



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de la Technologie

Filière: Génie électrique

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADÉMIQUE

Option : Machines électriques

Par : Sahraoui Mohammed – Sahraoui Yahia

Thème

**Commande prédictive
du couple et du flux d'un générateur asynchrone à double
alimentation**

Devant le jury composé de :

Mr. Boughezal Mohammed Salah	0	Président
Mr. Toumi Djaafar		Examineur
Mr. SERHOUD Hicham.		Encadreur

2025-2026



Dédicace

À ceux dont la biographie est empreinte de nobles valeurs et dont la
pensée éclaire notre chemin ;

À nos chers parents, premiers artisans de notre réussite dans
l'enseignement supérieur,
que Dieu leur accorde une longue vie et les protège.

À celles qui nous ont guidés sur le chemin de la vie, soutenus avec
tendresse et entourés d'affection jusqu'à aujourd'hui,

À nos chères mamans,
que Dieu les bénisse et les garde.

À nos frères et sœurs,
ainsi qu'à tous nos amis,
pour leur soutien, leur présence et leur encouragement.

Remerciements

Je remercie Dieu pour l'accomplissement de Ses promesses, pour avoir guidé mes pas et été mon soutien tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le Pr. SERHOUD Hicham, à qui je dois tout mon respect et ma reconnaissance. Grâce à sa patience, sa disponibilité, ses conseils précieux et ses remarques constructives, ce travail a pu être mené à terme.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour les remarques pertinentes qu'ils ont apportées.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé, soutenu et encouragé, et qui m'ont donné la force et la volonté de poursuivre et de réaliser ce modeste travail.

Résumé

Résumé

Ce travail présente une analyse technique complète de la commande prédictive du couple (PTC) et du contrôle du flux rotorique des Générateurs à Double Alimentation (GADA) dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, le GADA est devenu la technologie de générateur prédominante dans les éoliennes modernes en raison de sa capacité à fonctionner efficacement à travers des vitesses de vent variables tout en ne nécessitant qu'une fraction de la puissance totale à être traitée par des convertisseurs électroniques de puissance.

Ce mémoire traite des principes fondamentaux de fonctionnement de la Génératrice Asynchrone Doublement Alimentée (GADA), la modélisation mathématique requise pour le contrôle prédictif, la commande prédictive du couple (PTC) est également présentée afin d'assurer un contrôle précis et dynamique du couple électromagnétique et du flux.

Mots clés : Système éolien; Modélisation ; GADA ; Commande Vectorielle ; commande prédictive du couple (PTC) et du contrôle du flux rotorique.

Abstract

This work presents a comprehensive technical analysis of Torque Predictive Control (PTC) and rotor flux control of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG) in wind energy conversion systems. The DFIG has become the predominant generator technology in modern wind turbines due to its ability to operate efficiently across variable wind speeds while requiring only a fraction of the total power to be processed by electronic power converters.

This thesis addresses the fundamental principles of operation of the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), the mathematical modeling required for predictive control, Predictive Torque Control (PTC) is also presented to ensure precise and dynamic control of the electromagnetic torque and flux..

Keywords: Wind energy system; Modeling; DFIG; Vector control; Predictive Torque and Rotor flux control (PTC).

ملخص:

قدم هذا العمل تحليلًا تقنيًا شاملاً للتحكم التنبؤي بالعزم (PTC) والتحكم في التدفق الدوار لمولدات التغذية المزدوجة (GADA) في أنظمة تحويل الطاقة الريحية، أصبح مولد (GADA) التكنولوجيا السائدة في توربينات الرياح الحديثة بسبب قدرته على العمل بكفاءة عبر سرعات الرياح المتغيرة، مع عدم الحاجة إلا إلى جزء صغير من الطاقة الكلية ليتم معالجته بواسطة المحولات الإلكترونية للطاقة.

تتناول هذه الرسالة المبادئ الأساسية لعمل GADA، كما تم عرض استراتيجية التحكم التنبؤي في العزم (PTC) بهدف ضمان تحكم دقيق وديناميكي في العزم الكهرومغناطيسي والتدفق.

الكلمات المفتاحية: نظام طاقة الرياح؛ النمذجة؛ المولد غير المتزامن مزدوج التغذية (GADA)؛ التحكم الشعاعي؛ التحكم التنبؤي بالعزم (PTC)؛ التحكم في التدفق المغناطيسي للدوار.

Sommaire

Sommaire

	page
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	I
Liste des figures	II
Notations symboliques	III
Introduction générale	01
Chapitre I: Les énergies éoliennes à vitesse variable	
I.1.Introduction	02
I.2.Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	02
I.3.Définition de l'énergie éolienne	03
I.4.Constitution d'une éolienne	04
I.4.1. Principe	04
I.4.2.Constitution et Fonctionnement d'une éolienne	04
I.5.Les types d'éolienne	05
I.5.1.Éoliennes à axe vertical	06
I.5.2.Éoliennes à axe horizontal	07
I.6.Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	08
I.6.1.Bilan des forces sur une pale	08
I.6.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	09
I.6.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"	09
I.6.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"	10
I.7.Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique	10
I.7.1.Éoliennes à Vitesse Fixe	12
I.7.2.Éoliennes à Vitesse Variable	13
I.7.3.Éolienne à vitesse variable à base de la GADA (structure de Scherbius avec convertisseurs MLI)	15
I.8.Énergie disponible dans le vent	15
I.8.1 Le coefficient de puissance C_p	16
I.8.2 Théorie de Betz	16
I.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	18
I.9.1.Systèmes non couplés au réseau alternatif	18
I.9.2 Systèmes couplés au réseau alternatif	18
I.9.2.1.Machine synchrone	18
I.9.2.2.Machine asynchrone à double alimentation	19
I.10.Fonctionnement à vitesse variable	23
I.11.Zones de fonctionnement d'une éolienne	24

I.12.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	25
I.12.1.Avantages	25
I.12.2.Inconvénients	26
I.13.Conclusion	26

Chapitre II: Modélisation et commande vectorielle de la GADA

II.1.Introduction	28
II.2.Description de la GADA	28
II.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	28
II.4.Constitution de la GADA	29
II.5.Structure de la machine	30
II.6.Domaines d'application de la GADA	30
II.7.Modes de fonctionnement de la GADA	31
II.7.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	31
II.7.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	32
II.7.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	32
II.7.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	32
II.8. Modélisation de la GADA	33
II.8.1. Hypothèses simplificatrices	33
II.8.2.Modèle mathématique de la GADA	34
II.8.3 Modèle de la GADA dans le plan (d q)	37
II.9.Principe de la commande vectorielle de la GADA	37
II.10. commande vectorielle directe et la Commande vectorielle indirecte	41
II.11.Résultats de simulations	42
II.11.1.Interprétations des Résultats	44
II.12.Conclusion	45

Chapitre III: Commande prédictive du couple et du flux rotorique d'une GADA

III.1.Introduction	46
III.2. Modélisation mathématique de la GADA:	46
III.2.1.Équations de la commande prédictive du couple et du flux rotorique	48
III.2.2. Formulation de la fonction de coût	49
III.3. résultat de simulation	51
III.4. Conclusion	56
Conclusion Générale	57

Liste des figures

	Page
Chapitre I : Les énergies éoliennes à vitesse variable	
Figure (I.1) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	03
Figure (I.2) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	04
Figure (I.3) : Principaux composants d'une éolienne	05
Figure (I.4) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur	06
Figure (I.5) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable	07
Figure (I.6) : Éolienne à axe horizontal	08
Figure (I.7) : Bilan des forces sur une pale	08
Figure (I.8) : Flux d'air sur un profil de pale "stall"	09
Figure (I.9) : Variation de l'angle de calage d'une pale	10
Figure (I.10) : Évolution de la configuration électrique	12
Figure (I.11) : Éolienne à vitesse fixe basée sur la machine asynchrone à cage	13
Figure (I.12) : Éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage	13
Figure (I.13) : Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	13
Figure (I.14) : Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator	14
Figure (I.15) : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne	14
Figure (I.16) : Éolienne à vitesse variable basée sur une GADA	15
Figure (I.17) : Tube de courant autour d'une éolienne	17
Figure (I.18) : Coefficient de puissance	17
Figure (I.19) : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage	18
Figure (I.20) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	19
Figure (I.21) : Contrôle de glissement par l'énergie dissipée	20
Figure (I.22) : Structure de Kramer pour la GADA	21
Figure (I.23) : Structure avec deux ponts à diodes et à transistors	22
Figure (I.24) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	22
Figure (I.25) : Structure avec convertisseurs à MLI	23
Figure (I.26) : Aérogénérateur à vitesse variable	24
Figure (I.27) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	24
Chapitre II : Modélisation et commande vectorielle de la GADA	
Figure (II.1) : Modes de fonctionnement de la GADA	29
Figure (II.2) : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimentée par un seul convertisseur statique	29
Figure (II.3) : Structure de la machine	30

Liste des figures

Figure (II.4) : Éolienne installée en mer	31
Figure (II.5) : Modes opérationnels caractéristiques de la GADA	32
Figure (II.6) : Représentation simplifiée de la GADA	34
Figure (II.7) : Modèle de Park de la GADA	38
Figure (II.8) : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimentée en tension	40
Figure (II.9) : La puissance active et réactive statorique	42
Figure (II.10) : Courant statorique sur l'axe d (a) et courant statorique sur l'axe q (b)	42
Figure (II.11) : Courant rotorique sur l'axe d (a) et courant rotorique sur l'axe q (b)	43
Figure (II.12) : Courant d'une phase statorique (a) et courant d'une phase rotorique (b)	43
Figure (II.13) : Couple électromagnétique (a) et flux statorique (b)	43
Chapitre III : Commande prédictive du couple et du flux rotorique d'une GADA	
Figure (III.1) : Schéma de pilotage du PTC pour une GADA	46
Figure (III.2) : Organigramme simplifié de l'algorithme de contrôle prédictif proposé	50
Figure (III.3) : Implémentation sous MATLAB/Simulink de la commande prédictive du couple et du flux d'une GADA	51
Figure (III.4) : Vitesse du générateur	51
Figure (III.5) : Vitesse du générateur	52
Figure (III.6) : Réponses du flux du rotor	52
Figure (III.7) : Réponses de la puissance active et réactive du stator	52
Figure (III.8) : Réponses du couple électromagnétique (N.m)	53
Figure (III.9) : Courant statorique triphasé	53
Figure (III.10) : Courant du rotor triphasé	53
Figure (III.11) : Le coefficient de puissance C_p	54
Figure (III.12) : Le rapport de vitesse λ	54
Figure (III.13) : Spectres de courant statorique	54
Figure (III.14) : Réponses du flux du rotor dans le repère alpha-bêta	55

Symbole	Signification	Unité
C_p	Coefficient de puissance	
C_e	Couple électromagnétique	$N.m$
C_{mec}	Le couple mécanique, ce dernier prend en compte	$N.m$
C_{vis}	Couple visqueux	$N.m$
C_r	Couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
J	Moment d'inertie des parties tournantes	$Kg.m^2$
J_t	Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne	
f	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m.s/rad$
G	Rapport de vitesse du multiplicateur	
K_p, K_i	Gains du régulateur PI classique	
M	Inductance magnétisante	H
M_{sr}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	Inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	Inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_s	Puissance active statorique	W
P_v	Puissance portée par le vent	W
$P_{rés}$	Puissance du réseau	W
Q_s	Puissance réactive statorique	VAR
R	Rayon de la turbine	M
R_s	Résistance statorique	Ω

R_r	Résistance rotorique	Ω
L_S	Inductances propres statoriques	H
L_r	Inductances propres rotoriques	H
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	M
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	W
i_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
v_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques	A
v_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
p	Nombre de paires de pôles	
s	Opérateur de Laplace	
v_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
v_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
β	Angle de calage des pales	$^\circ$
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor	rad/s
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rad/s
Ω_{ref}	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rad/s
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine	rad/s

θ_s	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique .	<i>rad</i>
θ_r	Position du stator	<i>rad</i>
Λ	Position électrique du rotor	<i>rad</i>
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	<i>rad/s</i>
ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	<i>rad/s</i>
ω_s	Pulsation des courants statoriques	<i>rad/s</i>
ϕ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	<i>Wb</i>
ϕ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	<i>Wb</i>
ϕ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q)	<i>Wb</i>
ϕ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q)	<i>Wb</i>
PI	Proportionnelle intégrale	
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe	
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$MADA$	Machine Asynchrone à Double Alimentation	
MPC	Model Predictive Control	
GPC	Green Power Company	
$GADA$	Générateur Asynchrone à Double Alimentation	
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions	
$MPPT$	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale	
V_{rot}	représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur	
V	vecteur	
$\overrightarrow{V_{\text{res}}}$	La résultante de ces deux vecteurs est appelée	
$\overrightarrow{F_{\text{res}}}$	L'action du vent sur la pale produit une force	
$\overrightarrow{F_{\text{ax}}}$	se décompose en une poussée axiale	

F_{rot}	une poussée en direction de la rotation
λ	Vitesse spécifique
$s_{a,b,c}$	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien
P_{mT}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
E	La puissance éolienne instantanée
V_1 et V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
W_{gl}	la vitesse angulaire de glissement
W_r	la vitesse avec laquelle le rotor tourne
W_g	la vitesse de glissement
R_a, R_b, R_c	Trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaires à celles du stator
S_a, S_b, S_c	Trois bobines statoriques
R :	Longueur de pales
Ω_t :	Vitesse de la turbine.
V_{vent}	Vitesse du vent (m/s)
T_{e*}	couple de référence
T_e	couple estimé
ϕ_{r*}	flux rotorique de référence
ϕ_r	flux rotorique estimé
λ	facteur de pondération

Introduction

générale

Introduction générale

La production d'électricité à partir de sources conventionnelles contribue de manière importante aux émissions de gaz à effet de serre et aux impacts environnementaux associés à la production énergétique, dans ce contexte, le développement des énergies renouvelables, notamment de l'énergie éolienne, constitue une voie importante vers une production d'électricité plus durable, les progrès technologiques réalisés dans ce domaine visent à concevoir des éoliennes plus performantes, capables d'exploiter efficacement l'énergie disponible dans le vent, parmi les différentes technologies de conversion de l'énergie éolienne, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) occupe une place importante dans les systèmes éoliens à vitesse variable, sa structure permet de contrôler la puissance active et réactive tout en utilisant un convertisseur de puissance nominale réduite par rapport à la puissance totale de la génératrice, le choix d'une stratégie de commande appropriée constitue ainsi un enjeu essentiel pour améliorer les performances dynamiques et énergétiques du système, dans ce contexte, ce travail porte sur la modélisation et la commande d'un système éolien basé sur une GADA, avec un intérêt particulier pour la commande prédictive du couple et du flux rotorique [1].

