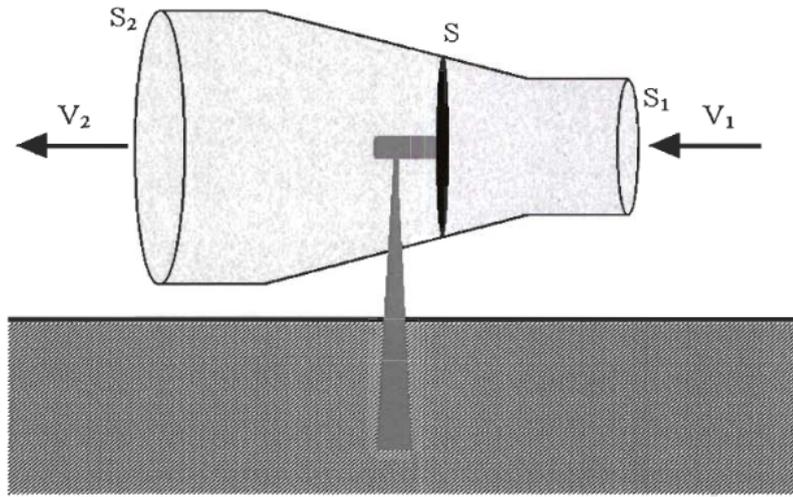


FIGURE I.7 – Tube de courant autour d'une éolienne

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

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

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

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

Le ratio  $P_m/P_{mt}$  s'appelle aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum de  $16/27$  s'appelle la limite de Betz qui fixe la puissance  $P_{max}$ .

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent[2].

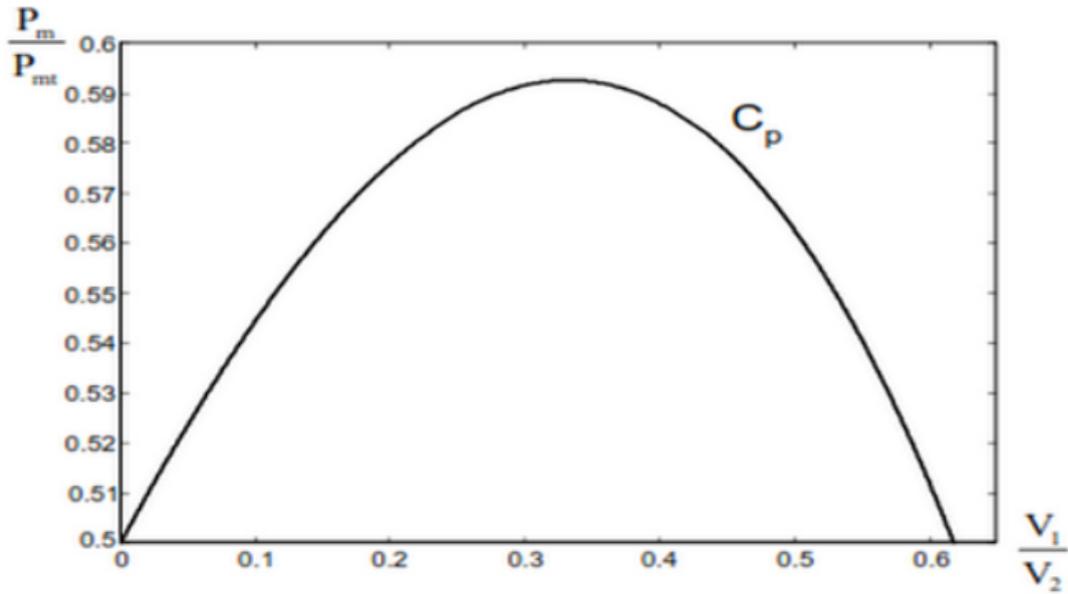


FIGURE I.8 – Coefficient de puissance

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{16}{27}P_{mt} = 0.59P_{mt} \quad (I.6)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 0.59 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_{mt}} = \frac{2P_{max}}{\rho S V_1^3} = 0.59 \quad (I.7)$$

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi : [2]

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.8)$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I.9)$$

$\Omega_1$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur.

$R$  : Rayon des pales de l'aérogénérateur.

La puissance mécanique  $P_{mg}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec  $\Omega_2$  : vitesse de rotation après multiplicateur

## I.8 Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans le SCE

La génératrice est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Dans le cas d'une éolienne, c'est l'énergie cinétique du vent qui est transformé en énergie électrique. Le choix du générateur est important. Pour une application éolienne, il existe principalement trois types de machines utilisées :[1]

- Machine synchrone.
- Machine asynchrone à cage.
- Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné. [1]

### I.8.1 Machine synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydroélectriques ou nucléaires). De plus, dans leur fonctionnement en générateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'utilisation de ces genres de machine dans le système éolien nécessite obligatoirement une interface d'électronique de puissance entre le stator et le réseau, car il est difficile de maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe afin de synchroniser celle-ci avec le réseau pendant la connexion ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Les principaux inconvénients pour cette structure sont : le surcoût (pour les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille) et les convertisseurs sont dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. [17]

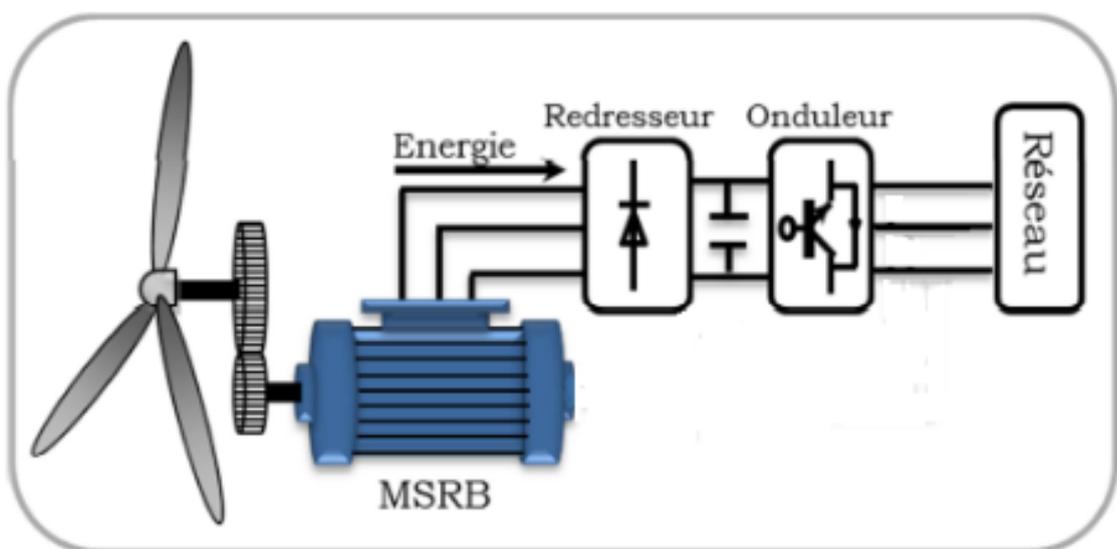


FIGURE I.9 – Système éolien à vitesse variable à base de machine synchrone

### I.8.1-a Avantage

- Absence de courant réactif de magnétisation.
- Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel
- Présence d'un couple important à dimensions géométriques convenables .

### I.8.1-b Inconvénient

- Dans le domaine de conversion éolienne, la vitesse de rotation est maintenue fixe pour synchroniser la machine avec le réseau.
- Au-delà d'une puissance de 20kW, la machine synchrone devienne complexe et coûteuse.

## I.8.2 La machine asynchrone a cage

La machine asynchrone fut le premier type de génératrice à être utilisée pour les éoliennes de grande puissance, présente des avantages certains liés à sa conception simple, sa fabrication peu coûteuse, sa robustesse, son poids et son inertie faibles et le peu d'entretien (pas de système balais collecteur) qu'elle requiert . Par ailleurs, le stator étant connecté directement au réseau, le besoin en équipement électronique est réduit. L'aérogénérateur à vitesse fixe est constitué d'une machine asynchrone à cage d'écureuil est couplée mécaniquement à la turbine par un multiplicateur. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire le glissement  $g < 0$  pour un fonctionnement en génératrice. [14]

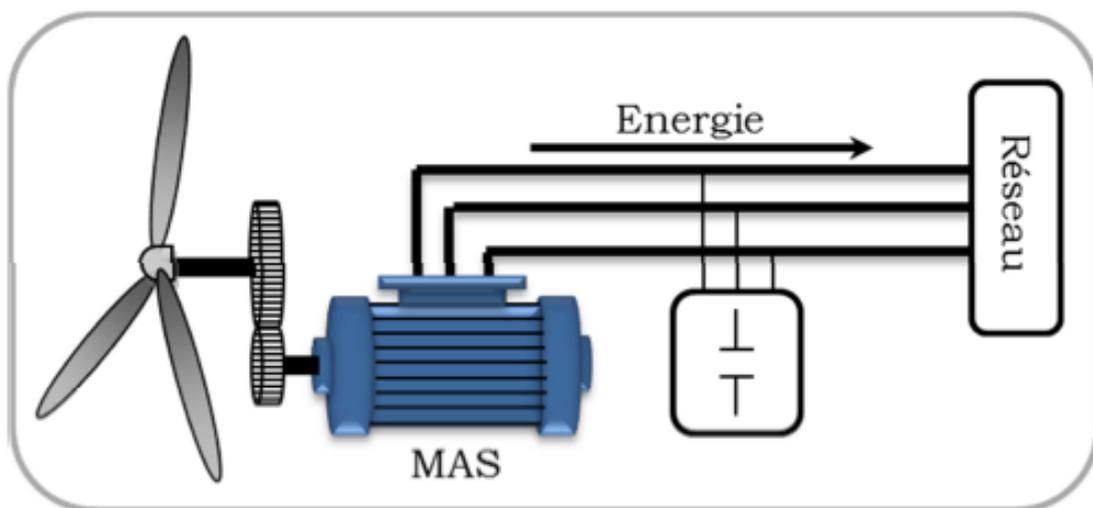


FIGURE I.10 – connexion directe d'une machine asy sur le réseau

### I.8.3 la machine asynchrone a doublé alimentation

Appelée DFIG (Doubly Fed Induction Generator) lorsqu'elle est utilisée en génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobine alimentée par ses deux armatures. Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