Le premier chapitre présente les généralités sur l'énergie éolienne, les principales architectures des systèmes de conversion éolienne ainsi que les différentes technologies de génératrices utilisées. Une attention particulière est accordée à la GADA et à son intégration dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, La commande vectorielle est ensuite étudiée afin d'assurer le réglage des puissances active et réactive échangées entre la génératrice et le réseau.

Le troisième chapitre présente l'étude et la mise en œuvre de la commande prédictive du couple et du flux rotorique (PTC), cette stratégie vise à améliorer la réponse dynamique de la GADA et à assurer un suivi précis du couple, du flux rotorique ainsi que des puissances active et réactive. Les performances de la commande proposée sont évaluées par simulation sous MATLAB/Simulink dans différentes conditions de fonctionnement.

Les énergies éoliennes à vitesse variable

I.1.Introduction:

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle. Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne, énergie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Cette force peut être utilisée mécaniquement pour produire de l'électricité. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur [1].

Ce chapitre fera une présentation générale des différents types d'éoliennes, leur fonctionnement et conception ainsi que leurs avantages et inconvénients. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux différentes machines électriques et plus spécifiquement la GADA (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation). On parle de parc éolien ou de ferme éolienne pour décrire des unités groupées pour la production d'énergie électrique. Ces unités peuvent être installées sur terre ou en mer. Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

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

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail. Historiquement, en 1888 Charles F. Brush a construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (il y a environ 3000

ans), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du XIXe siècle). La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité a été mise au point par le Danois Poul la Cour en 1890 pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il a créé l'éolienne Lykkegaard, dont il a vendu soixante-douze exemplaires en 1908.

I.3.Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Le SCE (Système de Conversion Éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique[2].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée), de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

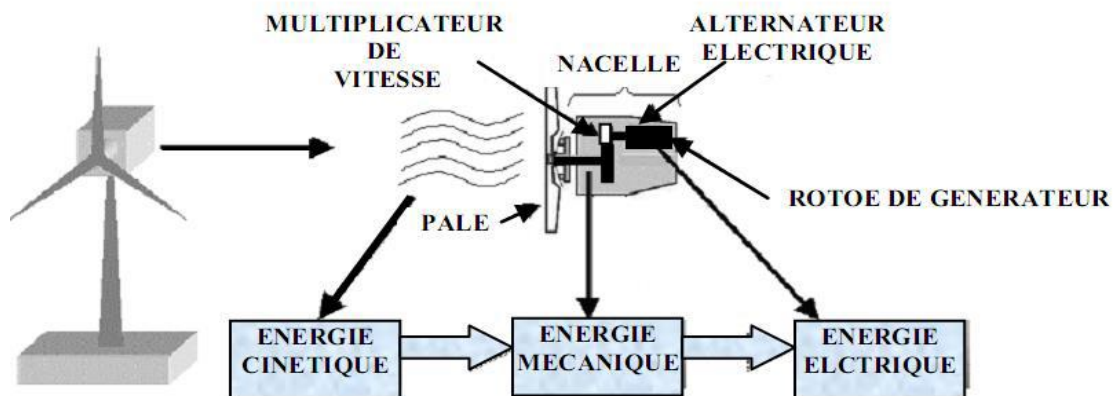


Figure (I.1) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne[3]

I.4. Constitution d'une éolienne :

I.4.1. Principe :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes : au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc y avoir une conversion et transmission régulière de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

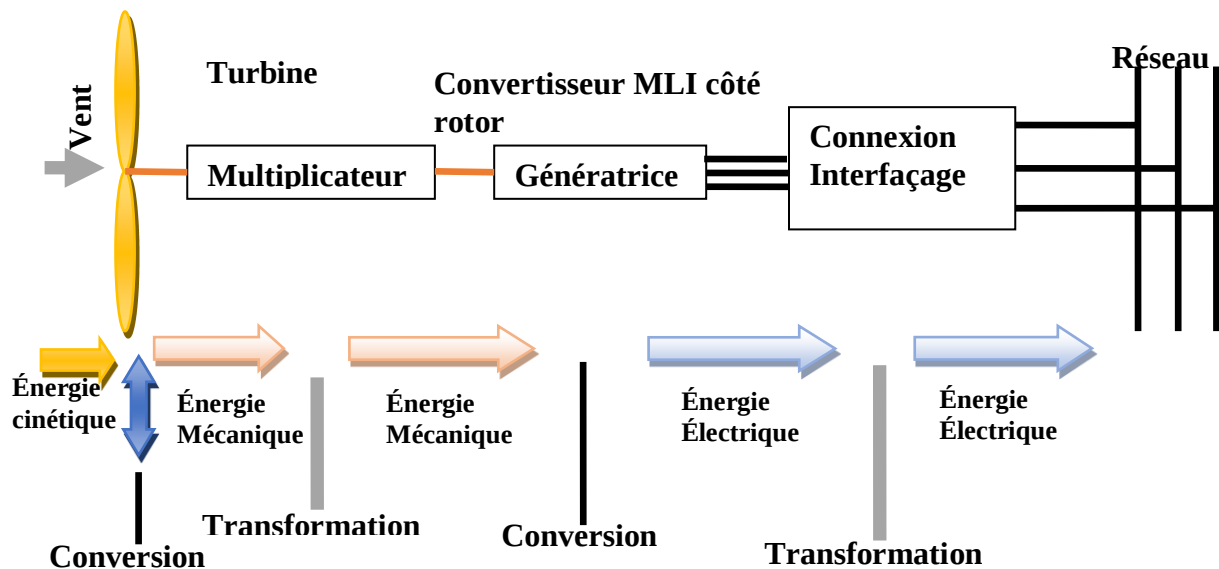


Figure (I.2) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne[3]

I.4.2. Constitution et Fonctionnement d'une éolienne:

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure(I.4) Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- Le mât: Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 100 m de hauteur)[4].

- Le rotor :Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [4].

- La nacelle :Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I-2) : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [4].

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

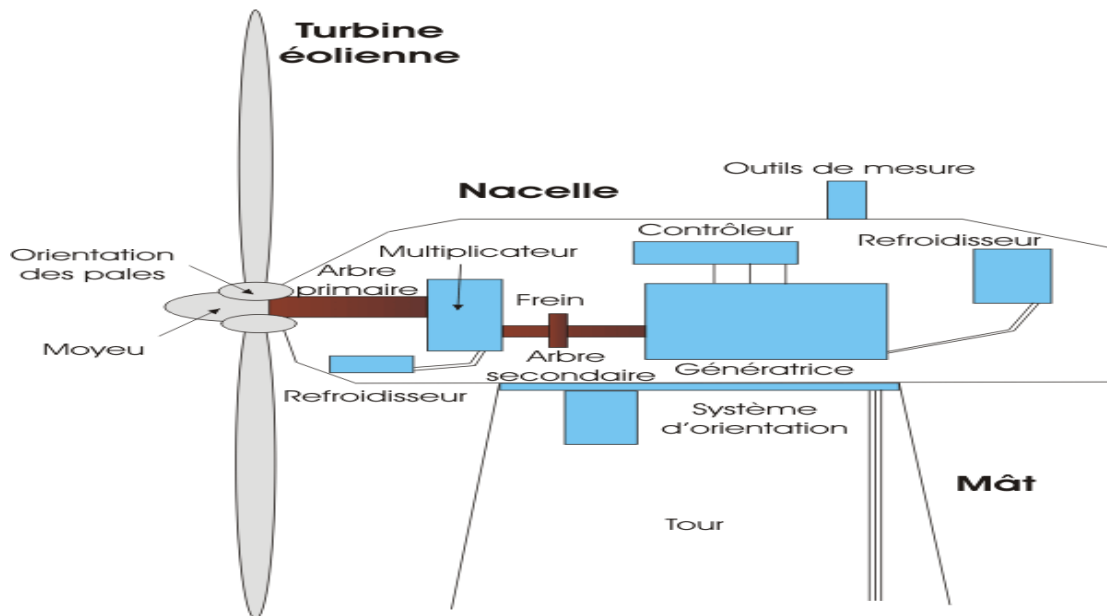


Figure (I.3) : Principaux composants d'une éolienne[4]

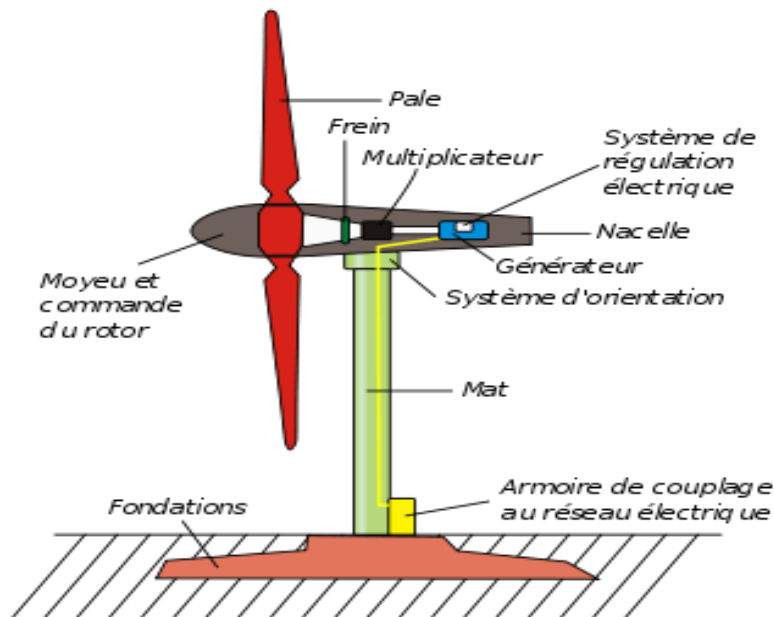


Figure (I.4) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur.

I.5. Les types d'éolienne:

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

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

I.5.1. Éoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mât qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [5].

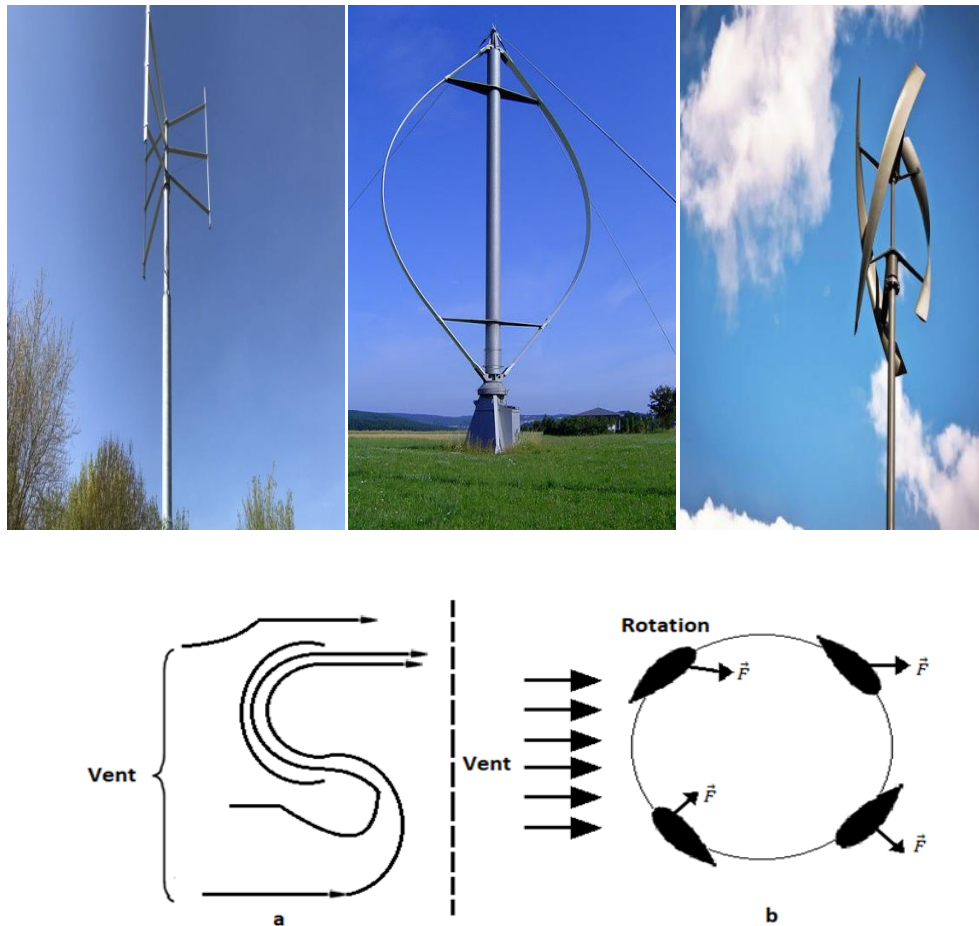


Figure (I.5) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable[5]

I.5.2.Éoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal plus largement employées nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [6].