### I.8.4 Les différents structure de la MADA

#### I.8.4-a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

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

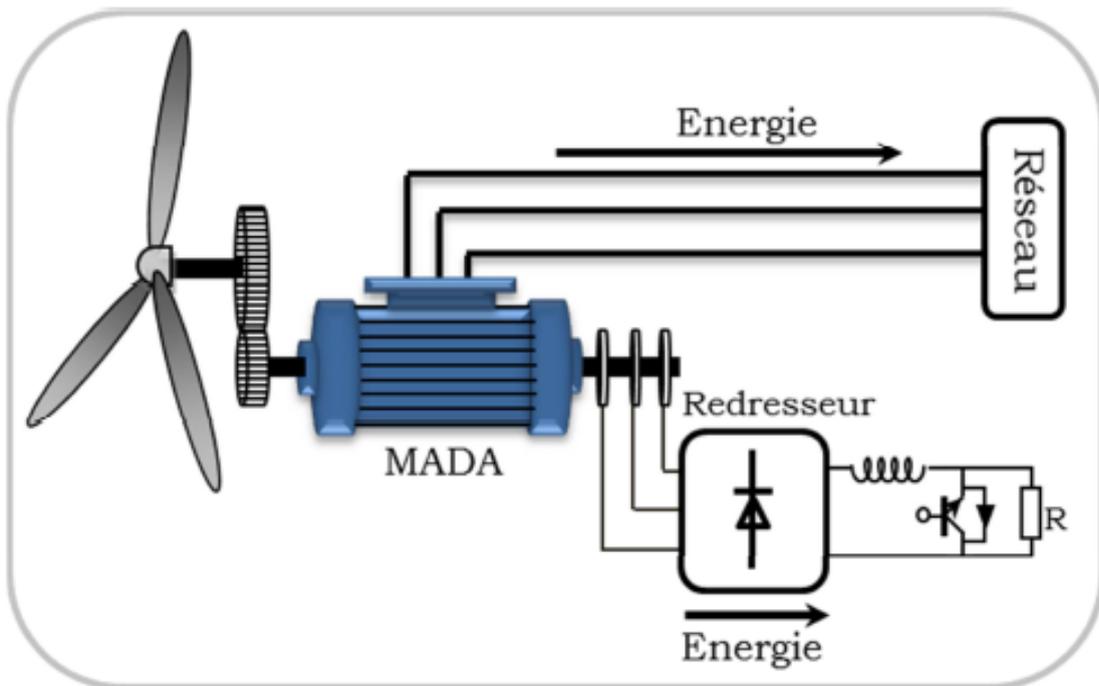


FIGURE I.11 – MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. [9]

#### I.8.4-b Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer

le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.[17] [11]

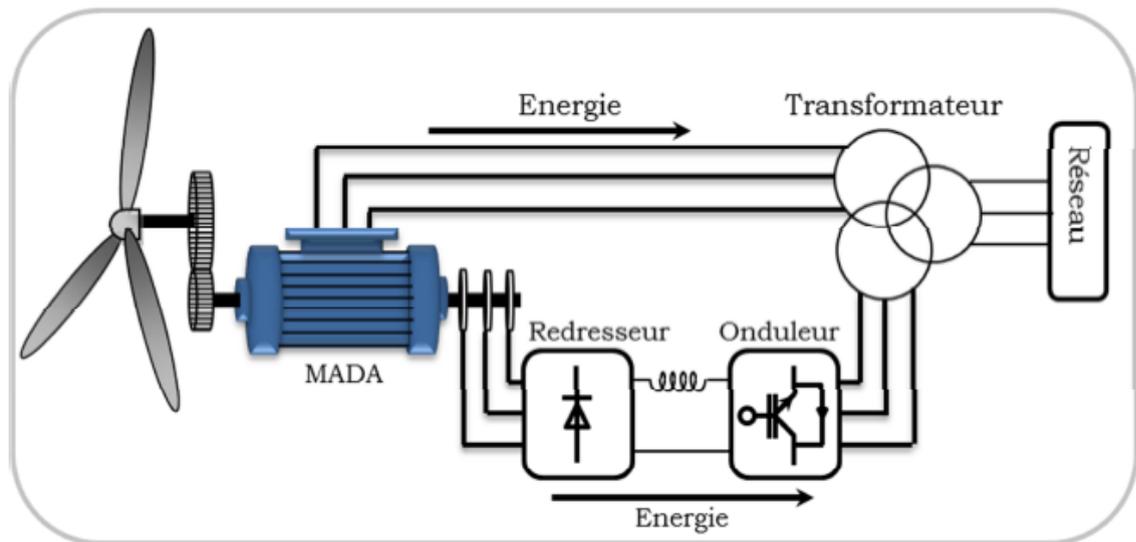


FIGURE I.12 – mada structur kramer

Cette structure est avantageuse parce qu'elle permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.[17]

#### I.8.4-c Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur, ainsi la plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure Kramer. Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif.

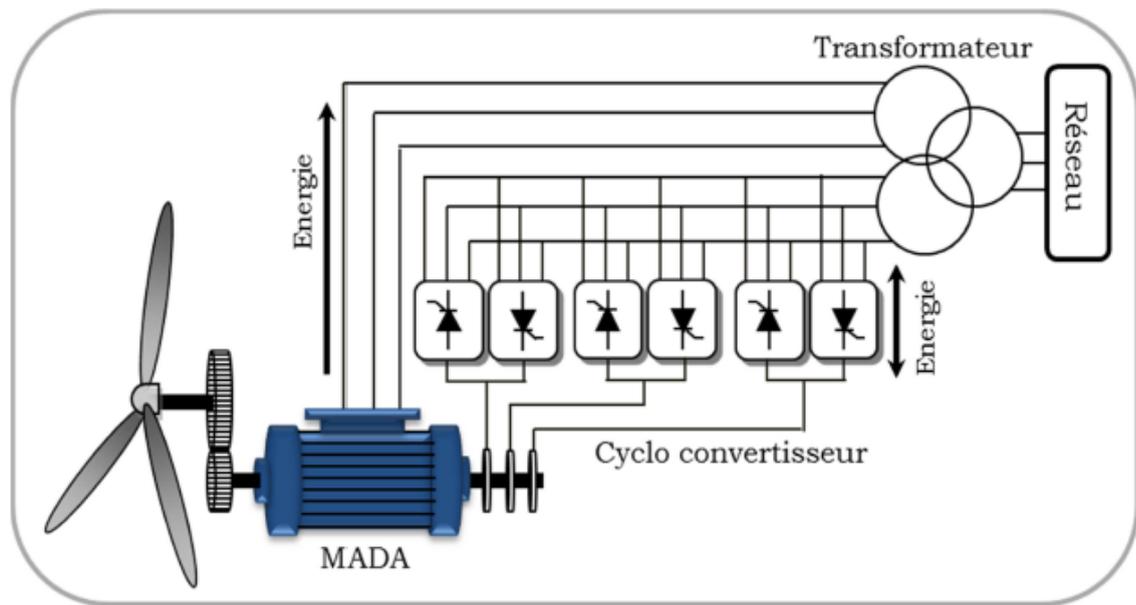


FIGURE I.13 – Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

#### I.8.4-d Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante utilise deux ponts triphasés à IGBT commandables par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement du convertisseur à MLI du côté du réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.[19]

#### I.8.5 Principe de fonctionnement de la mada

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le champ des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire

$$\omega_s = 2\pi.f_s \quad (\text{I.11})$$

Le rotor est constitué par des enroulements triphasés relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel par un système balais-bague, qui tourne avec la vitesse  $\omega_r$ . Dans le cas où le nombre de pôles au stator et au rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor est définie par :

$$\omega = \omega_s \pm \omega_r = P\Omega_m \quad (\text{I.12})$$

Avec :  $\Omega_m$  : vitesse mécanique du rotor

« s » et « r » désignent respectivement les grandeurs statoriques et rotoriques

P : nombre de pair de pôles.

D'autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par :

$$f_s = f_r + P.f_m \quad (\text{I.13})$$

Avec :  $f_m$  : fréquence de rotation du rotor.

Le glissement  $g$  est défini comme suit :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (\text{I.14})$$

## I.9 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art bref sur l'énergie éolienne, ou on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne. Après un rappel des notions de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les principaux composants d'une éolienne ont été décrits. Nous avons également parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. On a présenté aussi la loi aérodynamique de Betz.

La deuxième partie du chapitre, on a présenté l'état de l'art sur la conversion électromécanique à travers différentes structures de génératrice éolienne, parmi lesquelles nous avons choisi le système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation et concentré à cette dernière où nous avons mentionné ses différentes structures, son principe de fonctionnement et certains avantages et inconvénients.

## Chapitre II

---

# Modélisation de la machine asynchrone double alimentation

### SOMMAIRE

---

II.1	INTRODUCTION . . . . .	20
II.2	DESCRIPTION DE LA MADA . . . . .	20
II.3	HYPOTHÈSE SIMPLIFICATRICE . . . . .	20
II.4	MODÈLE MATHÉMATIQUE . . . . .	21
II.4.1	Equation électrique . . . . .	21
II.4.2	Equation de flux . . . . .	21
II.5	MODEL DE LA MACHINE DANS LE PLAN DE PARK . . . . .	22
II.5.1	la transformation du Park . . . . .	22
II.5.2	Les équations électriques dans le repère de Park . . . . .	23
II.5.3	Les équation magnétique dans le repère de Park . . . . .	23
II.5.4	Equation du couple électromagnétique . . . . .	23
II.6	CHOIX DE LA RÉFÉRENCE . . . . .	24
II.6.1	Référentiel lié au stator . . . . .	24
II.6.2	Référentiel lié au rotor . . . . .	24
II.6.3	Référentiel lié au champ tournant . . . . .	25
II.7	MODES DE FONCTIONNEMENT . . . . .	25
II.7.1	Fonctionnement moteur hyper/hyposynchrone . . . . .	25
II.7.2	Fonctionnement générateur hyper/hyposynchrone . . . . .	26
II.8	ONDULEUR DE TENSION TRIPHASÉ . . . . .	26
II.8.1	Modélisation de l'onduleur de tension . . . . .	26
II.8.2	Modulation de largeur d'impulsions (MLI) Sinus-Triangle . . . . .	28
II.9	CONCLUSION . . . . .	29

---

## II.1 Introduction

Après avoir introduire le principe de fonctionnement du MADA, dans ce chapitre on va étudier la modélisation de la MADA dans un référentielle a champ tournant et cela pour obtenir un modèle mathématique qui nous permettra de valider notre modèle en boucle ouverte. Au début on modélisera notre machine dans le repéré triphasée (A,B,C) tout on donnant les équations électriques et magnétiques, puis on introduit la transformer de Park qui nous permettons de passer du système triphasé au système biphasé et en passe à la modélisation de l'alimentation de la machine(onduleur MLI).