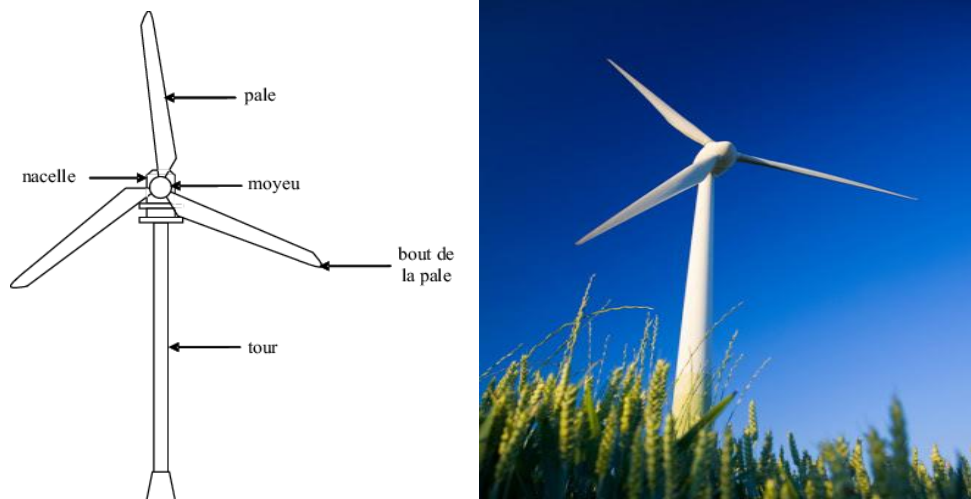


Figure (I.6) : Éolienne à axe horizontal [6]

I.6.Stratégies de fonctionnement d'une éolienne:

I.6.1.Bilan des forces sur une pale:

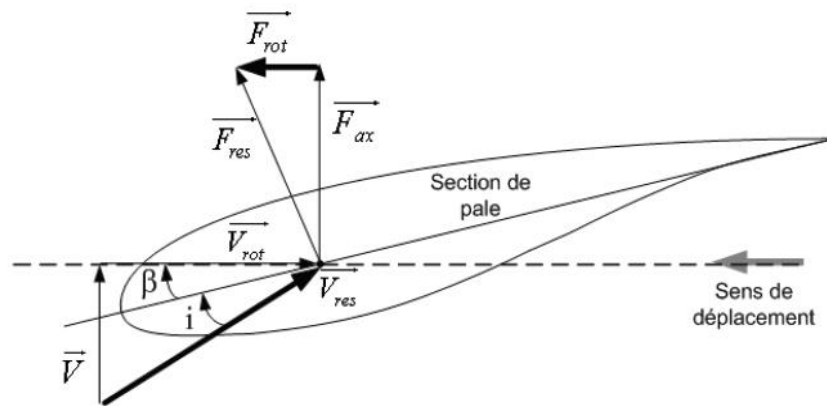


Figure (I.7) : Bilan des forces sur une pale[6]

La Figure (I.7) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [6]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur $\vec{V}_{rot}$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{res}$. L'action du vent sur la pale produit une force $\vec{F}_{res}$ qui se décompose en une poussée axiale $\vec{F}_{ax}$ directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée en direction de la rotation $\vec{F}_{rot}$ qui produit

effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

I.6.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne:

I.6.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall":

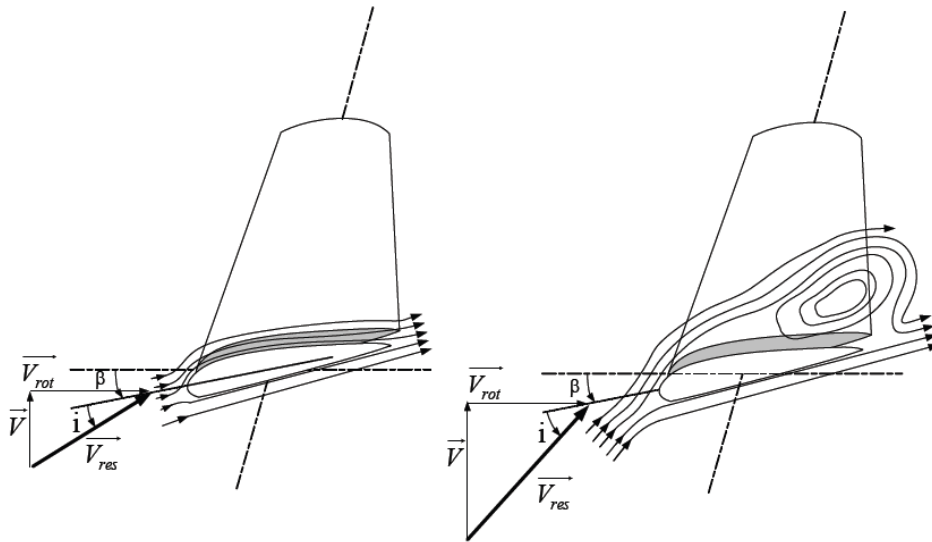


Figure (I.8) : Flux d'air sur un profil de pale "stall".

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure (I.8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fourni par l'éolienne est ainsi moins importante [6].

I.6.2.2. Système d'orientation des pales "pitch":

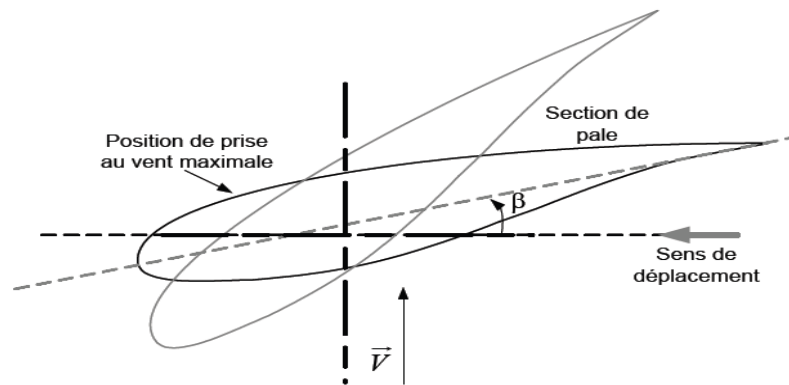


Figure (I.9) : Variation de l'angle de calage d'une pale.

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

I.7. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique:

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

Comme on l'a indiqué sur la figure(I.10), ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance.

Ce coût dépend de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille.

De plus, les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les Transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) diminuent à partir d'une certaine puissance, avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné.

La plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor.

Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des machines asynchrones à double alimentation (GADA). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans ce mémoire [7].

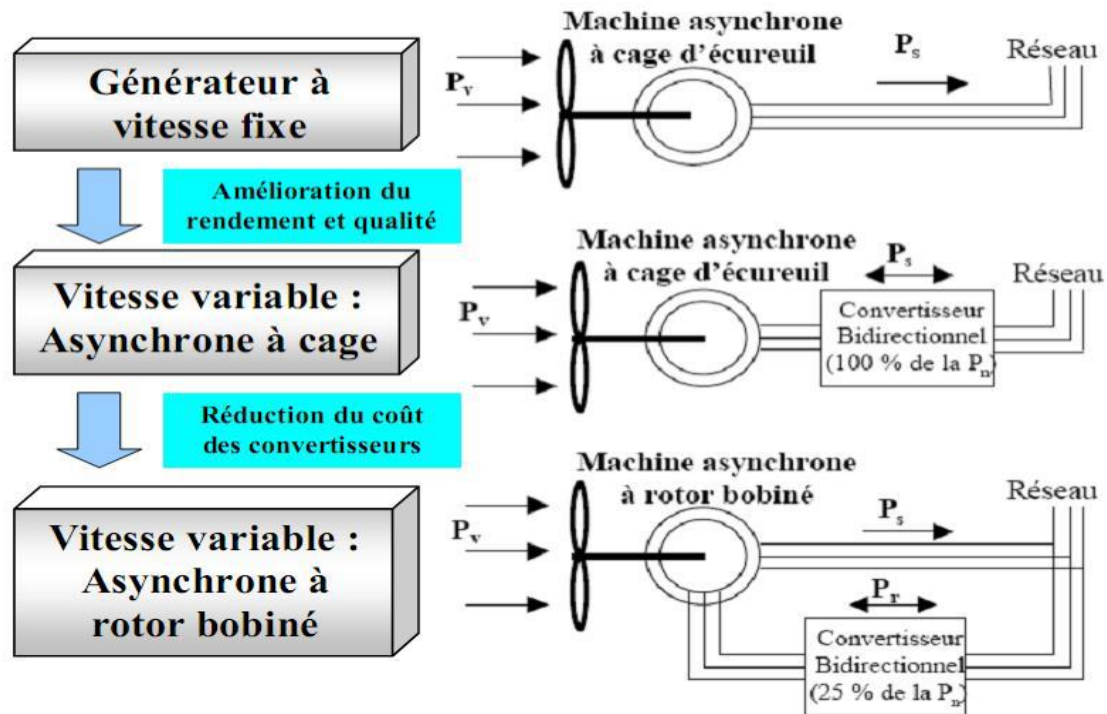


Figure (I.10) : Évolution de la configuration électrique[7]

I.7.1.Éoliennes à Vitesse Fixe:

Dans le premier cas, Figure (I.11), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seuls les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles, et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [7].

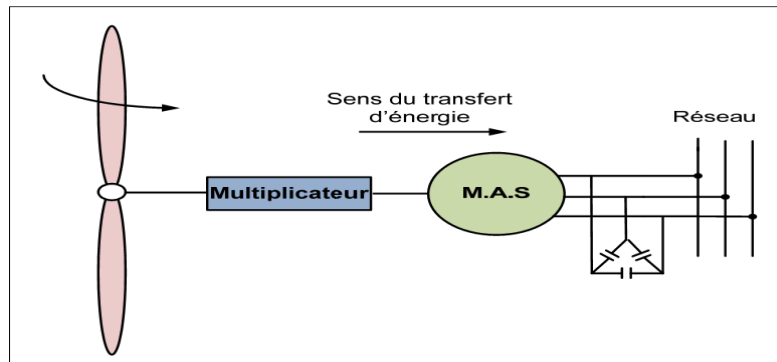


Figure (I.11) : Éolienne à vitesse fixe basée sur la machine asynchrone à cage[7]

I.7.2.Éoliennes à Vitesse Variable:

Dans le deuxième cas, Figure (I.12), une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique[7].

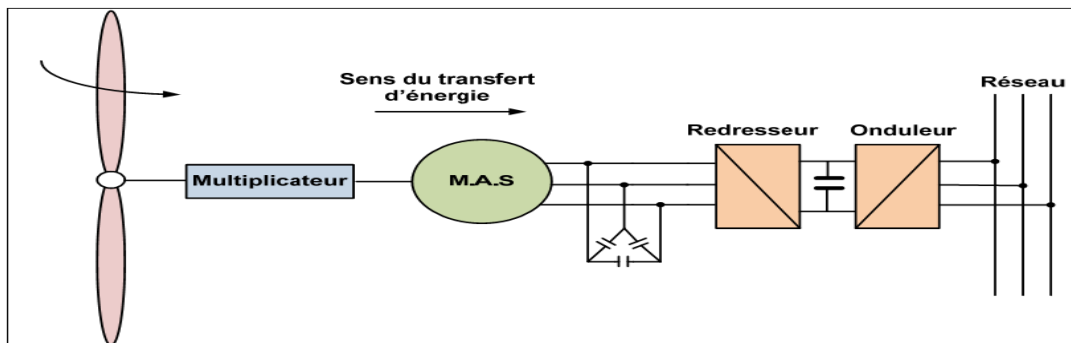


Figure (I.12) : Éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage

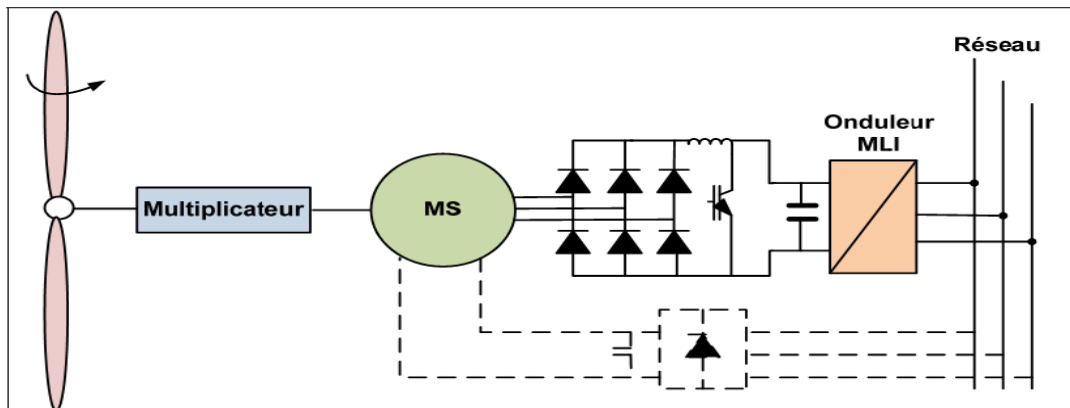


Figure (I.13) : Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

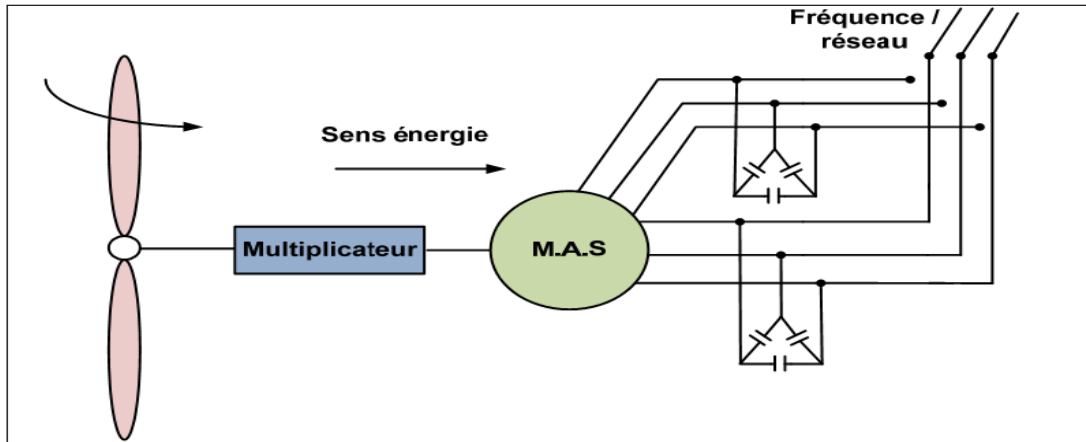


Figure (I.14) : Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator[8]

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la figure (I.14). À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

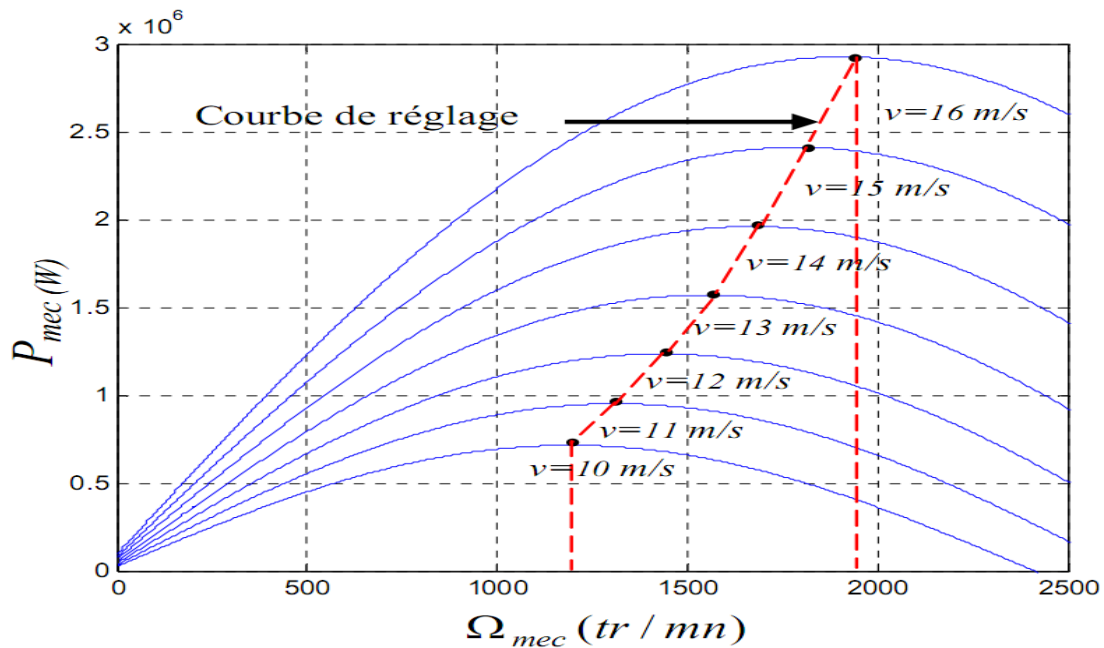


Figure (I.15) : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne[8]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la figure (I.15) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [8].

I.7.3.Éolienne à vitesse variable à base de la GADA (structure de Scherbius avec convertisseurs MLI):

Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (Convertisseur côté GADA et convertisseur côté réseau), Figure(I.16).

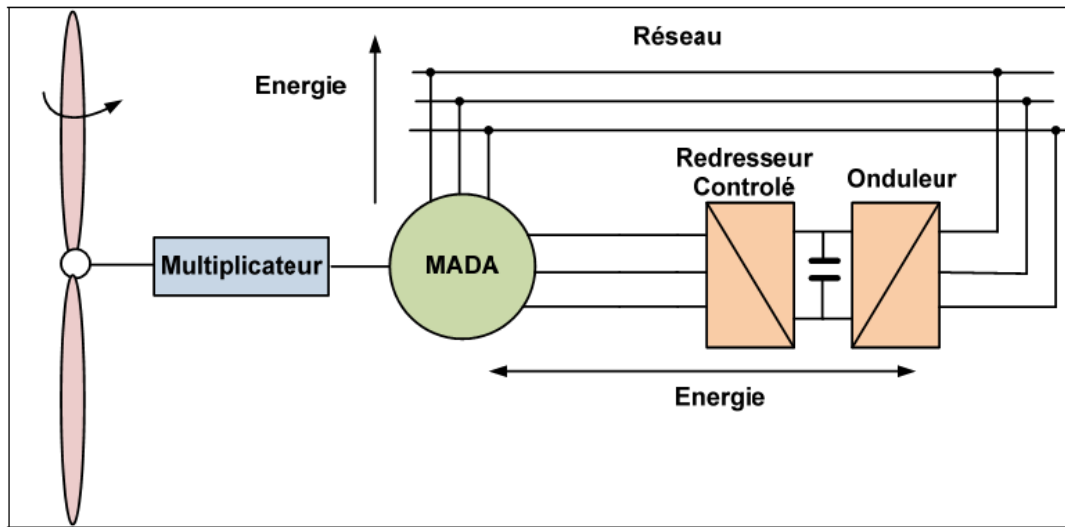


Figure (I.16) : Éolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

I.8.Énergie disponible dans le vent:

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = 0,5 m v^2 \quad (I.1)$$

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un

dispositif ayant la surface A , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (I.2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$).

I.8.1 Le coefficient de puissance C_p :

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

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (I.3)$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine n et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ : $C_p = C_p(\lambda)$ Avec :

$$\lambda = R\Omega / v \quad (I.4)$$

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

I.8.2 Théorie de Betz:

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure(I.17) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

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

$$P_m = \frac{\rho A (V_1 + V_2)}{2} \quad (I.5)$$

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) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I.6)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.5) :

$$P_m = \frac{\rho A (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.7})$$

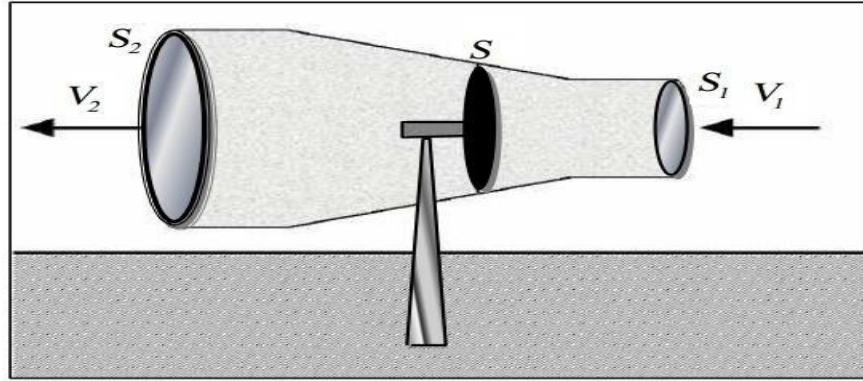


Figure (I.17) : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{mT} = \frac{\rho A V_1^3}{2} \quad (\text{I.8})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mT}} = \frac{1}{4} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \quad (\text{I.9})$$

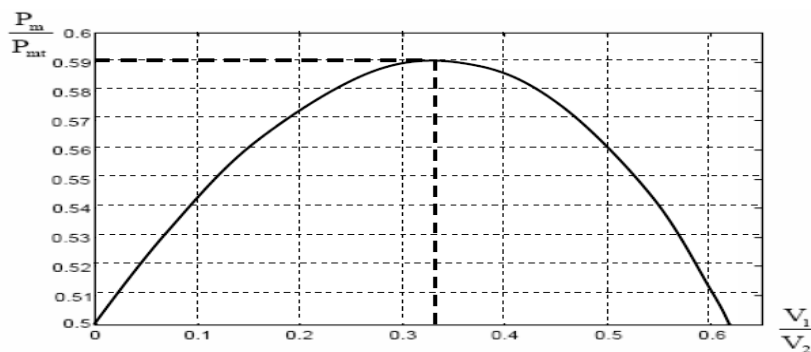


Figure (I.18) : Coefficient de puissance.

I.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens:

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

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

I.9.1.Systèmes non couplés au réseau alternatif:

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [8].

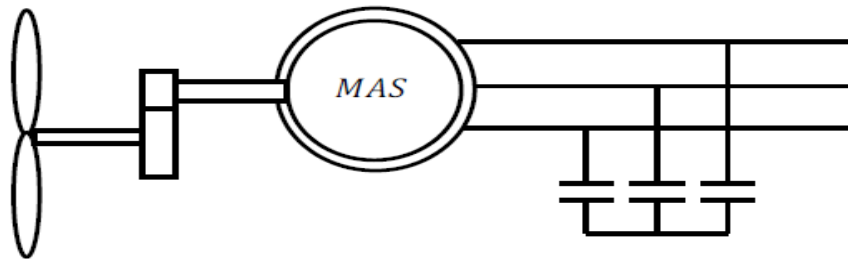


Figure (I.19) : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

I.9.2. Systèmes couplés au réseau alternatif:

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [8].

I.9.2.1.Machine synchrone :

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées

lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance figure(I.20)[9].

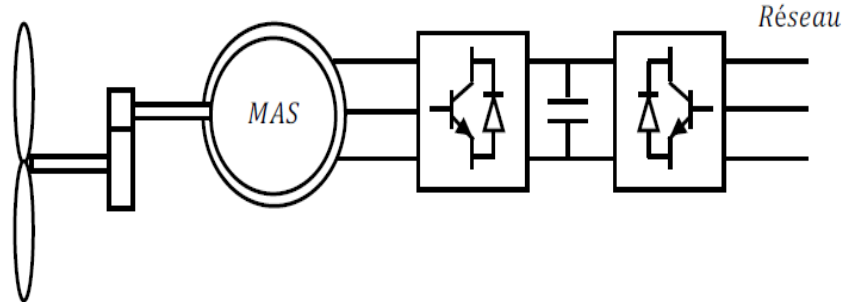


Figure (I.20) : Système éolien à vitesse variable basé sur une machine synchrone avec convertisseur de puissance[9]

I.9.2.2.Machine asynchrone à double alimentation:

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

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

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

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

A. Contrôle de glissement par dissipation de l'énergie rotorique:

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé figure(I.21). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.

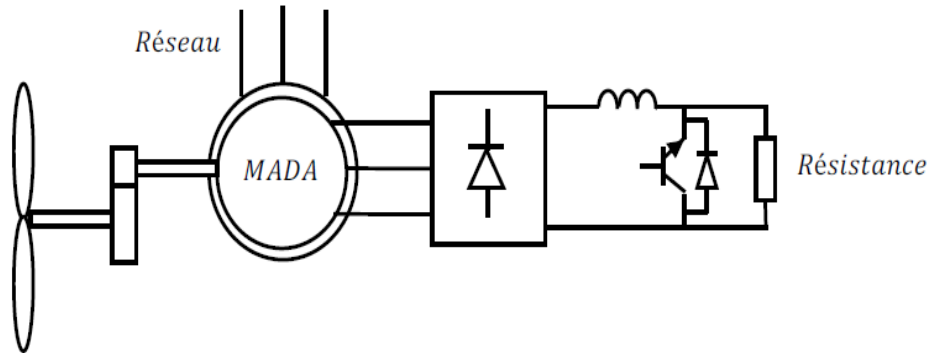


Figure (I.21) : Contrôle de glissement par l'énergie dissipée[9].

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

B. Transfert de la puissance rotorique sur le réseau:

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. On peut utiliser pour cette récupération un système statique de conversion d'énergie constitué par un convertisseur de puissance [9].

Ce convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25 % de la puissance nominale) pour un glissement maximal correspondant à la puissance statorique nominale. Pratiquement, plusieurs solutions sont envisageables.

B.1.Structure à base de pont à diodes et pont à thyristors:

Cette structure est appelée montage de Kramer. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes, un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de

faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone figure(I.22).

Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

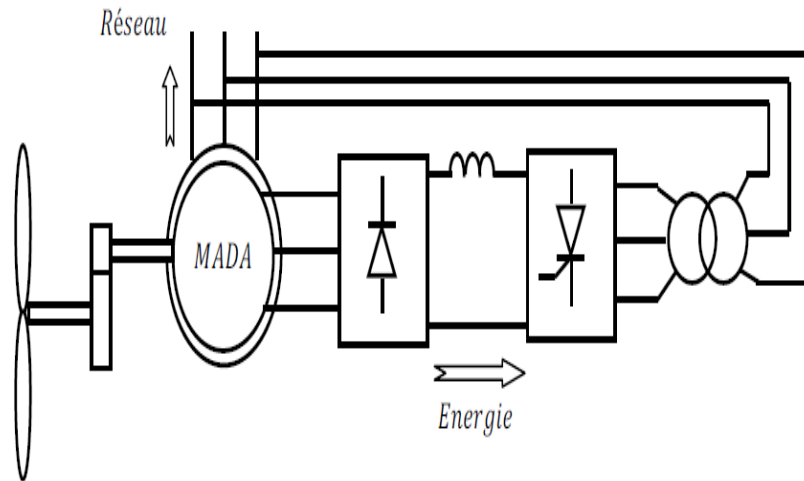


Figure (I.22) : Structure de Kramer pour la GADA.

B.2.Structure à base de pont à diodes et pont à transistors:

La structure consiste à remplacer l'onduleur à commutation naturelle constitué de thyristors, par un onduleur à commutation forcée et à modulation de largeur d'impulsions (MLI), constitué par des transistors de puissance figure(I.23). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont à diodes. Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tensions importantes qui peuvent réduire leur durée de vie [9].

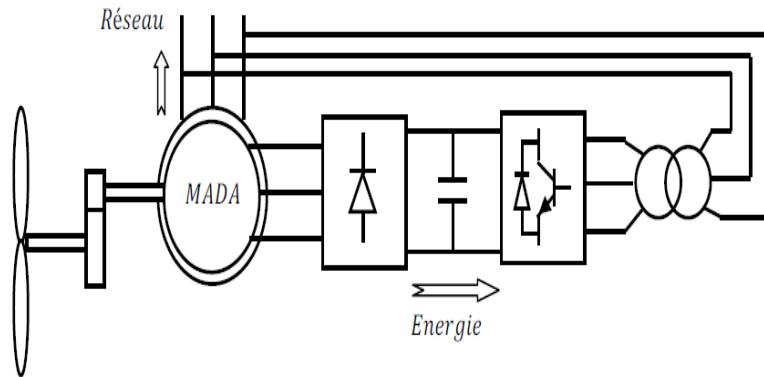


Figure (I.23) : Structure avec deux ponts à diodes et à transistors.

B.3. Structure à base de cycloconvertisseur:

Cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans deux sens. Cette topologie présente donc plus de marge de manœuvre pour la commande figure(I.24).

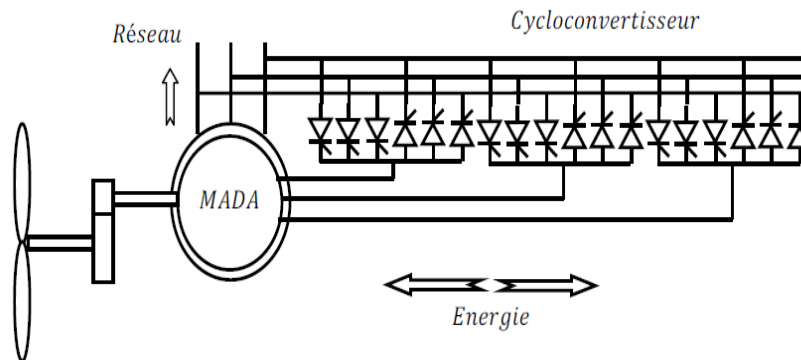


Figure (I.24) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

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

B.4. Structure à base de convertisseur à MLI:

Une autre structure intéressante figure(I.25) utilise deux ponts triphasés à IGBT

commandés par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau

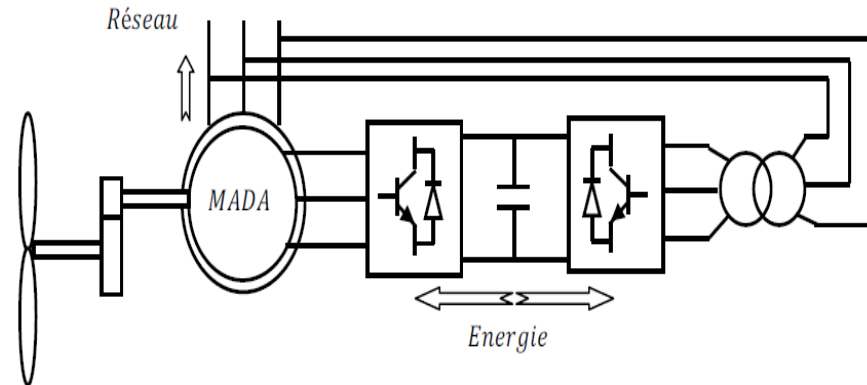


Figure (I.25) : Structure avec convertisseurs à MLI.