## II.2 Description de la MADA

La machine asynchrone double alimentation et représenter par la figure ci dessous. Les armatures magnétiques du stator et du rotor ont une forme cylindrique, et ils sont munies par un enroulement triphasé et sépare entre eux par un entrefer constant. Le stator comporte 3 enroulement dont les axes magnétique (OA,OB,OC) pour le stator et (Oa,Ob,Oc) pour le rotor, les axes du stator sont décalé dans l'espace de  $120^\circ$  et le même pour les axes du rotor.[18]

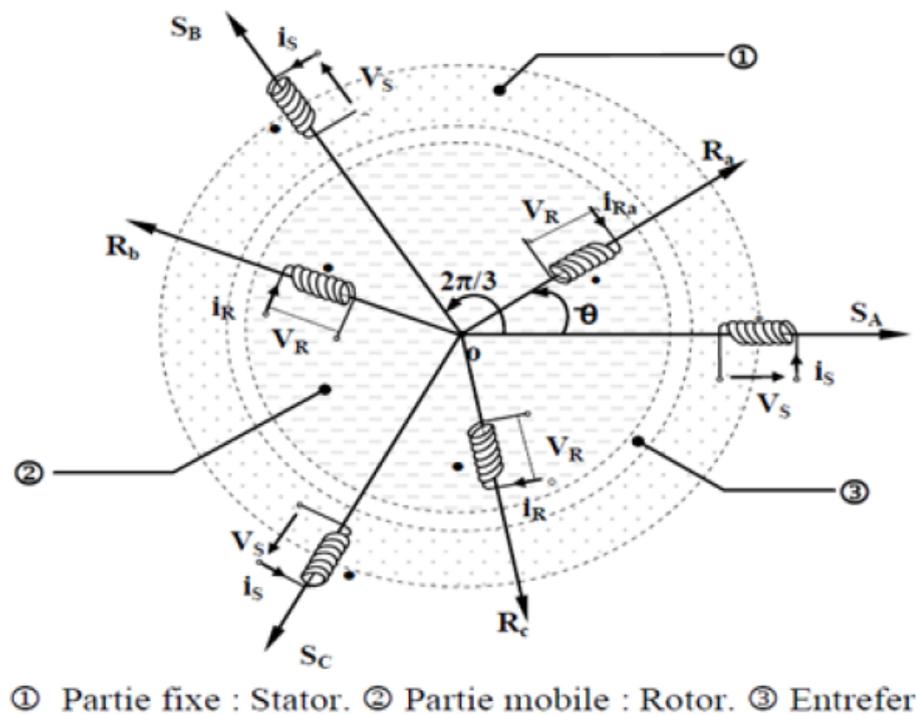


FIGURE II.1 – Représentation simplifié de la MADA

## II.3 Hypothèse simplificatrice

Pour la modélisation du MADA en implique les hypothèses simplificatrices suivante :

- En suppose que la machine est idéale. C'est à dire que les harmoniques d'espace sont supposés négligeable et les ampères-tours sont distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine.
- Les résistances ne varie pas avec la température et on néglige l'effet de peau
- Les pertes dans le fer seront négligées
- La saturation du circuit magnétique sera négligées.

[18] [21]

## II.4 Modèle Mathématique

### II.4.1 Equation électrique

Pour le stator :

$$\begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Pour le rotor :

$$\begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$V_{iabc}$  : Tension simple de l'enroulement  $i$

$I_{iabc}$  : Courants de phase de l'enroulement  $i$

$R_i$  : Résistance de l'enroulement

$\Phi_{iabc}$  : Flux de l'enroulement traversant l'enroulement  $i$

### II.4.2 Equation de flux

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants.

$$\begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{sr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.3})$$

De même façon en aura pour le rotor :

$$\begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{rs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\begin{pmatrix} L_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{pmatrix} Lr \\ Mr \\ Mr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Ms \\ Mr & Mr & Ls \end{pmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Et :

$$\begin{pmatrix} Msr \\ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Mrs \\ \end{pmatrix}^{-1} = \Pi sr \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\Pi/3) \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Mij : Inductances mutuelles entre deux enroulement i et j (variable dans le temps)

Li : Inductances propre de l'enroulement i

$\Pi sr$  : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

## II.5 Model de la machine dans le plan de Park

Il y a plusieurs modèles pour faire la transformation en va site quelque méthode :

- Modèle de la machine dans le plan de Park.
- Modèle de la machine dans la base  $(\alpha, \beta, z_1, z_2, z_3, z_4)$ . *Modle delamachinedansleplandeconcordia*.  
On a choisi le premier modèle (Modèle de Park) pour simplifier l'étude et rendre les équations électriques plus simple à exploiter, on utilise la transformée de Park. Elle s'appelle aussi la transformation des deux axes. Leur composante relative d'axe directe 'd', et l'axe en quadratique 'q'.

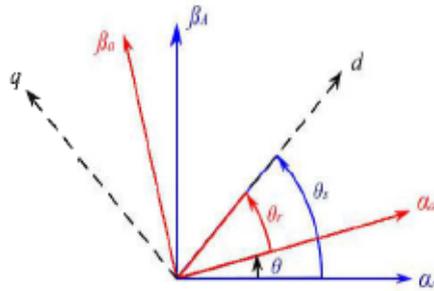


FIGURE II.2 – Position spatiale des différents référentiel

### II.5.1 la transformation du Park

Le transformé de Park (a,b,c) vers (dqo) est défini comme suit :

$$\begin{pmatrix} Xd \\ Xq \\ Xo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{pmatrix} A(\theta) \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos(\theta - 4\Pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\Pi/3) & -\sin(\theta - 4\Pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La transformé de Park inverse (dqo) vers (a,b,c) est défini comme suit :

$$\begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\theta) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Où :  $X_d$  : la composante directe

$X_q$  : la composante quadratique

$X_o$  : la composante homopolaire ( $X_o = 0$ ) si le système (a,b,c) est équilibrée

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$\begin{pmatrix} A(\theta) \end{pmatrix}^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & -\sin(\theta - 2\Pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & -\sin(\theta + 2\Pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$

### II.5.2 Les équations électriques dans le repère de Park

Les équations électriques de la machine sont exprimées par :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad (\text{II.12})$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{II.13})$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \quad (\text{II.15})$$

### II.5.3 Les équation magnétique dans le repère de Park

$$\begin{pmatrix} \phi_{sq} \\ \phi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sq} \\ I_{rq} \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$\begin{pmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{rd} \end{pmatrix} \quad (\text{II.17})$$

### II.5.4 Equation du couple électromagnétique

L'équation du couple électrique est donné par :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot (\phi_{qs} I_{dr} - \phi_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II.18})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot (\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) \quad (\text{II.19})$$

$p$  : Nombre du pair du pole

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

## II.6 Choix de la référence

Il existe 3 types de références, et le choix de la référence dépend au problème étudié.

### II.6.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est appelé aussi système d'axe ( $\alpha, \beta$ ) ; Il est utile pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

$$\omega_a = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_a \quad (\text{II.22})$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{II.23})$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad (\text{II.24})$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_m \phi_{qr} \quad (\text{II.25})$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_m \phi_{dr} \quad (\text{II.26})$$

### II.6.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, le système d'axe (d,q) est immobile par rapport au rotor. Il est utile pour étudier les régimes transitoires des machines synchrones et asynchrones.

$$\omega_a = \omega_m \quad (\text{II.27})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (\text{II.29})$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_m \phi_{qs} \quad (\text{II.30})$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_m \phi_{ds} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

### II.6.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axe (x,y), Il est souvent utile dans le cas où la fréquence d'alimentation est constante, Il tourne avec la vitesse de champ électromagnétique. On utilise le référentiel lié au champ tournant pour la modélisation et la commande de MADA.

$$\omega_a = \omega_m \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m \quad (\text{II.35})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = (W_s - W_m) = W_r \quad (\text{II.36})$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - W_s \phi_{qs} \quad (\text{II.37})$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + W_s \phi_{ds} \quad (\text{II.38})$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (W_s - W_r) \phi_{qr} \quad (\text{II.39})$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (W_s - W_r) \phi_{dr} \quad (\text{II.40})$$

## II.7 Modes de fonctionnement

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur Notons qu'en fonctionnement génératrice la puissance  $P_s$  absorbée par le stator et la puissance du réseau sont négatives.[7] [10]

### II.7.1 Fonctionnement moteur hyper/hyposynchrone

du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator de cette dernière. Durant le mode hypo-synchrone (II.3.a), où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement  $P_r$  transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau. Pendant le mode hyper-synchrone (II.3.b), le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme et le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator.

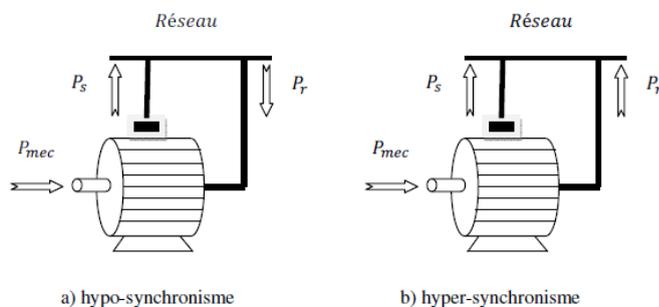


FIGURE II.3 – Fonctionnement moteur

### II.7.2 Fonctionnement générateur hyper/hyposynchrone

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique  $P_m$  à la machine. En mode hypo-synchrone (II.4.a), une partie de la puissance transmittant par le stator est réabsorbée par le rotor. Par contre, en mode hyper-synchrone (II.4.b), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à  $P_r$  est transmise par l'intermédiaire du rotor.

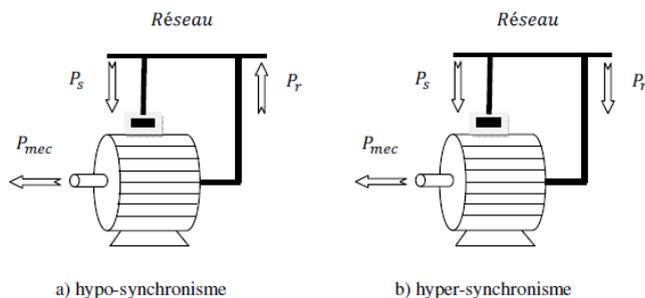


FIGURE II.4 – Fonctionnement générateur

## II.8 Onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative. Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode montée en antiparallèle [22].

### II.8.1 Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur de tension figure (1.1), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à  $E/2$  connectés entre eux par un point noté  $n$  [22].

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée,

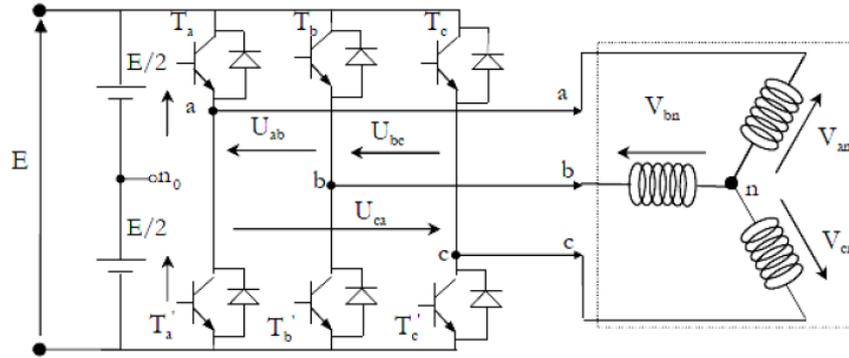


FIGURE II.5 – Onduleur de tension triphasé

— les chutes de tension à leurs bornes sont négligeables,  
 — la charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile avec point neutre isolé n.  
 L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors ; on a :

\* si  $S_i=1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert.

\* si  $S_i=0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Les relations donnant les tensions simples sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Les tensions  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  forment un systéme de tension triphase équilibré alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.43})$$

On aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = 1/3(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = 1/3(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = 1/3(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

En remplaçant (43) dans (45) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$  :

$$\begin{cases} V_{an0} = V_{nn0} + V_{an} \\ V_{bn0} = V_{nn0} + V_{bn} \\ V_{cn0} = V_{nn0} + V_{cn} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = 1/3[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.47})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits.

On a :

$$V_{in0} = S_i U_0 - U_0/2$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie[21].

### II.8.2 Modulation de largeur d'impulsions (MLI) Sinus-Triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) de forme sinusoïdale, de fréquence  $f$  et déphasées de  $120^\circ$  à une onde porteuse haute fréquence  $f_p$  de forme triangulaire .