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

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

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

I.10.Fonctionnement à vitesse variable:

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes

d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) figure(I.26)[8].

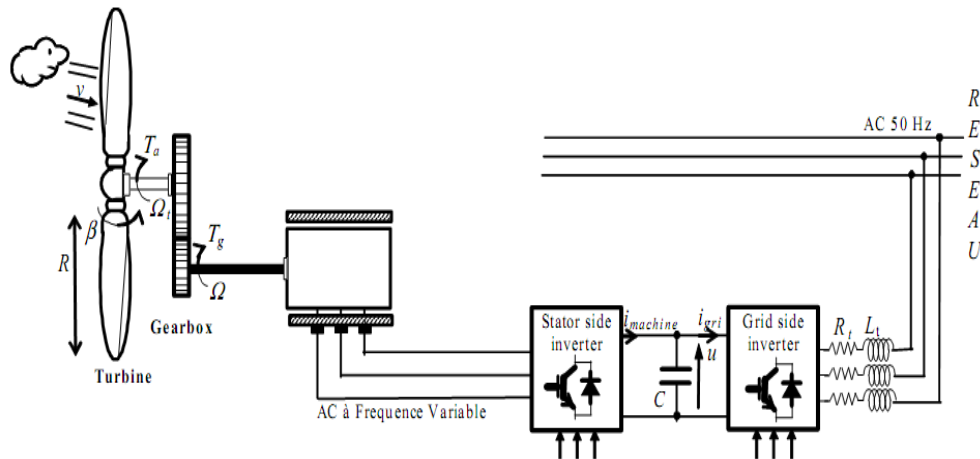


Figure (I.26) : Aérogénérateur à vitesse variable[8]

I.11.Zones de fonctionnement d'une éolienne:

La figure (I.27) montre les zones de fonctionnement caractéristiques mesurées sur une éolienne de 1.5 MW [16] [17] [18].

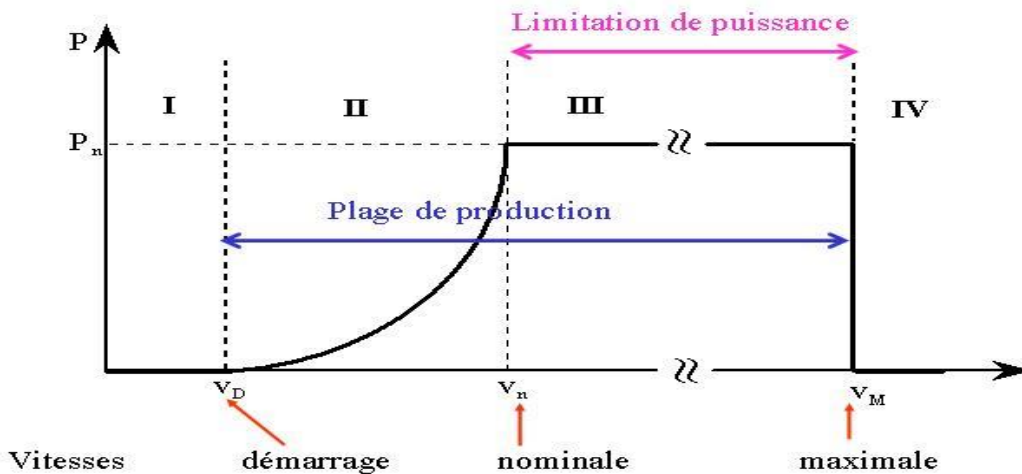


Figure (I.27) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable[10]

Il existe quatre zones de fonctionnement des éoliennes suivant la vitesse du vent

Zone 1: ($V > V_1$) cette zone correspond au démarrage de la turbine avec une vitesse du vent très faible. L'énergie captée par la turbine dans cette zone est assez faible.

- ❖ V_1 : vitesse du vent correspond au démarrage de la turbine.
- ❖ V_1 : varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

Zone 2: ($V_1 > V > V_2$) est la zone d'extraction maximale de la puissance (MPPT: maximum power point tracking). Elle correspond au fonctionnement à charge partielle (CP). Dans cette zone l'angle de calage des pales reste constant afin d'obtenir un β maximal ainsi la puissance maximale est captée pour chaque vitesse du vent [10] [11].

- ❖ V_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, (V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s).

Zone 3: ($V_2 > V > V_3$): elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (PC).

- ❖ V_3 vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

Zone 4 : la vitesse du vent devient trop forte, les pales sont en position drapeau (Arrêt) et la puissance extraite devient nulle.

I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

I.12.1. Avantages:

- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [9].
- ✓ L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gaz. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont les responsables des pluies acides.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Elle ne nécessite aucun carburant.

- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier[2].

I.12.2.Inconvénients:

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

- ✓ Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- ✓ L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [2].
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.

I.13.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives aux systèmes éoliens ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous avons également rappelé les concepts nécessaires à la compréhension des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et présenté les principaux types d'éoliennes.

Pour les systèmes éoliens raccordés au réseau électrique, il est essentiel que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable afin d'exploiter efficacement l'énergie disponible dans le vent. Par ailleurs, l'utilisation d'un convertisseur de puissance entre la génératrice et le réseau peut entraîner des pertes supplémentaires et affecter le rendement global de l'installation. Ces considérations justifient l'intérêt porté aux architectures de conversion à vitesse variable et, en particulier, aux systèmes basés sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Modélisation et commande vectorielle de la GADA

II.1.Introduction:

Ce chapitre étudie la commande du convertisseur côté rotor d'une génératrice asynchrone à double alimentation connectée au réseau. Il présente le fonctionnement de la GADA, sa modélisation mathématique et sa représentation dans le repère dq à l'aide de la transformation de Park. La commande vectorielle orientée selon le flux statorique est ensuite adoptée afin de découpler et de contrôler les puissances active et réactive. Enfin, les performances de la stratégie proposée sont évaluées par des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink.

II.2.Description de la GADA:

La GADA a une double accessibilité au stator et au rotor, dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor.

Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif, ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative"[10].

II.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $W_s = 2\pi f$ et le rotor tourne avec la vitesse W_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse W_{gl} telle que [10]:

$$W_{gl} = W_s - W_r \quad (II. 1)$$

Où : g est le glissement et W_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est

supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [11].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $W_{gl} = 2\pi f_{ro}$.

C'est-à-dire:

$$f_{ro} = |s| f_g \quad (II.2)$$

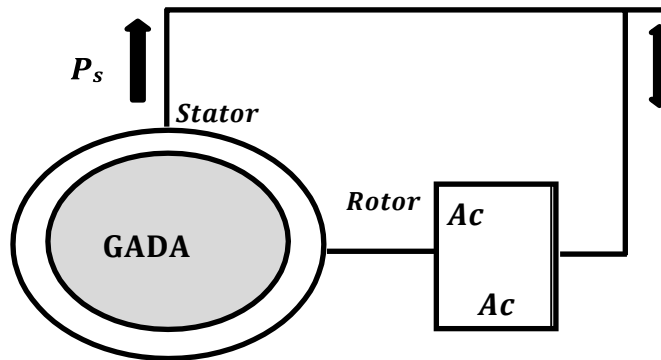


Figure (II.1) : Modes de fonctionnement de la GADA[11]

II.4.Constitution de la GADA:

La GADA, installée dans la nacelle de l'éolienne et entraînée mécaniquement, possède un stator directement connecté au réseau triphasé. Son rotor bobiné est relié à des convertisseurs bidirectionnels, permettant l'échange de puissance avec le réseau selon le régime de fonctionnement. Ces convertisseurs sont reliés par un bus continu, tandis qu'un transformateur élévateur assure le raccordement au réseau de distribution[11].

Réseaux triphasé

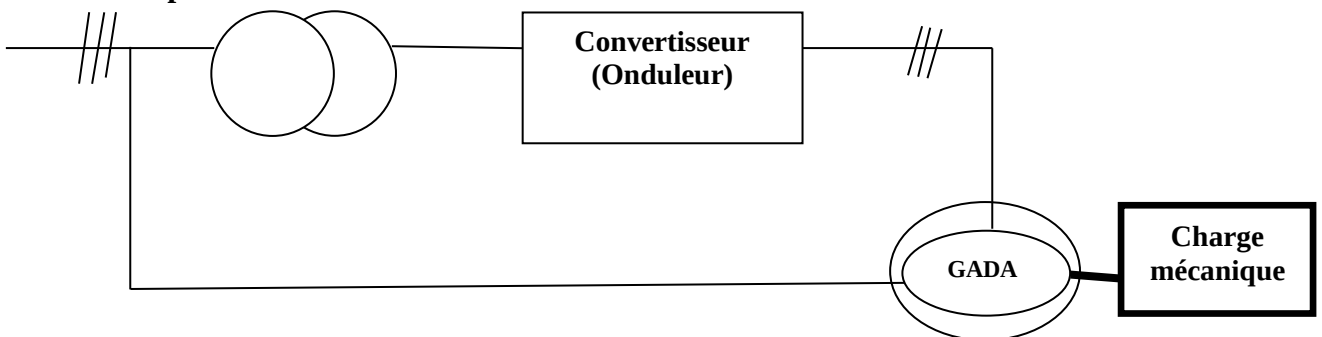


Figure (II.2) : Schéma général d'un système utilisant une GADA alimentée par un seul convertisseur statique[11]

II.5. Structure de la machine :

La GADA possède un stator similaire à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. Son rotor est constitué d'enroulements triphasés, contrairement au rotor à cage ou à aimants permanents. Ces enroulements sont connectés en étoile et reliés à des bagues collectrices et à des balais, permettant l'accès aux tensions et aux courants rotoriques[12].

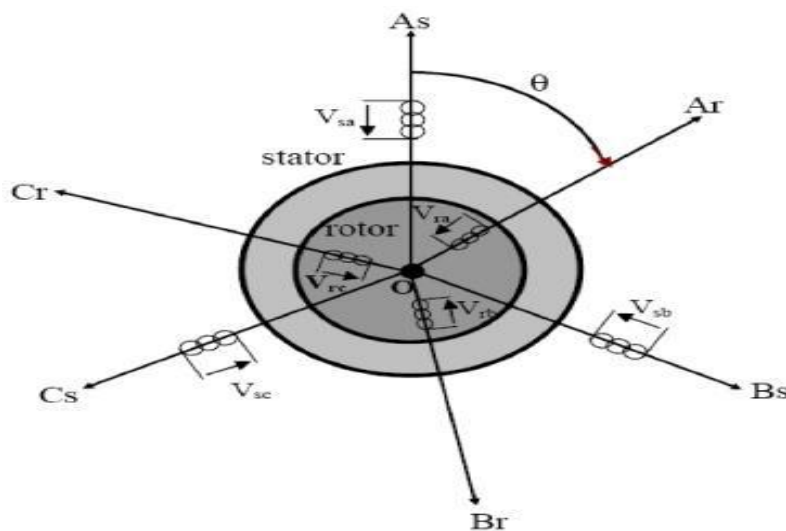


Figure (II.3) : Structure de la machine GADA.

II.6. Domaines d'application de la GADA:

La GADA offre une large plage de vitesse de fonctionnement, une puissance adaptable et une commande flexible. Elle est principalement utilisée dans les systèmes à vitesse variable et à fréquence constante, notamment pour la production d'électricité éolienne et hydraulique. Elle trouve également des applications dans les domaines aéronautique et naval, ainsi que dans l'entraînement des ventilateurs et des pompes à eau[12].

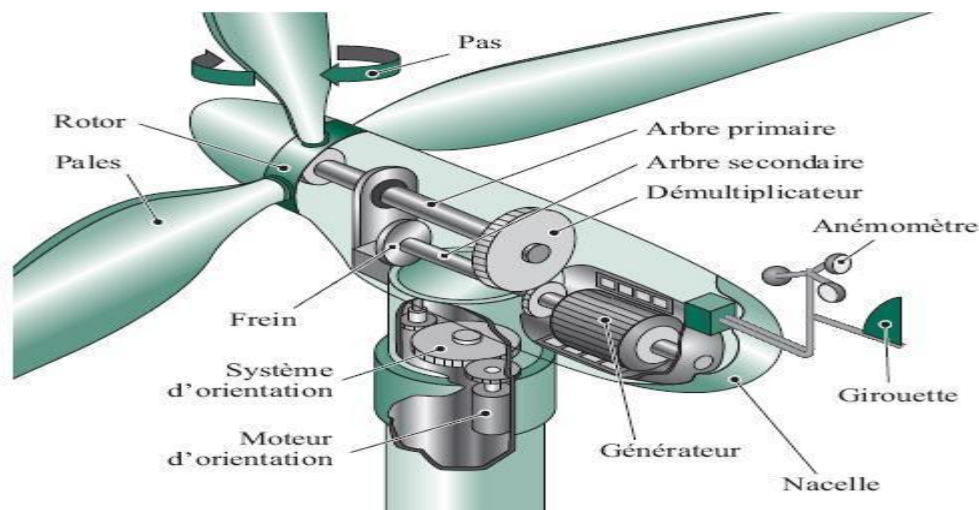


Figure (II.4) : Éolienne installée en mer[12]

Les turbines éoliennes peuvent atteindre des puissances importantes, jusqu'à environ 4,5 MW, notamment dans les installations offshore où les vents sont plus forts.