Ceci, tout en respectant l'inégalité sur les fréquences :  $f_p \gg f$ . [14] Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. [4]

La commande de MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

-L'indice de modulation «  $m$  » égal au rapport de la fréquence de modulation  $f_p$  sur la fréquence de référence  $f_{ref}$  :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (\text{II.49})$$

-Le coefficient de réglage en tension «  $r$  » ( Taux de modulation) égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation : [22]

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (\text{II.50})$$

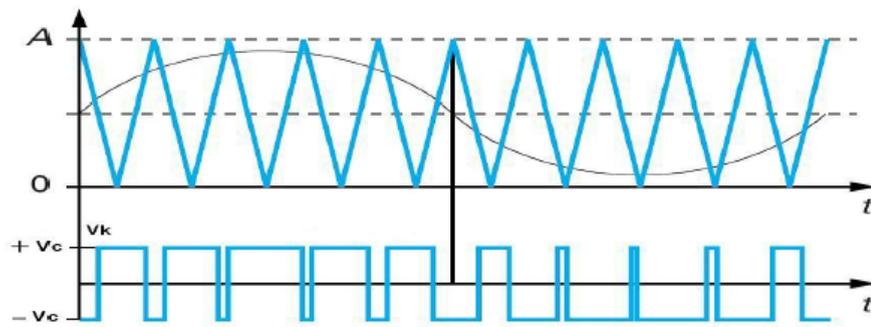


FIGURE II.6 – Principe de la MLI triangle sinusoïdale

## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une étude sur la MADA : son régime et mode de fonctionnement, étude de puissance et ses domaines d'applications. Le modèle de la machine dans le repère naturel (a, b, c) est non linéaire et fortement couplé. Donc la transformation de Park est appliquée pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande.

## Chapitre III

---

# Modélisation de l'aeroturbine

### SOMMAIRE

---

III.1 INTRODUCTION . . . . .	31
III.2 MODÉLISATION DU VENT . . . . .	31
III.3 MODÉLISATION DE LA TURBINE . . . . .	31
III.4 MODÈLE DU MULTIPLICATEUR . . . . .	33
III.5 MODÈLE DE L'ARBRE MÉCANIQUE . . . . .	33
III.6 ZONE DE FONCTIONNEMENT . . . . .	34
III.7 STRATEGIE DE COMMANDE . . . . .	35
III.7.1 Système de contrôle de l'aéroturbine . . . . .	35
III.7.2 Principe de MPPT . . . . .	36
III.7.3 Technique d'extraction du maximum de puissance . . . . .	36
III.8 CONCLUSION . . . . .	39

---

### III.1 Introduction

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

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la turbine éolienne et les différents stratégies de la commande .

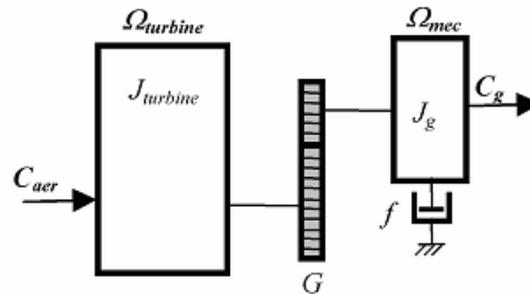


FIGURE III.1 – Modèle mécanique simplifiée de la turbine

### III.2 Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.  $V = f(t)$

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de la saison concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivant : [12]

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{III.1})$$

$A$  : la valeur moyenne de la vitesse du vent.

$a_k$  : amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$ .

$\omega_k$  : pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$ .

$i$  : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

### III.3 Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur éolien. Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales

qui pivotent sur leur axe d'un angle  $\beta$ , contrôlé par un système électromagnétique. Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ . [16] [8]

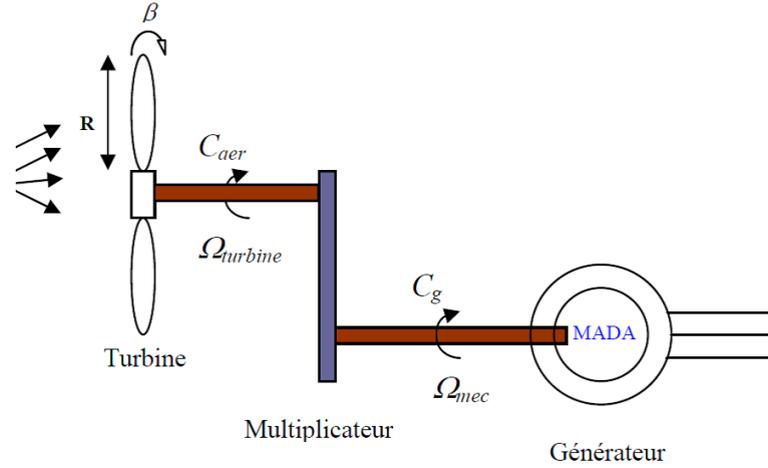


FIGURE III.2 – Modél d'une turbine éolienne

La turbine est un dispositif permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par :

$$C_{aer} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{III.2})$$

$v$  : Vitesse du vent.

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine.

$C_p$  : représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend de la caractéristique de la turbine ( $p$  dimensionnement de la pale, rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ ).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.0167(\beta - 3) \cdot \sin(A) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 3)$$

$$A = \frac{\pi(+0.1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}$$

$\beta$  : Angle de calage inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation. Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad (\text{III.4})$$

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine.

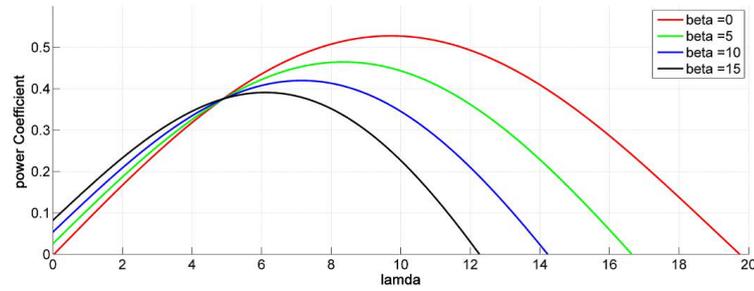


FIGURE III.3 – Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

Nous remarquons que l'augmentation de  $\beta$  permet de dégrader le coefficient  $C_p$ , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

### III.4 Modèle du multiplicateur

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale. Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice avec un rapport de vitesse  $K$ . mathématiquement il s'exprime comme suit :

$$\Omega_t = \frac{1}{K} \Omega_{mec} \quad (\text{III.5})$$

$$C_g = \frac{1}{K} C_{aer} \quad (\text{III.6})$$

$\Omega_{mec}$  : est la vitesse de la génératrice (rad / s).

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine (rad / s).

$C_g$  : est le couple entraînant de la génératrice.

### III.5 Modèle de l'arbre mécanique

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 :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{III.7})$$

avec :

$$J = \frac{J_{turbine}}{K^2} + J_g \quad (\text{III.8})$$

$J$  : Inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

$J_{turbine}$  : Inertie de la turbine.

$J_g$  : Inertie de la génératrice

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III.9)$$

$C_{em}$  : le couple électromagnétique produit par le générateur.

$C_g$  : le couple issu du multiplicateur.

$C_{vis}$  : les couples des frottements visqueux.

Le couple résistant dû aux frottements ( $C_{vis}$ ) est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (III.10)$$

Où  $f$  : coefficient de frottement visqueux.

$$f = \frac{f_t}{G^2} + f_g \quad (III.11)$$

Où  $f_t$  et  $f_g$  sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement.

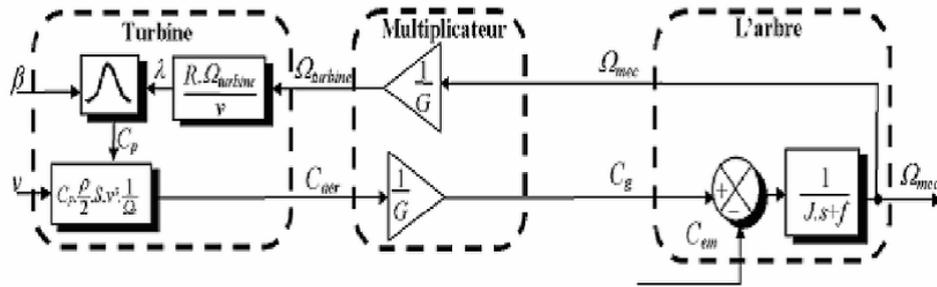


FIGURE III.4 – Schéma bloc du modèle de turbine

### III.6 Zone de fonctionnement

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat, et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées :  $V_D$  c'est la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine et  $V_M$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement. [2]

Les vitesses  $V_D$ ,  $V_n$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone I : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible (la turbine ne fonctionne pas).

- la zone II : est la zone pour laquelle la vitesse de la génératrice est adaptée afin d'extraire le maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking : MPPT). Ceci est réalisé grâce à un algorithme MPPT permettant d'imposer un couple de référence. Néanmoins, l'angle d'orientation des pales est maintenu constant, Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle
- la zone III : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas endommager l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $P$ ) [16] [2]. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie. un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques

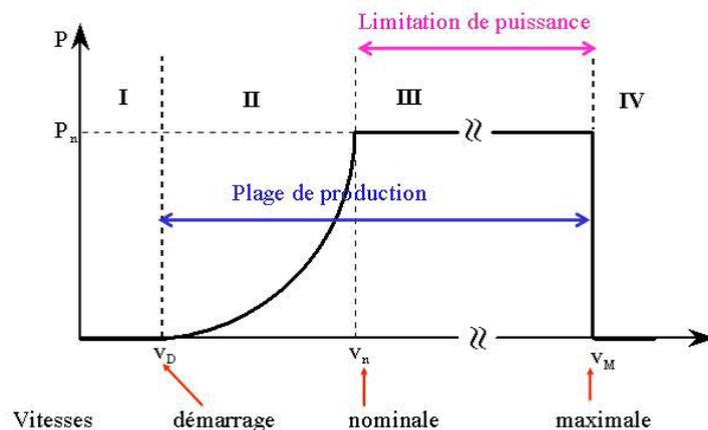


FIGURE III.5 – Les zones de fonctionnement de l'aéroturbine

## III.7 Strategie de commande

### III.7.1 Système de contrôle de l'aéroturbine

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

- 1- Boucle de régulation de la vitesse.
- 2- Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale  $f_{opt}$ , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. [16] Lors d'une rafale de vent la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique

plus lente que celle de la machine. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone III.

### III.7.2 Principe de MPPT

Le principe de la stratégie MPPT Maximum Power Point Tracking consiste, pour un angle de pale donné, à ajuster, en fonction de la vitesse du vent  $V_{vent}$ , la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence  $\Omega_{tub}^*$  pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal  $C_{pmax}$ .

$$\Omega_{turbopt} = \frac{V_{vent} \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (\text{III.12})$$

C'est l'action sur le couple électromagnétique (et donc sur la puissance convertie par la génératrice) qui va permettre d'obtenir  $\Omega_{tub}^*$  et ainsi maximiser la puissance extraite avec le maintien de  $C_{pmax}$ .