L'étude bibliographique met en évidence l'utilisation d'un système d'alimentation basé sur un convertisseur alternatif-alternatif, tel qu'un cycloconvertisseur, pour assurer leur fonctionnement.

II.7. Modes de fonctionnement de la GADA:

Comme la machine asynchrone classique, la GADA, permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur, effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur, ici, 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 hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [12] :

II.7.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

La puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

II.7.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor.

II.7.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone:

La puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau, la machine asynchrone peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor.

II.7.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone:

La puissance est fournie au réseau par le stator, la puissance de glissement est aussi fournie par le stator, la machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [13].

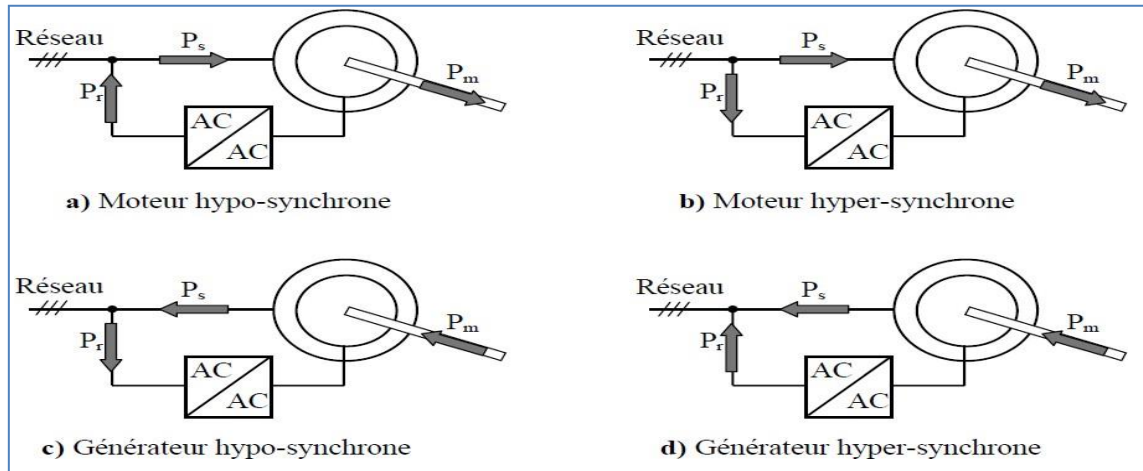


Figure (II.5) : Modes opérationnels caractéristiques de la GADA[13]

➤ Avantages de la GADA:

L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la

machine.

Dans la GADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement.

Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.

Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [13].

➤ Inconvénients de la GADA:

- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Nous utilisons un nombre de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur)[10].
- Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais.

II.8. Modélisation de la GADA:

La modélisation des machines électriques implique l'élaboration de modèles mathématiques destinés à prévoir le comportement de la machine sous divers régimes de fonctionnement, cette démarche permet d'anticiper les points susceptibles d'entraîner des perturbations.

II.8.1. Hypothèses simplificatrices:

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.

- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.
- Comportement de la machine asynchrone à double alimentation:
- Trois bobines statoriques (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.

Trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaires à celles du stator, (R_a, R_b, R_c), la figure (II.6) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).

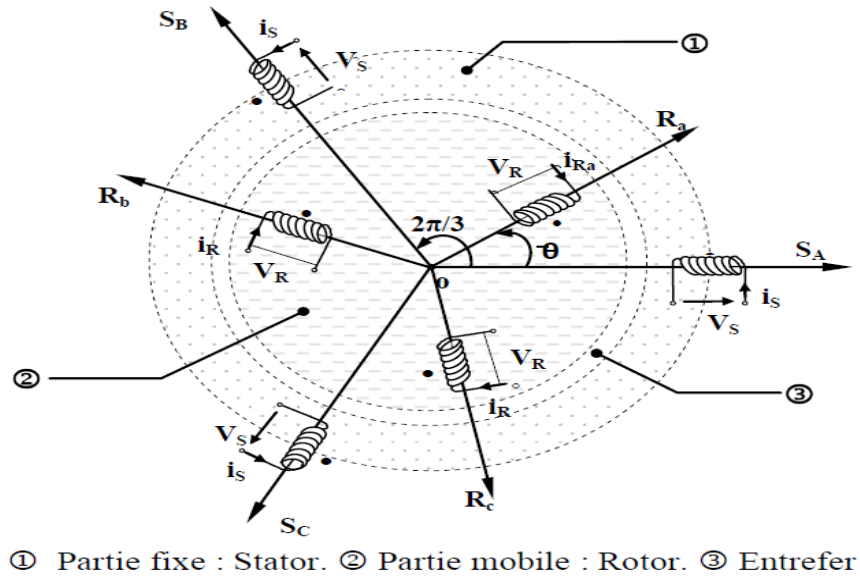


Figure (II.6) : Représentation simplifiée de la GADA[12]

II.8.2.Modèle mathématique de la GADA:

- Équations électriques:

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [21].

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

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

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

Où:

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

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

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

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

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

$$\text{Tel que : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \quad \text{Et: } [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M & M \\ M & L_r & M \\ M & M & L_r \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

- **Équations mécaniques:**

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

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

L'établissement de ces équations conduit à des équations différentielles à coefficients variables, comme exprimé par les relations (II.7) et (II.8).

Cependant, l'analyse du comportement du système à partir de ces équations s'avère assez complexe en raison du nombre important de variables en jeu. Par conséquent, il est d'usage d'employer des transformations mathématiques appropriées, lesquelles permettent de reformuler le comportement de la machine sous la forme d'équations différentielles à coefficients constants, rendant ainsi l'étude analytique plus accessible.

- **Équations magnétiques:**

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

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{II. 10})$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

l_s :Sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s :Sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

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

Nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II. 13})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II. 14})$$

• Équation des tensions et équation des flux et équation du couple électromagnétique:

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - W_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + W_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (W_s - W_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (W_s - W_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II. 15)$$

- W_s : Pulsation du champ tournant d'axe (d, q)
- W_r : Pulsation électrique du rotor

Les équations des flux statoriques et rotoriques sont données comme suit:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (II. 16)$$

Après avoir effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être reformulée sous diverses formes, parmi lesquelles la suivante:

$$\begin{cases} C_e = p(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \\ C_e = p \cdot M(I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = p \cdot M(I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = \frac{p \cdot M}{L_r}(\phi_{dr} \cdot I_{qs} - \phi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (II. 17)$$

II.8.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q):

II.9.Principe de la commande vectorielle de la GADA:

la commande vectorielle rend le fonctionnement de la GADA comparable à celui d'une machine à courant continu, dans laquelle le flux et le couple sont commandés séparément. Elle permet également de maintenir une tension et une fréquence stables au stator malgré les variations de la vitesse du vent. Toutefois, les relations exactes entre ird,

ir_q, P_s et Q_s dépendent des conventions adoptées pour les axes, les signes des courants et le sens des puissances.

La commande vectorielle de la GADA repose sur la transformation des grandeurs triphasées en grandeurs diphasées dans le repère tournant (d-q). En orientant l'axe d suivant le flux statorique, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

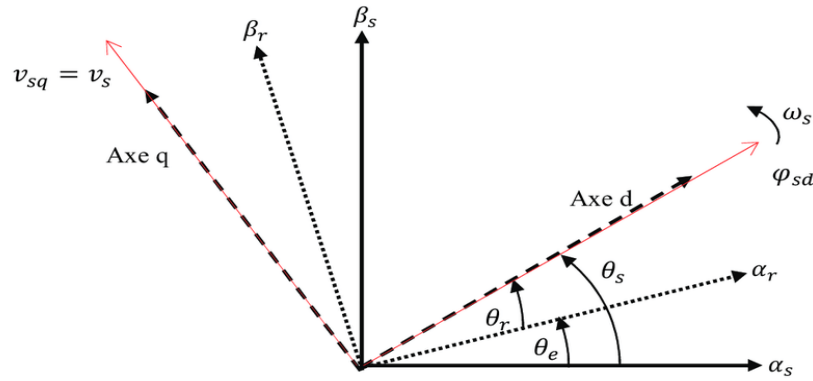


Figure (II.7) : Référentiel diphasé d q lié au champ tournant statorique[14]

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + d\varphi_{rd}/dt - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

En négligeant la résistance des enroulements statoriques, hypothèse courante pour les grandes machines, les équations de tension de la génératrice sont simplifiées.

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + d\varphi_{rd}/dt - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

À partir de l'équation de flux nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = M \cdot L_s \cdot I_{rd} - \varphi_s \cdot L_s \\ I_{sq} = M \cdot L_s \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

les puissances active et réactive statoriques de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA) peuvent être exprimées en fonction des composantes (d) et (q) des tensions et des courants statoriques comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

Dans le cadre de l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut être simplifié de la manière suivante : $V_{sd}=V_s, V_{sq}=0$

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{sq} \\ Q_s = -V_s \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot M/L_s \cdot I_{rq} \\ Q_s = V_s^2/W_s L_s - V_s \cdot M/L_s \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

Avec: $V_{sq} = V_s = W_s \cdot \varphi_s$ donc: $\varphi_s = \frac{V_s}{W_s}$

Le système d'équations obtenu montre que, sous l'hypothèse d'orientation du flux statorique, la puissance active statorique est proportionnelle à la composante en quadrature du courant rotorique (i_{qr}), tandis que la puissance réactive statorique est proportionnelle à la composante directe du courant rotorique (i_{dr}), les coefficients de proportionnalité étant déterminés par les paramètres de la machine et les conditions de fonctionnement, à partir du système d'équations (II. 20 – 21), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + \frac{V_s \cdot M}{W_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{W_s \cdot L_s} \right) - W_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + W_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{W_s \cdot L_s} \right) \end{cases} \quad (II. 27)$$

Avec : $W_r = g \cdot W_s$

Et en régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \cdot W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \cdot W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (II. 28)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient:

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right] I_{rd} - g \cdot W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right] I_{rq} + g \cdot W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (II. 29)$$

ou $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) = L_r \sigma$

Le schéma-bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimentée en tension à réguler est présenté à la Figure (II.9).

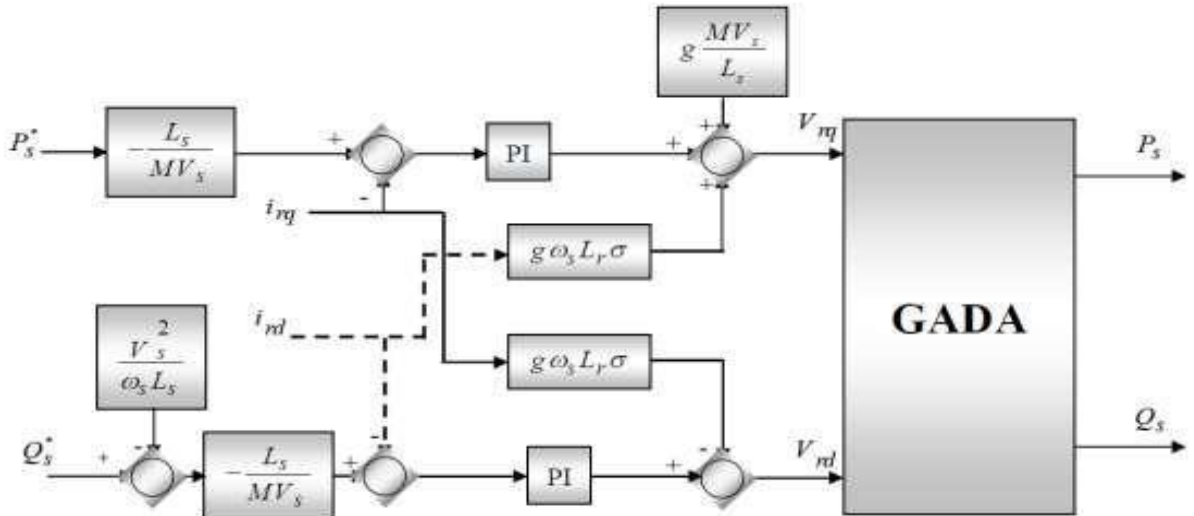


Figure (II.8) : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimentée en tension.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes, établissant la relation entre les tensions rotoriques et les puissances active et réactive statoriques. Cette représentation permet de mettre en œuvre une commande vectorielle de la GADA, en effet, grâce au découplage obtenu et à la faible influence des termes de couplage, chaque axe peut être commandé indépendamment à l'aide de son propre régulateur.

La commande vectorielle de la GADA est largement utilisée dans les applications éoliennes afin d'assurer de bonnes performances dynamiques et un contrôle efficace du couple et de la vitesse, elle nécessite une connaissance précise du flux statorique, notamment de son amplitude et de sa phase, deux principales approches sont utilisées

II.10. la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte.

➤ Commande directe :

Cette méthode repose sur la mesure directe du flux à l'aide de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Malgré son principe simple, elle présente plusieurs limitations liées au filtrage des signaux, à la sensibilité aux variations de température et au coût élevé des capteurs et des dispositifs de conditionnement. Elle est donc peu adaptée aux applications industrielles exigeant une mesure fiable et économique[12].

➤ Commande indirecte :

La commande indirecte repose sur l'estimation de la position du vecteur flux sans mesurer directement son amplitude. L'orientation du flux et le découplage des grandeurs sont obtenus à partir du modèle de la machine, tandis que l'amplitude du flux est généralement réglée en boucle ouverte. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et largement utilisée, mais elle reste sensible aux variations des paramètres de la machine. Le choix entre les commandes directe et indirecte dépend ainsi des exigences de l'application considérée [12].