### III.7.3 Technique d'extraction du maximum de puissance

#### III.7.3-a Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Cette fluctuations engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.[13] [12]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (\text{III.13})$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de la vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.[1]

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{III.14})$$

Ou :

Cass : Régulateur de vitesse.

$\Omega_{ref}$  : La vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{turbine-ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite.

En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine-ref} \quad (\text{III.15})$$

La référence de vitesse de la turbine correspond à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{opt}$  permettant d'obtenir la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_p$ . On peut déduire :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda C_{pmax} \cdot v}{R} \quad (\text{III.16})$$

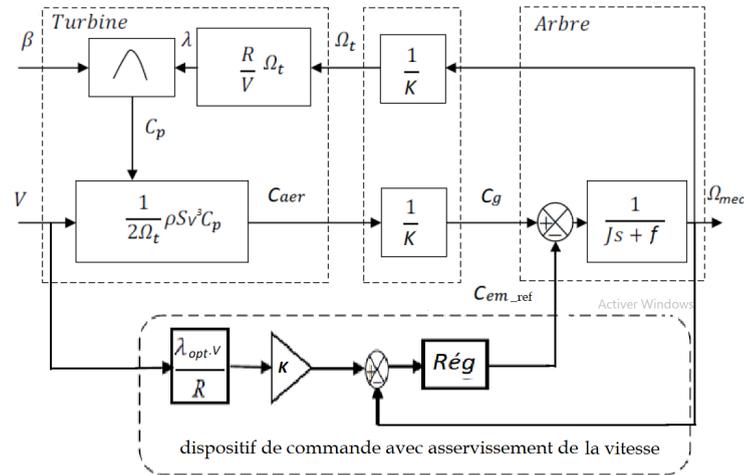


FIGURE III.6 – Schéma bloc de la maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse mécanique

### III.7.3-b Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on peut écrire :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{III.17})$$

Si on néglige l'effet du couple visqueux. ( $C_{vis} \simeq 0$ ) on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (\text{III.18})$$

Donc le couple électromagnétique de référence est estimé en fonction du couple aérogénérateur :

$$C_{em-ref} = \frac{G_{aer-estim}}{G} \quad (\text{III.19})$$

Le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine :

$$G_{aer-estim} = C_p \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estim}} \cdot v_{estim}^3 \quad (\text{III.20})$$

Une estimation de la vitesse de la turbine est calculée à partir de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estim} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{III.21})$$

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

$$v_{estim} = \frac{\Omega_{turbine-estim} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III.22})$$

A partir de ces relations on a :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3 \lambda^3} \quad (\text{III.23})$$

Pour extraire le maximum de puissance générée ; Il faut fixer le ratio de vitesse à  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . Le couple électromagnétique estimé doit alors être régler à la valeur suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2} C_{pmax}(\lambda, \beta) \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (III.24)$$

La Figure suivante présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation

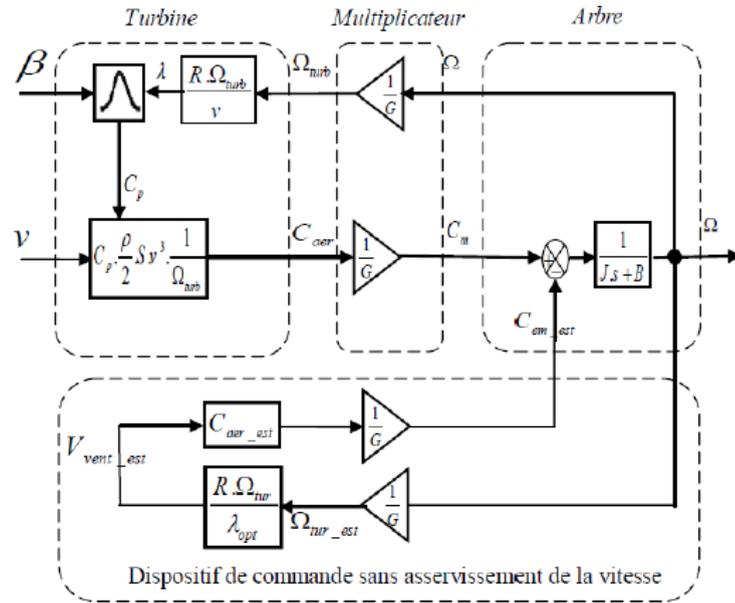


FIGURE III.7 – Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse

### III.7.3-c Modélisation du système d'orientation des pales(PITCH)

Le système d'orientation des pales permet d'ajuster la portance des pales afin de maintenir la puissance autour de sa valeur nominale. En réglant l'angle de calage, on agit sur les performances de l'éolienne et plus précisément sur le coefficient de puissance.

Le système d'orientation des pales génère alors un angle de calage de référence :  $\beta_{ref}$ .

La dynamique de l'actionneur pitch est généralement décrite par la fonction de transfert de premier ordre suivante :

$$\beta = \frac{1}{1 + \tau_\beta s} \beta_{ref} \quad (III.25)$$

$\tau_\beta$  : Constante du temps du système actionneur pitch.

Lors de la modélisation du système d'orientation de pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à  $10^\circ$ . La valeur de saturation de l'angle de calage en position est de  $90^\circ$ , cette valeur correspond à la mise en drapeau des pales.

En agissant sur l'angle de calage des pales, on modifie les performances du système, et plus précisément sur le coefficient de puissance  $C_p$ , les pales sont face au vent pour les basses vitesses ( $\beta=0^\circ$ ), pour des vitesses plus importantes du vent les pales s'inclinent afin de dégrader le coefficient de puissance  $C_p$ . [1]

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les éléments d'une éolienne (le vent, la turbine, le multiplicateur et l'arbre mécanique), Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement nous avons expliqué deux techniques de commande : la MPPT (avec et sans asservissement) pour maximiser le capteur de puissance pendant les faibles vitesses du vent et le « pitch control » pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses du vent.

## Chapitre IV

---

# Commande vectorielle des puissances actives et réactives

### SOMMAIRE

---

IV.1 INTRODUCTION . . . . .	41
IV.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE . . . . .	41
IV.3 ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE . . . . .	41
IV.3.1 Relation entre les courants statoriques et rotoriques . . . . .	42
IV.3.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques . . . . .	42
IV.3.3 Relation entre tension rotorique et courant rotorique . . . . .	43
IV.4 SYNTHÈSE DES RÉGULATEURS PI . . . . .	46
IV.5 CONCLUSION . . . . .	47

---

## IV.1 Introduction

Durant des années, plusieurs recherches universitaires et industrielles ont été réalisées et proposées pour remédier au problème de la commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. Pour le cas du contrôle vectoriel de la MADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergies notamment les transferts de puissances actives et réactives envoyées sur le réseau.

Dans ce chapitre. Nous allons établir les équations qui lient les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques, pour développer une chaîne de commandes indépendant des puissances, qui va nous aider à contrôler le système de production d'énergie éolienne.

## IV.2 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances actives et réactives générées au stator de la machines. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique  $I_{rq}$ , et la puissance réactive dépend uniquement du courant  $I_{rd}$ . [4][3]

## IV.3 Orientation du flux statorique

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.1)$$

Les équations liant les flux sont :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (IV.2)$$

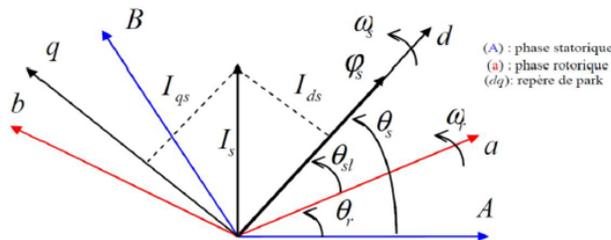


FIGURE IV.1 – Orientation de l'axe d sur le flux statorique

Afin de réaliser la loi de commande nous choisissons d'orienter le flux statorique suivant l'axe d . Par conséquent nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Si on néglige la résistance  $R_s$  ce qui correspond à une hypothèse réaliste par rapport aux pertes pour le cas des machines de moyenne et forte puissance généralement employées dans le domaine dès la conversion de l'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante : [14]

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{sq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

### IV.3.1 Relation entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

### IV.3.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère biphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

En remplaçant les courants statoriques directs  $I_{sd}$  et en quadratures  $I_{sq}$  par leurs expressions , nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Il ressort de l'expression que le contrôle des puissances active et réactive au stator est indépendant. Avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près imposée par le réseau.

$$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \quad (\text{IV.11})$$

### IV.3.3 Relation entre tension rotorique et courant rotorique

A partir du système d'équation (eq(6) ), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} - \omega_r \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L} \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

où g est le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique :

$$\omega_r = g\omega_s$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés Disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

La figure représente le schéma bloc illustrant la structure interne de la MADA.

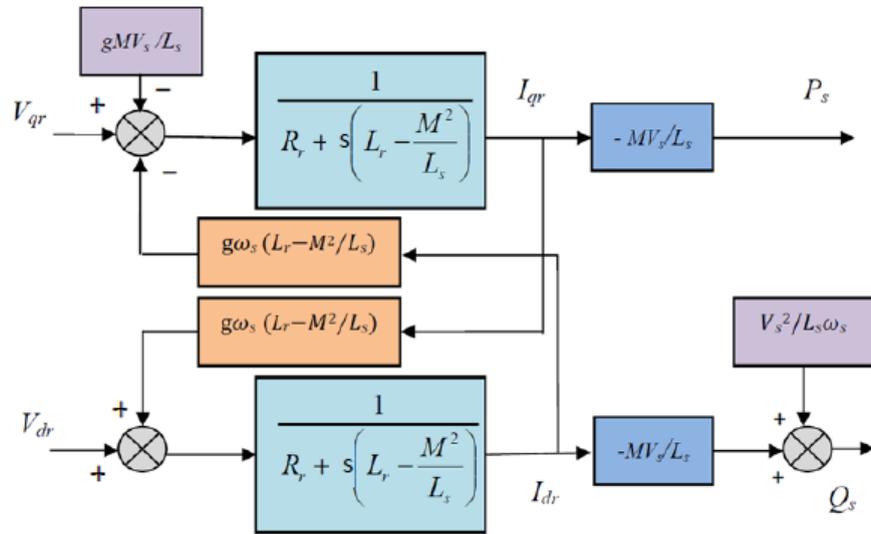


FIGURE IV.2 – Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui permet de mettre en place une commande direct des puissances, vu que l'influence des couplages près de 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 rotorique q et la puissance réactive pour l'axe rotorique d. [14]

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal. [3]

Ainsi, il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la Méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.



## IV.4 Synthèse des régulateurs PI

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées.

Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en oeuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base de modèle simplifié de la Figure (MADA).