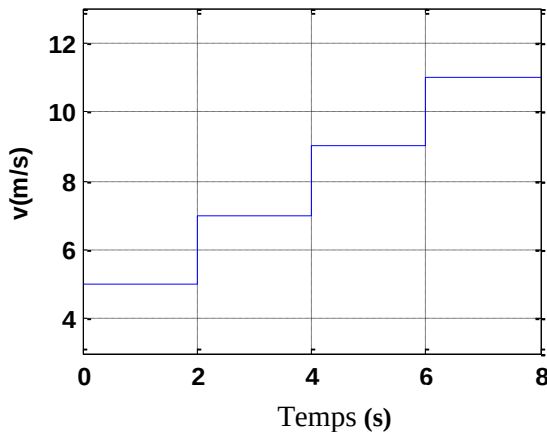
➤ régulateurs de courant et de puissance:

Les régulateurs proportionnels-intégraux (PI) sont utilisés pour assurer la régulation des puissances active et réactive ainsi que des courants rotoriques. Ils présentent plusieurs avantages, notamment une mise en œuvre simple, une bonne rapidité de réponse et des performances satisfaisantes pour le système considéré. Les gains des régulateurs PI sont

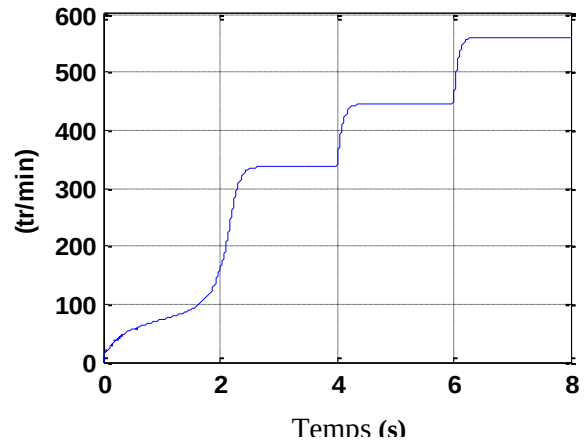
déterminés à partir du modèle du système et sont présentés en annexe. Les principales grandeurs régulées sont les puissances active et réactive statoriques ainsi que les composantes directe et en quadrature des courants rotoriques.

II.11. Résultats de simulations:

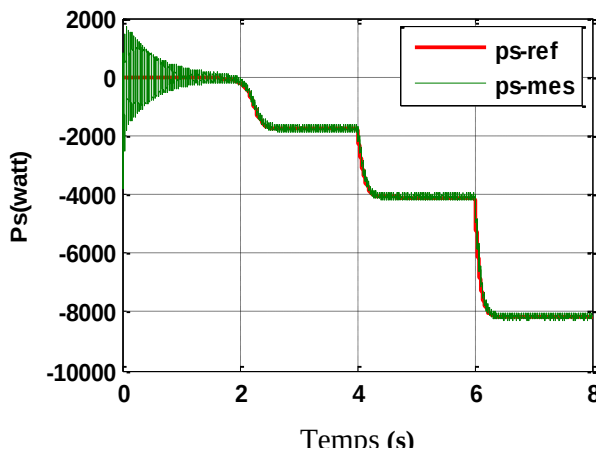
Les simulations sans commande de vitesse ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, afin de valider la commande étudiée dans ce chapitre. Différentes vitesses de vent sont appliquées aux pales de l'éolienne. La tension de référence du bus continu, notée V_{dc} . La puissance réactive de référence Q_s est fixée à 0. Nous montrons ainsi que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment les unes des autres.



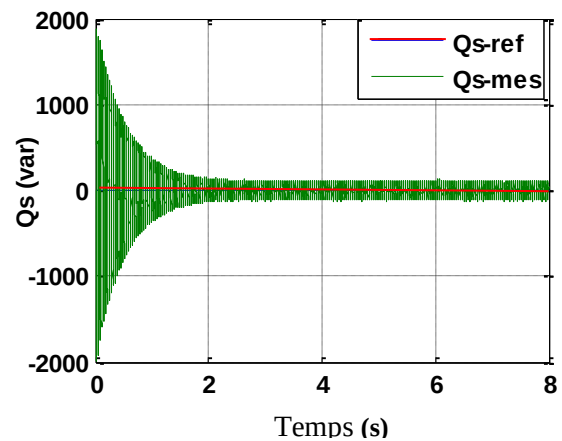
a- Vitesse du vent



b- Variation de la vitesse mécanique (tr/min)



c- Puissance active statorique



d- Puissance réactive statorique

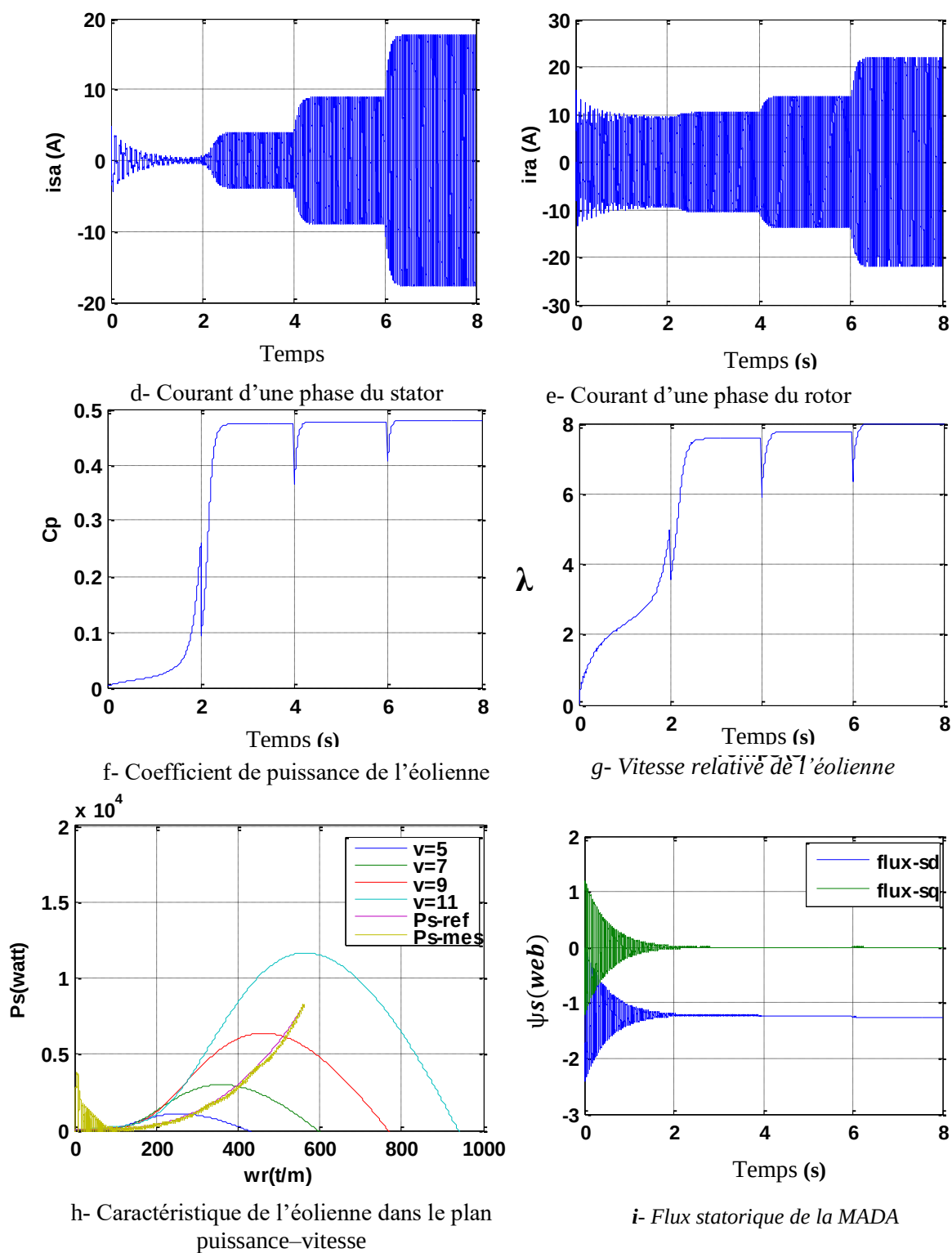


Figure II.9 : Résultats de simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.11.1. Interprétations des Résultats:

Le profil du vent appliqué est présenté dans la figure II.9-a ci-dessus. À partir des résultats obtenus pour cette application, nous pouvons formuler les remarques suivantes :

La vitesse spécifique λ et le coefficient de puissance C_p , présentés à la figure II.9, ne varient que très peu. Ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de référence optimales, soit respectivement 8,1 et 0,48.

La forme des composantes du flux statorique montre une bonne orientation du flux, garantissant une commande vectorielle bien découplée de la MADA (DFIG). La puissance réactive statorique est nulle. Il s'agit d'une condition de fonctionnement de la MADA permettant d'obtenir un facteur de puissance unitaire.

Ainsi, la variation de la puissance active produite par la MADA entraîne une variation correspondante de l'amplitude du courant statorique.

Le courant statorique présente une forme quasi sinusoïdale, ce qui traduit un bon fonctionnement de la commande vectorielle. Son amplitude augmente lorsque la vitesse du vent et, par conséquent, la puissance active produite augmentent.

la MADA injecte uniquement la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref} = 0$). Nous constatons que, durant le fonctionnement, le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau. Cela signifie que la MADA absorbe une puissance active du réseau.

Ces résultats montrent que la MADA s'adapte correctement aux variations de la vitesse du vent grâce à la commande MPPT, permettant ainsi d'extraire le maximum de puissance disponible du vent tout en assurant un fonctionnement satisfaisant du système de conversion éolienne.

II.12. Conclusion:

La commande vectorielle basée sur l'orientation du flux statorique, étudiée dans ce chapitre, permet d'assurer un découplage satisfaisant entre les puissances active et réactive de la GADA grâce à l'utilisation de régulateurs PI. Toutefois, les performances de cette stratégie dépendent notamment du réglage des régulateurs et des variations des paramètres de la machine.

Afin d'améliorer les performances dynamiques de la GADA et de répondre aux

exigences des systèmes éoliens modernes, des stratégies de commande avancées peuvent être envisagées. Parmi celles-ci, la commande prédictive constitue une approche particulièrement intéressante, car elle permet de prédire l'évolution des grandeurs électriques de la machine sur un horizon de prédiction et de sélectionner les actions de commande appropriées en fonction d'une fonction de coût.

Commande prédictive du couple et du flux rotorique d'une GADA

III.1. Introduction

Ce travail présente une analyse technique complète du contrôle prédictif du couple et du contrôle du flux du rotor des générateurs à induction à double alimentation dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.

La GADA est devenue la technologie de générateur prédominante dans les éoliennes modernes en raison de sa capacité à fonctionner efficacement à des vitesses de vent variables tout en ne nécessitant qu'une fraction de la puissance totale à traiter par des convertisseurs électroniques de puissance.

Ce chapitre examine les principes fondamentaux du fonctionnement de la GADA, la modélisation mathématique requise pour le contrôle prédictif, et l'architecture complète du PTC qui permet un contrôle précis du couple et du flux.

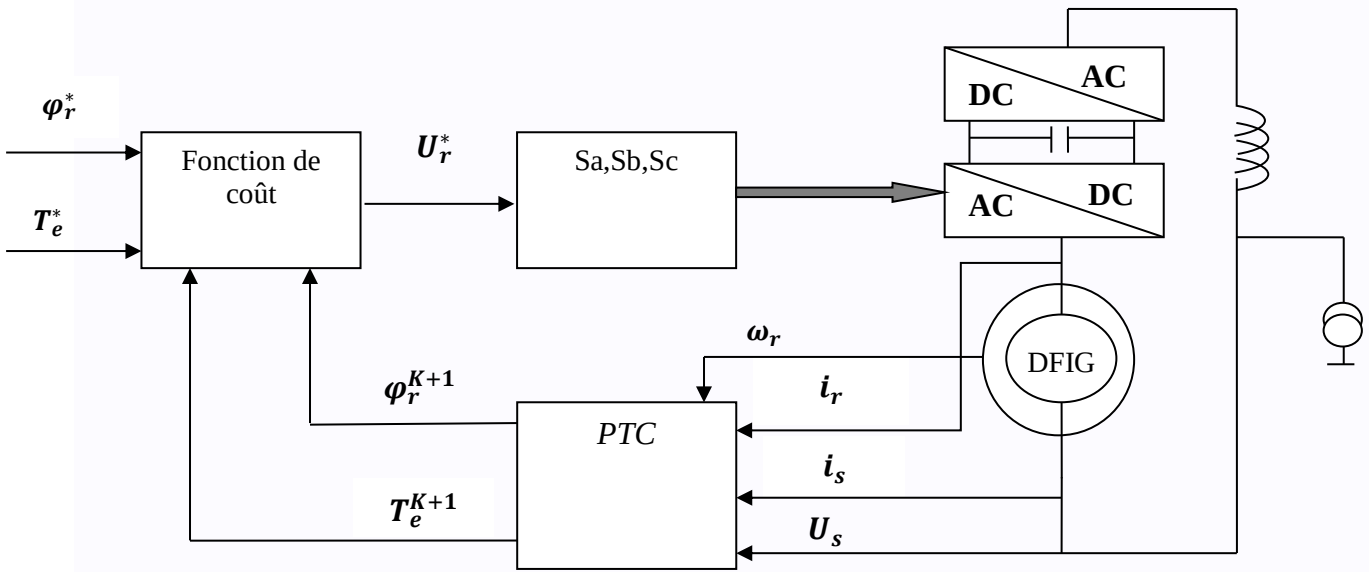


Figure (III.1) : Schéma de pilotage du PTC pour une GADA.

III.2. Modélisation mathématique de la GADA:

La description mathématique du comportement de la GADA constitue la base pour la mise en œuvre du contrôle prédictif. Le modèle est généralement développé dans le référentiel synchrone aligné avec le vecteur flux du stator, permettant un contrôle découplé de la puissance active et réactive. Les équations de tension pour les circuits du stator et du rotor dans le référentiel d-q sont exprimées comme suit [15] :

L'équation de tension du stator est donnée par :

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{sq} \\ U_{sq} &= R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{sd} \end{aligned} \quad (III.1)$$

L'équation de la tension du rotor s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} U_{rd} &= R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \\ U_{rq} &= R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \end{aligned} \quad (III.2)$$

Où U_s et U_r représentent les vecteurs d'espace de tension du stator et du rotor, R_s et R_r désignent les résistances du stator et du rotor, I_s et I_r représentent les vecteurs d'espace de courant, φ_s et φ_r sont les vecteurs d'espace de liaison de flux, et ω_s et ω_r représentent respectivement la vitesse synchrone et la vitesse mécanique du rotor.

Les équations de liaison de flux établissent la relation entre les courants et les liaisons de flux :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} &= L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} &= L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} &= M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \\ \varphi_{rq} &= M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \end{aligned} \quad (III.3)$$

Où L_s , L_r et M représentent respectivement l'auto-inductance du stator, l'auto-inductance du rotor et l'inductance mutuelle. Le facteur de fuite σ est défini comme suit :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r} \quad (III.4)$$

Le couple électromagnétique développé par la GADA est proportionnel au produit vectoriel du flux du rotor et du courant du stator, exprimé dans le référentiel d-q comme suit :

$$T_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{rd} \cdot I_{rq} - \varphi_{rq} \cdot I_{rd}) \quad (\text{III.5})$$

III.2.1. Équations de la commande prédictive du couple et du flux rotorique:

Les équations électriques complètes de la machine, exprimées dans le référentiel lié au rotor, constituent la base mathématique nécessaire au développement de la commande prédictive.