La Figure montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont

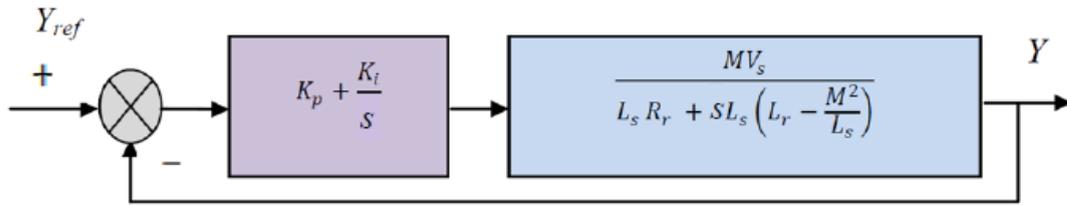


FIGURE IV.5 – Système réguler par un PI

la fonction de transfert est de la forme :

$$K_p + \frac{K_i}{p} \quad (IV.15)$$

correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la fig précédente. La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant les régulateurs s'écrit de la manière suivante :[20]

$$FTBO = \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{\frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (IV.16)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (IV.17)$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = K_p \frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} / s \quad (IV.18)$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + s\tau_r} \quad (IV.19)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}$$

Le terme  $T$  désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{T} \quad (\text{IV.20})$$

$$K_i = \frac{R_r}{T} \quad (\text{IV.21})$$

avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r} \quad (\text{IV.22})$$

## IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre. Nous avons présenté la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation en présentant ses différents types (commande direct et commande indirect), qui nous facilitera le contrôle de système global.

## Chapitre V

---

# Commande globale du système convertisseurs-machine pour un aerogénérateur

### SOMMAIRE

---

V.1 INTRODUCTION . . . . .	49
V.2 SIMULATION DU SYSTÈME . . . . .	50
V.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS . . . . .	53
V.4 CONCLUSION . . . . .	53

---

## V.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, en premier temps on va présenter (à l'aide d'un schéma simulink sous matlab) l'architecture du système (turbine+MADA). Ensuite on va donner les différents résultats obtenus pour plusieurs scénarios que nous avons choisis.

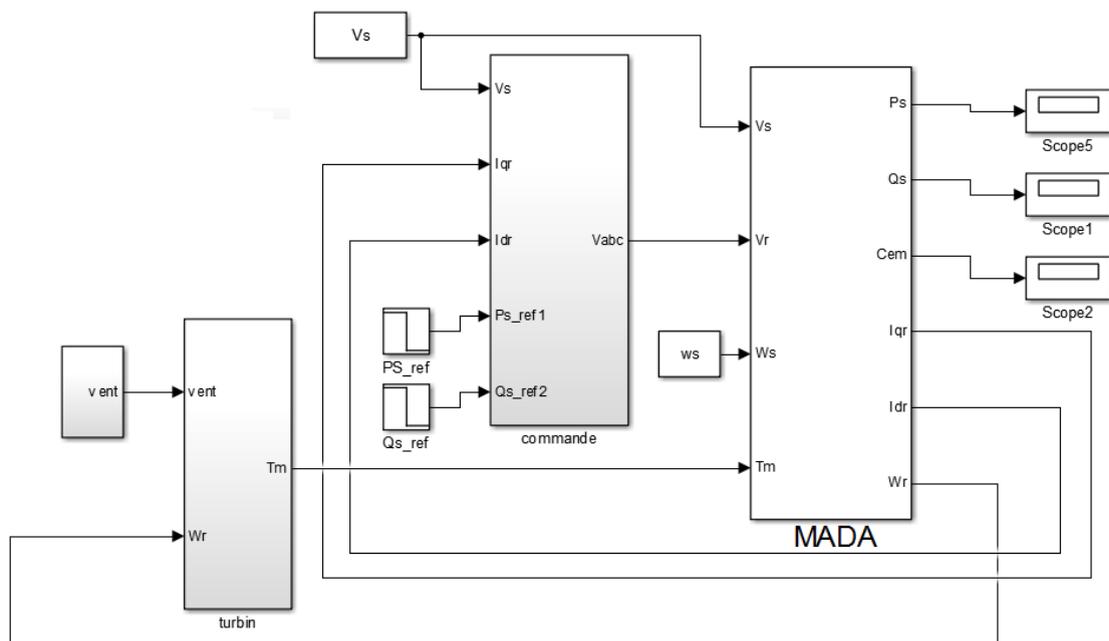


FIGURE V.1 – Schema simulink du système global (turb+MADA)

## V.2 Simulation du système

on va présente les résultats de simulation du modèle de la machine asynchrone double alimentation intégré dans un système éolien. On a choisi un profil du vent variable de 10 à 13.5 m/s pour une période du 0 a 10 secondes, les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle directe.

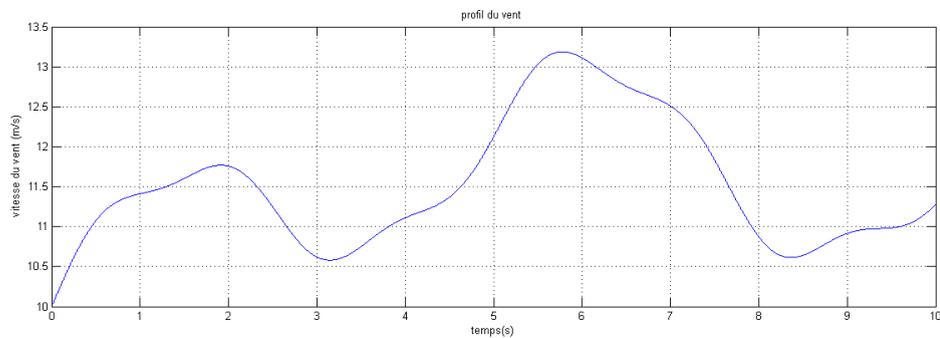


FIGURE V.2 – Profile du vent

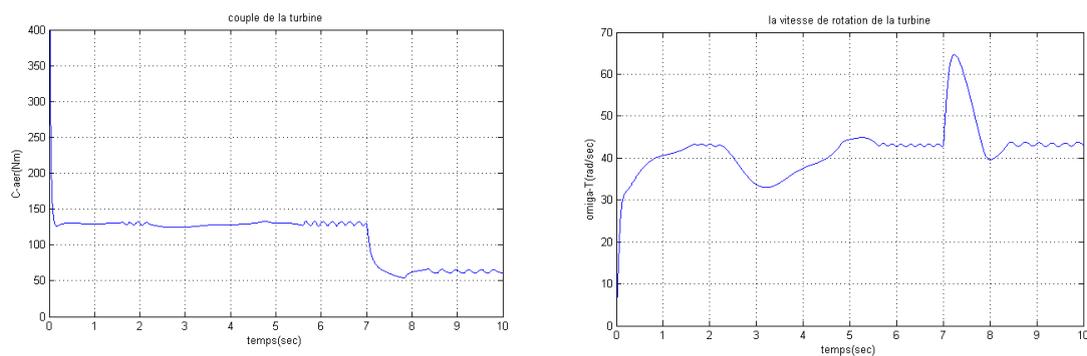


FIGURE V.3 – Chrono-gramme de couple et vitesse de la turbine

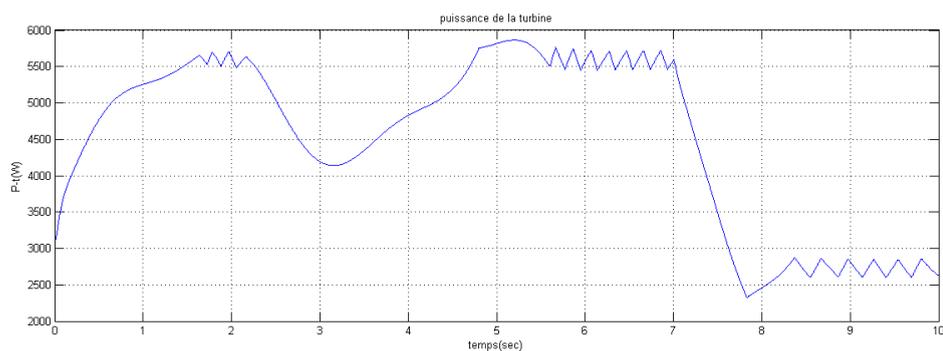


FIGURE V.4 – Chrono-gramme de la puissance de la turbine

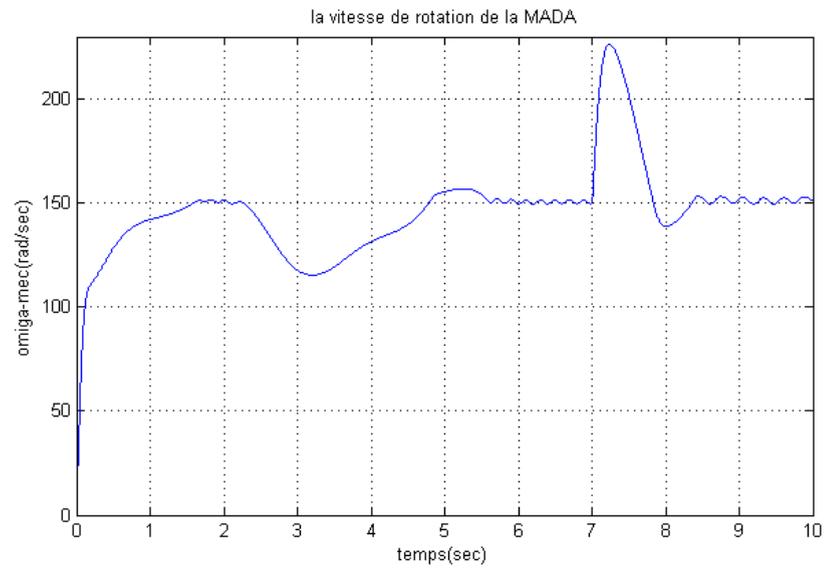
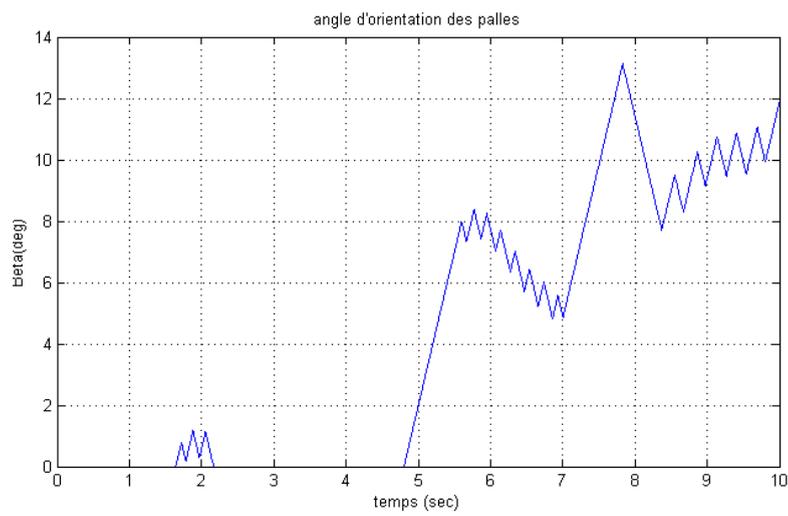


FIGURE V.5 – Chrono-gramme de la vitesse de la MADA

FIGURE V.6 – Variation de l'angle  $\beta$

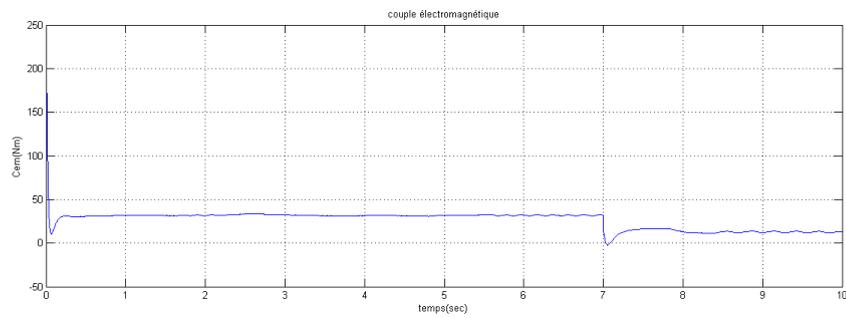


FIGURE V.7 – Chrono-gramme du couple électromagnétique

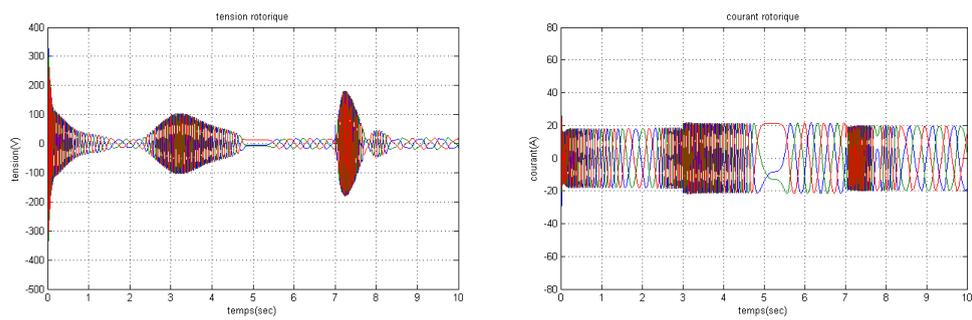


FIGURE V.8 – Chrono-gramme des tensions et courants rotoriques

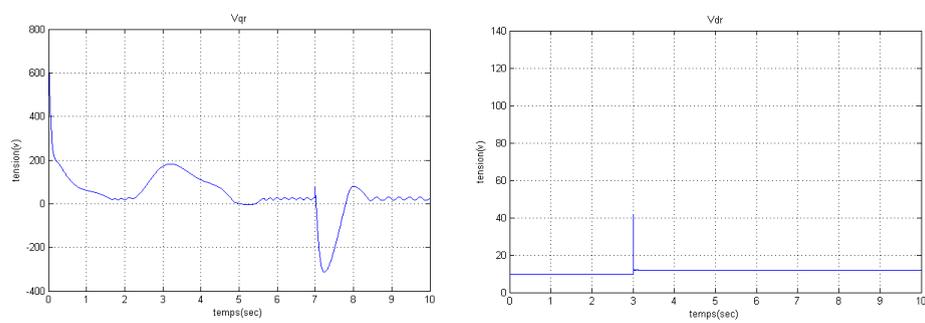


FIGURE V.9 – Chrono-gramme des tension sur l'axe direct et quadratique

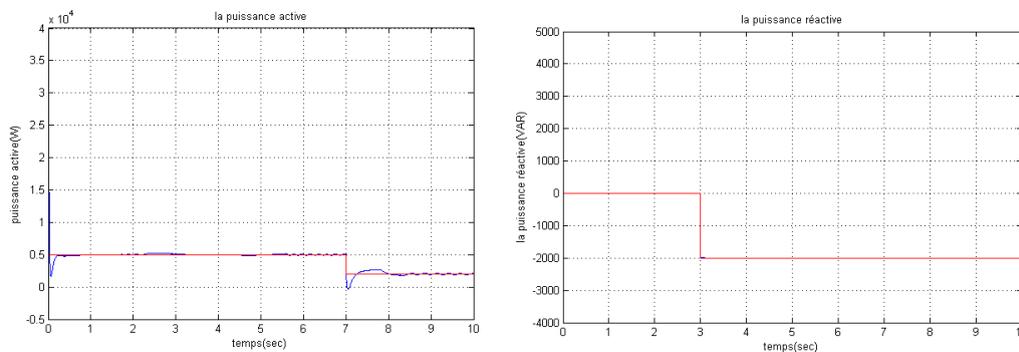


FIGURE V.10 – Chrono-gramme des puissances actives et réactives de la MADA

### V.3 Interprétation des résultats

Dans les figures ci-dessus nous avons selon un profil du vent (figure V.2), la turbine fournit un couple mécanique et une vitesse de rotation donné par les figures (V.3). On voit qu'à partir de 5s la vitesse du vent augmente. Cette dernière affecte indirectement à la vitesse du MADA (figure V.5) par le couple de la turbine, ce qui impose l'introduction de Pitch contrôle (figure V.6) permettant de limiter la vitesse de la MADA à  $151 \text{ rad/s}$ .

Les résultats de simulation montre les performances de la commande vectorielle appliquer au MADA. Les figures obtenue sont acceptable, du point de vue pour suie de la consigne : les puissances suie ces références, les erreurs de poursuite sont faible avec un dépassement acceptable de 20% , le temps de réponse qui caractérisants le régime transitoire est très faible.

Les résultats de simulation montre qu'il y a une relation entre les puissances actives et réactives et la vitesse de la MADA. Cette dernière est adapte a la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

### V.4 Conclusion

dans ce chapitre, en premier temps on a présenter le modèle SIMULINK du système globale, puis on a donner les résultats de simulation.

Les résultats sont parfaites, la variation des puissances active et réactive est adaptée à la vitesse du vent.

---

## Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire, nous a permis d'étudier par simulation sous Matlab-simulink la commande des puissances actives et réactives d'une éolienne dont la génératrice électrique est une machine asynchrone à double alimentation.

Ceci nous a amène en premier lieu à donner un rappel sur le système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et leur mode de fonctionnement. par la suite on a présenté les différents types de machine électrique utilisées ainsi la machine asynchrone à double alimentation est retenue. suite à des hypothèses simplificatrices un modèle de PARK à flux statorique orienté est présenté.

d'après les technique d'automatique nous avons élaborer un modèle MIMO (deux entrées et deux sorties) perturbé. Ceci nous a conduit à insérer un système de contrôle assurant la compensation statique des perturbations. Le réglage des puissance active et réactive direct est assurer par deux régulateurs PI. En fin nous avons présenté le schéma simulink global et les résultats de simulations. En perspective plusieurs aspect peuvent être abordé à savoir :

- Améliorer la stratégie de commande.
- Validation des résultats obtenue par réalisation pratique.

---

## Bibliographie

- [1] CHEMIDI ABDELKARIM : *Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme*. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, 2015.
- [2] Farouq ACHACHI et Abderrahim BOUSSOUAR : *Modélisation et commande d'un aérogénérateur éolien basée sur une génératrice synchrone double étoile à rotor bobiné*. Thèse de doctorat.
- [3] DJAAFRI Othmanet HARIZI ASSAM-EDDINE : *Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne*. Thèse de doctorat, UNIVERSITE de M'SILA, 2017.
- [4] LEGHRIB BILAL : *Commande vectorielle et transfert des puissances de la machine asynchrone à double alimentation*. Thèse de doctorat, UNIVERSITE De SKIKDA, 2011.
- [5] Sidi Mohammed BOUDIA : *Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie*. Thèse de doctorat, Citeseer, 2013.
- [6] MEMOIRE DE FIN DE CYCLE : *Commande d'un aérogénérateur basé sur une génératrice à double alimentation*.
- [7] Tarak GHENAM : *Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [8] Naouel HAMDI : *Modélisation et commande des génératrices éoliennes*. *Memoire de Magister, Université Mentouri de Constantine*, 2008.
- [9] Mr MESAI AHMED HAMZA, Mr NADIR KAIS et Master en ELECTROTECHNIQUE : *Commande de la machine asynchrone à double alimentation—apport des techniques de l'intelligence artificielle*.
- [10] Bahia KÉLKOUL : *Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation*. Thèse de doctorat, 2011.
- [11] Mohammed-Tahar LATRECHE : *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien*. Thèse de doctorat, 2018.
- [12] Mohammed MALKI et Saïd ALI BELARBI : *Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine+ MADA+ Réseau) en mode continu et discret*. Thèse de doctorat, 2014.

- 
- [13] Ahmed MELLOUL : *Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienn.* Thèse de doctorat, 2018.
- [14] L MOURAD : *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur.* Thèse de doctorat, Ph. D. thesis, Université Aboubakr Belkaid–Tlemcen–Faculté de Technologie, 2016.
- [15] Yazid SAIDI, Yahia YAHIAOUI, D AOUZELLAG *et al.* : *Etude et réalisation d'une turbine éolienne.* Thèse de doctorat, université Abderahmane Mira, 2014.
- [16] Mokrane SMAILI : *Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération.* Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [17] Abdoulaye Mamadie SYLLA : *Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation.* Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2013.
- [18] Zineb TAMINDJOUTE, Amel TOUATI, Kamel OUARI *et al.* : *Etude Et commande d'une Machine Asynchrone A double alimentation mada.* Thèse de doctorat, 2017.
- [19] Belkacem TOUAL : *Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable.* Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2010.
- [20] Mr KOURANE YAMINE, Mr GANI KHALED, Mr FELLA BOUALEM et Mr BOUDRIES ZOUBIR : *Commande vectorielle d'une mada dédiée à l'énergie éolienne.*
- [21] TRIA Fatma ZAHRA : *Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA par différentes techniques.* Thèse de doctorat, Université d'El- oued, 2013.
- [22] Souhila ZEGHOUDI : *COMMANDE PAR PASSIVITE DE LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANANTS.* Thèse de doctorat.

---

## Annexe : Paramètres de la machine

### Paramètres de la machine

Nom	Valeur
$P_n$	7.5 kw
$V_n$	220/380 v
$f_n$	50 Hz
$R_s$	0.455 $\Omega$
$R_r$	0.62 $\Omega$
$L_s$	0.084 H
$L_r$	0.081 H
$M$	0.078 H
$J$	0.3125 kg.m <sup>2</sup>
$p$	2

### Paramètres de la turbine

Nom	Valeur
$P_n$	7.8 kw
$\rho$	1.225 /
$R$	1.8 m
$K$	3.5 /
$J_{turbine}$	0.042 kg/m <sup>2</sup>

---

## Les schémas de simulation

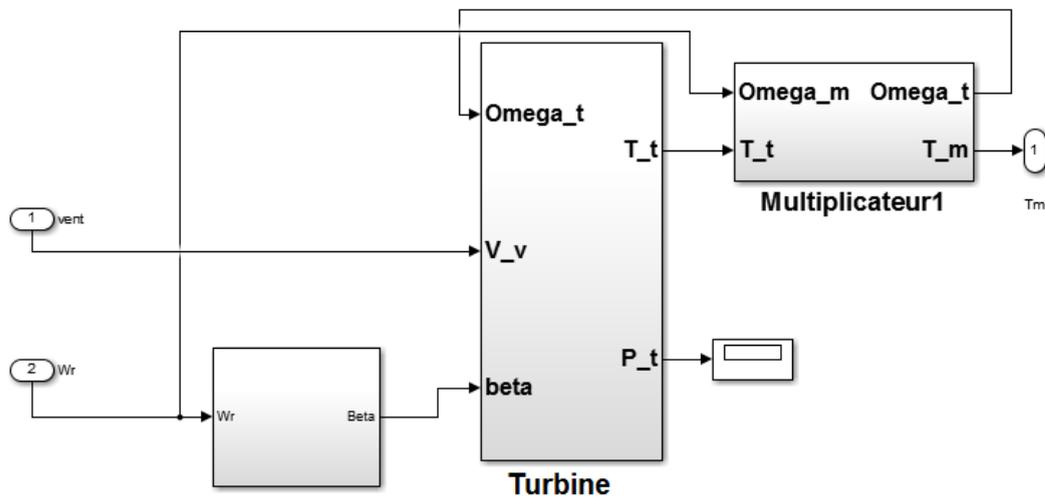


FIGURE 11 – Schéma simulink de la turbine

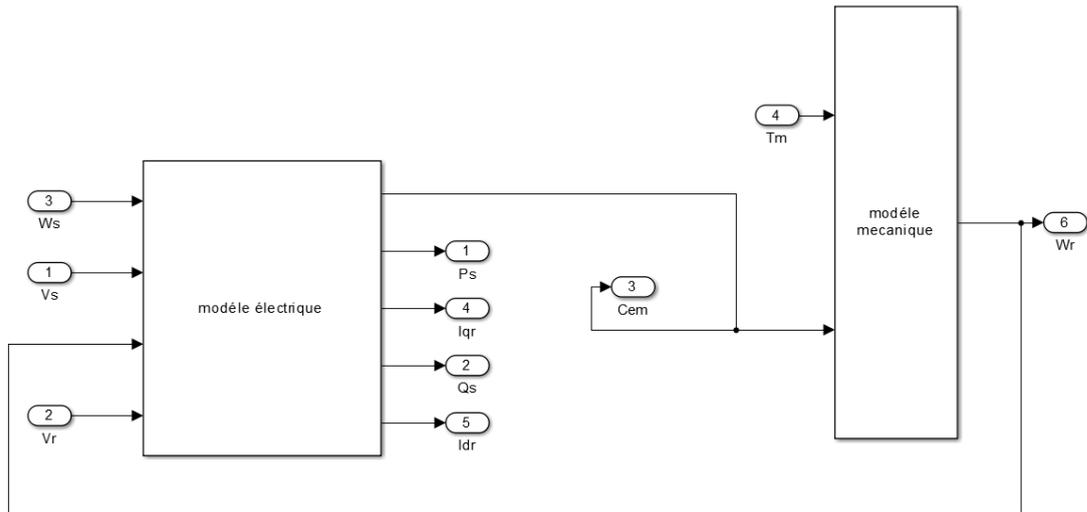


FIGURE 12 – Schéma simulink de la MADA

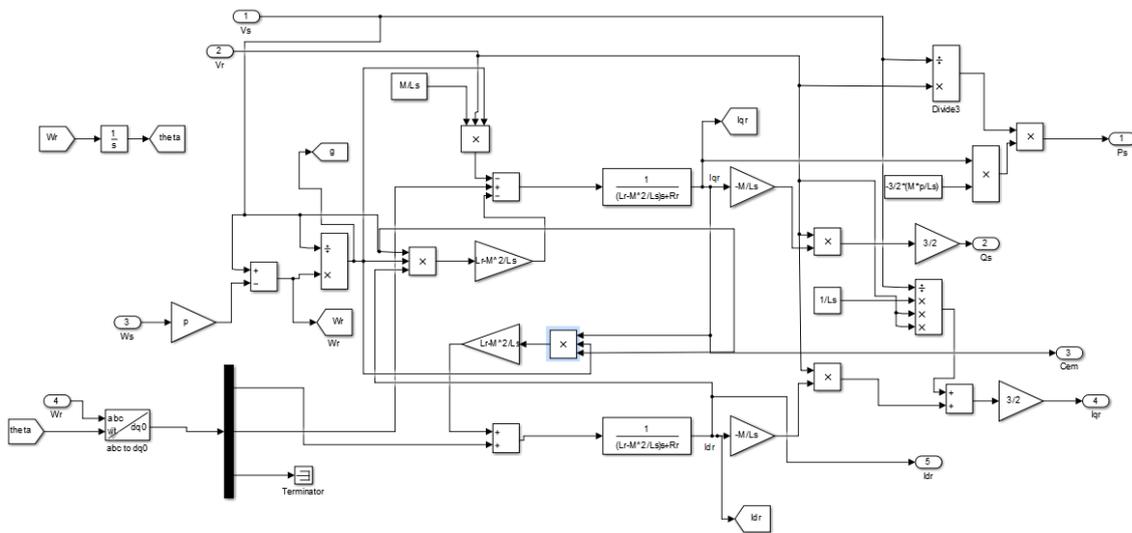


FIGURE 13 – Schéma simulink du modèle électrique

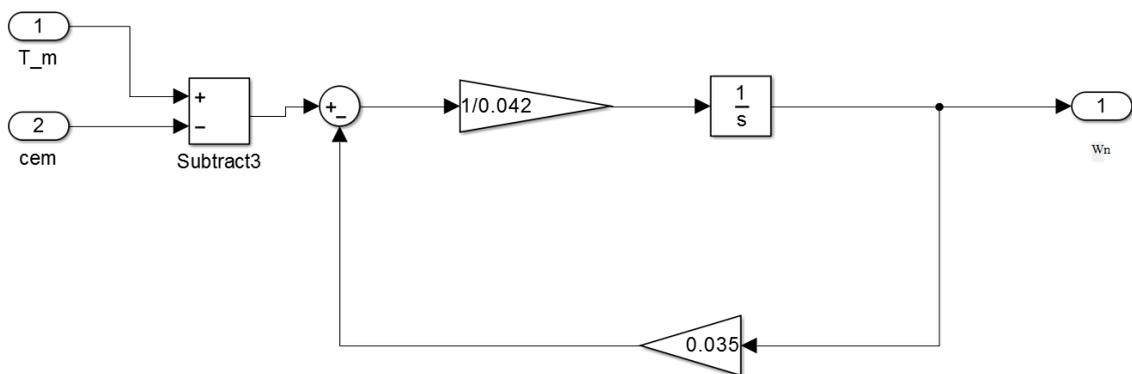


FIGURE 14 – Schéma simulink du modèle mécanique

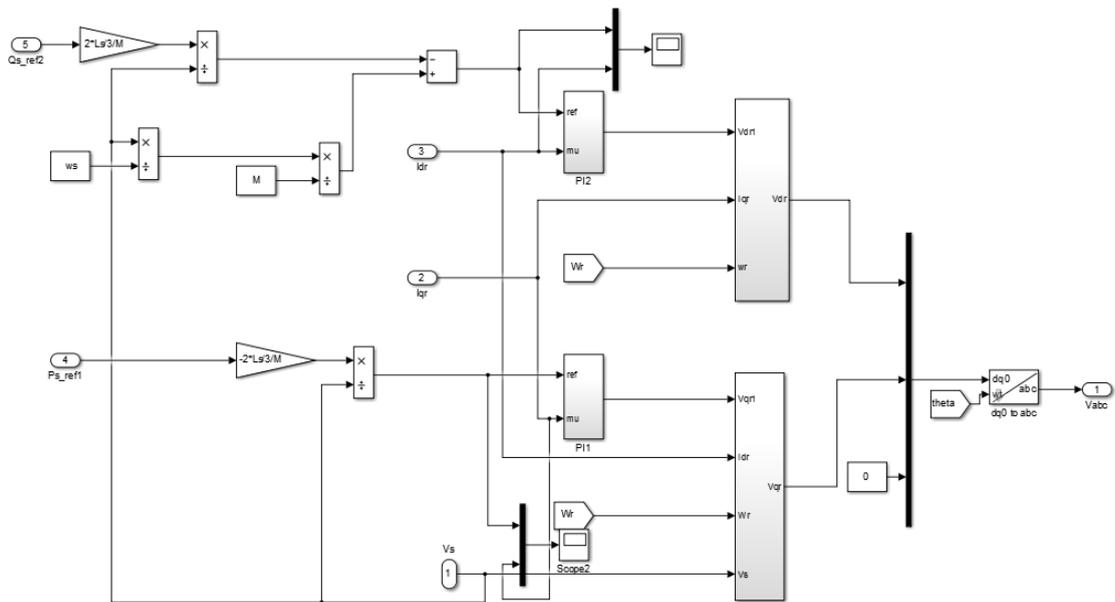


FIGURE 15 – Schéma simulink de la commande du système

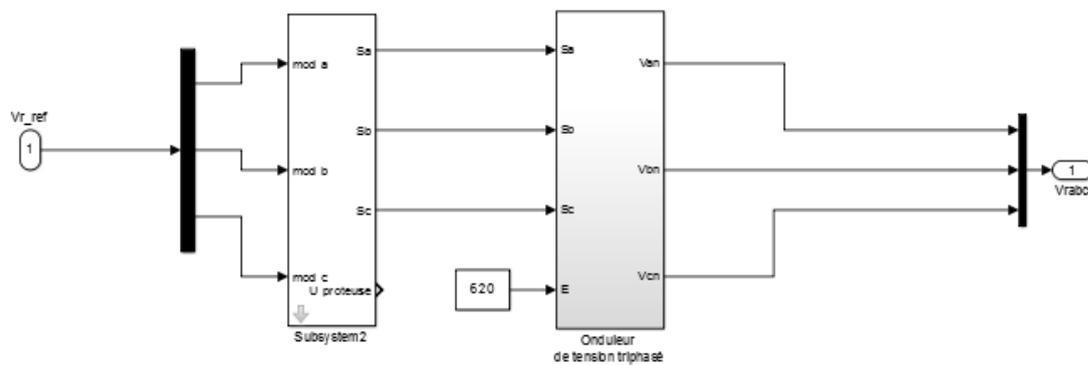


FIGURE 16 – Schéma simulink de l'onduleur MLI

# COMMANDE DES PUISSANCES ACTIVES ET RÉACTIVE D'UNE ÉOLIENNE BASÉE SUR UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

## **Résumé**

Ce travail, présente la modélisation et la simulation d'un système de production d'énergie électrique, a base d'une turbine éolienne coupler par un générateur asynchrone a double alimentation (GADA); le stator de la GADA est directement relié au réseau, par contre son rotor est relié en cascade (onduleur, bus continue et redresseur), ou on a établie pour le convertisseur MLI coté machine un contrôle de puissance active et réactive est réaliser via les grandeurs rotoriques (commande directe des puissances).

L'objectif de ce mémoire est le contrôle indépendant des puissances par une synthèse PI.

## **Mots clés**

*MADA , GADA , Turbine, Synthèse PI , Commande vectoriel*

## ACTIVE AND REACTIVE POWER CONTROL OF A WIND TURBINE BASED ON AN ASYNCHRONOUS DUAL POWER GENERATOR

## **Abstract**

This work, presented the modelling and simulation of an electrical power generation system, based on a wind turbin coupled by a double power asynchronous generator (DFIG); the DFIG stator is directly connected to the network, but its rotor is connected in cascade (inverter, continuous bus and rectifier), or it has been established for the machine-side MLI converter an active and reactive power control is achieved via the rotor sizes (direct power control).

The objective of this memory is the independent control of the powers by an IP synthesis.

## **Keywords**

*DFIM,DFIG,turbine,PI synthesis,vector command*