Afin d'obtenir un modèle utilisable pour la prédiction des grandeurs électriques, les équations de tension sont discrétisées à l'aide de la méthode d'Euler explicite. Cette discrétisation permet d'établir le modèle discret de prédiction requis pour la mise en œuvre de la commande prédictive [16].

L'équation discrète permettant de prédire le courant rotorique s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} I_r(k+1) = & \left(1 - \frac{R_r \cdot T_s}{\sigma \cdot L_r} j \cdot T_s \cdot \omega_r(k) \right) I_r(k) j \frac{T_s}{\sigma \cdot L_r} \omega_r(k) \cdot \varphi_{rd}(k) \frac{T_s}{\sigma \cdot L_r} \cdot U_r(k) \\ & - \frac{L_m \cdot T_s}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} (U_s(k) - R_s \cdot I_s(k)) \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Les tensions du rotor dans $U_r(k)$ sont calculées en utilisant la tension continue du bus mesurée U_{dc} et l'état de commutation de l'onduleur.

$$U_r(k) = U_{dc}(k) \cdot \frac{2}{3} (S_A(k) + e^{j2\pi/3} \cdot S_B(k) + e^{-j2\pi/3} \cdot S_C(k)) \quad (\text{III.7})$$

$$S(k) = [S_A(k) S_B(k) S_C(k)]^T \quad (\text{III.8})$$

La prédiction du flux du rotor suit :

$$\varphi_r(k+1) = \varphi_r(k) + (U_r(k) - R_r \cdot I_r(k)) T_s \quad (\text{III.9})$$

Cette approche d'estimation permet le calcul du flux du rotor à partir des mesures de courant disponibles, bien qu'elle présente une sensibilité aux variations des paramètres et aux erreurs de mesure de la position du rotor.

$$T_e(k+1) = \frac{3}{2} p \cdot \varphi_r(k+1) \times I_r(k+1) \quad (\text{III.10})$$

La formulation du produit vectoriel en notation vecteur d'espace donne la valeur scalaire du couple, dans le référentiel aligné avec le flux du rotor, cela se simplifie en un calcul direct à partir des quantités de flux et de courant prédites.

III.2.2. Formulation de la fonction de coût:

La fonction de coût quantifie les objectifs de contrôle et permet une optimisation systématique de la sélection du vecteur de tension. La forme générale pour le contrôle prédictif du couple intègre à la fois les termes d'erreur de couple et de flux [17] :

$$g = \left(\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_n} \right)^2 + \lambda_f \left(\frac{\psi_r^* - |\varphi_r(k+1)|}{\varphi_n} \right)^2 \quad (\text{III.11})$$

Où T_e^* représente le couple de référence, $T_e(k+1)$ est le couple prédit à l'horizon, T_n est le couple nominal, ψ_r^* est la magnitude du flux du rotor de référence, $|\varphi_r(k+1)|$ est la magnitude du flux prédite, ψ_n est le flux nominal, et λ_f est le facteur de pondération déterminant l'importance relative du contrôle du flux par rapport au contrôle du couple.

La conception du facteur de pondération impacte significativement la performance du système.

Un facteur de pondération plus élevé met l'accent sur le contrôle du flux, potentiellement au détriment de la précision de la régulation du couple, tandis qu'un facteur de pondération plus faible privilégie la performance du couple. Les méthodes d'optimisation du facteur de pondération incluent les algorithmes génétiques multi-objectifs, les techniques basées sur l'entropie, et les approches d'analyse relationnelle grise [18][19][20].

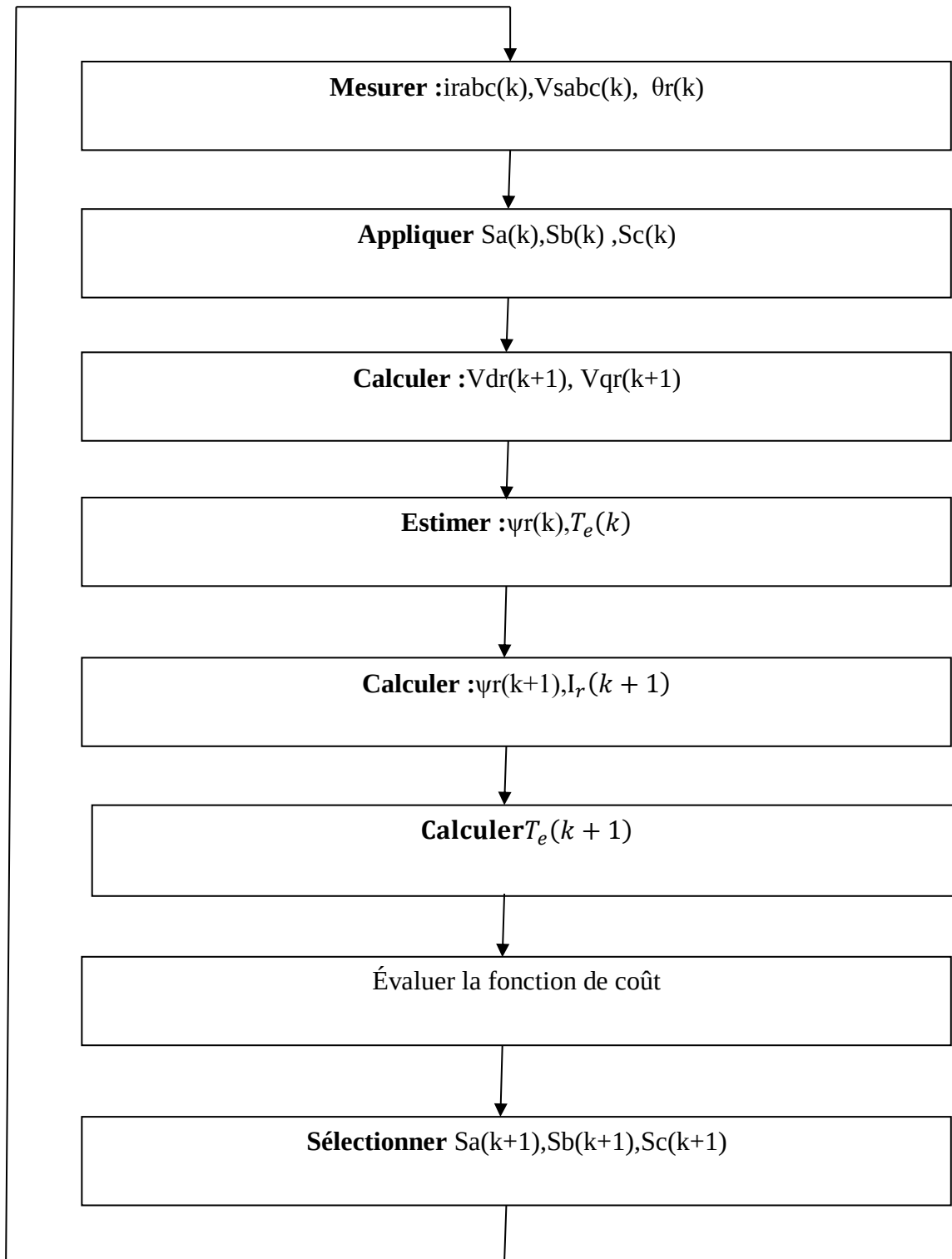


Figure (III.2) : Organigramme simplifié de l'algorithme de contrôle prédictif proposé.

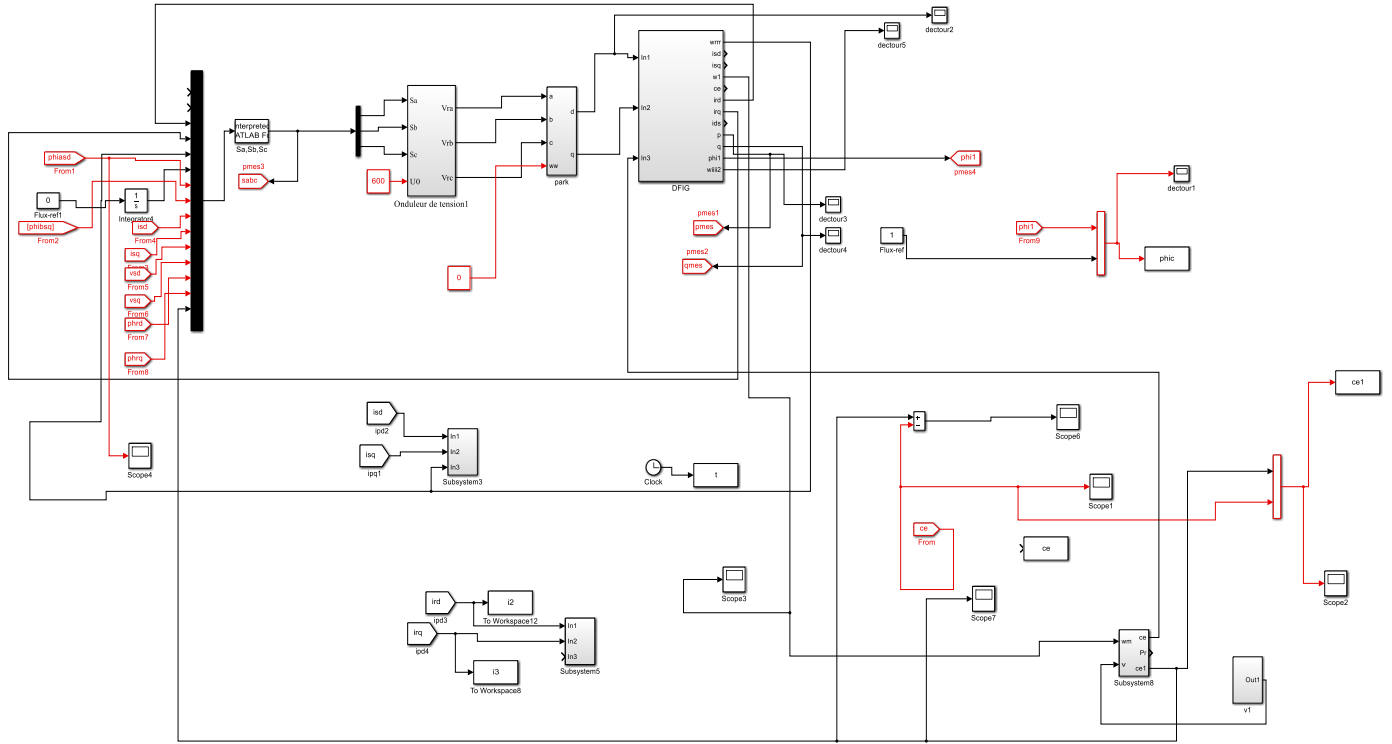


Figure (III.3) : Implémentation sous MATLAB/Simulink de la commande prédictive du couple et du flux d'une GADA

III.3. RÉSULTATS DE SIMULATION:

La commande prédictive du couple et du flux rotorique (PTC) est simulée dans l'environnement MATLAB/Simulink pour une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) de 10 kW, les paramètres électriques et mécaniques de la machine DFIG utilisée dans la simulation sont présentés dans l'annexe. Un profil de vent variable, illustré à la figure III.3, est appliqué afin d'entraîner la partie mécanique du système éolien basé sur la GADA, cette variation de la vitesse du vent permet d'évaluer les performances dynamiques de la stratégie de commande prédictive proposée dans différentes conditions de fonctionnement.

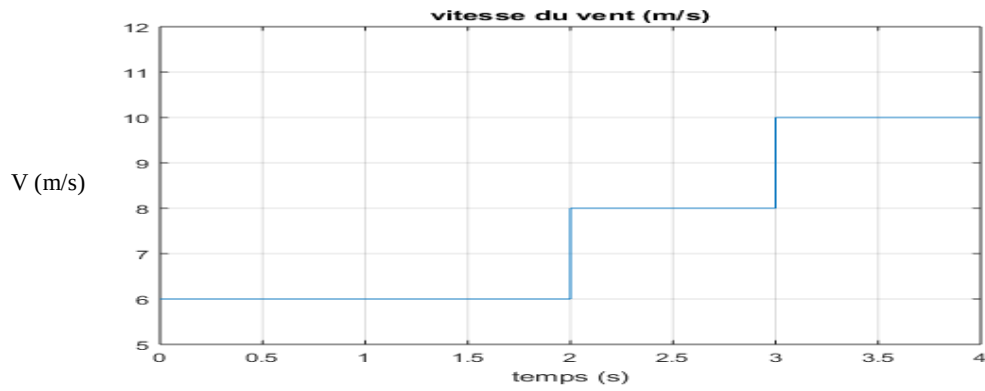


Figure (III.4) : Profils de vitesse du vent.

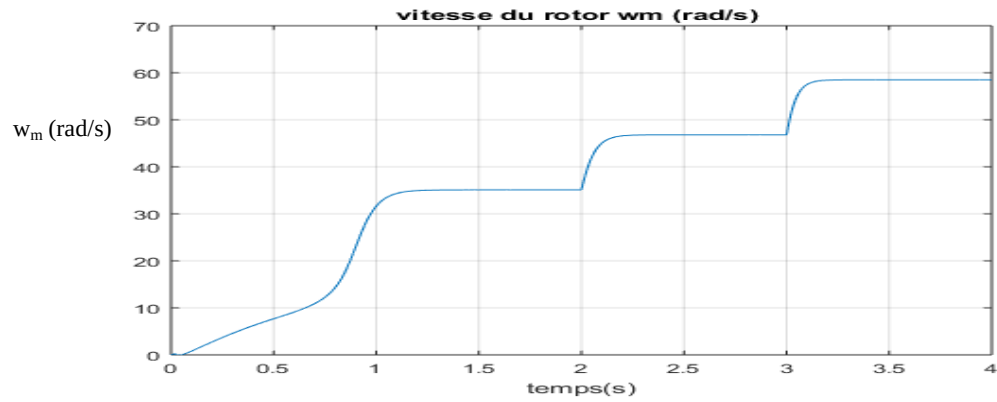


Figure (III.5) : Vitesse du générateur.

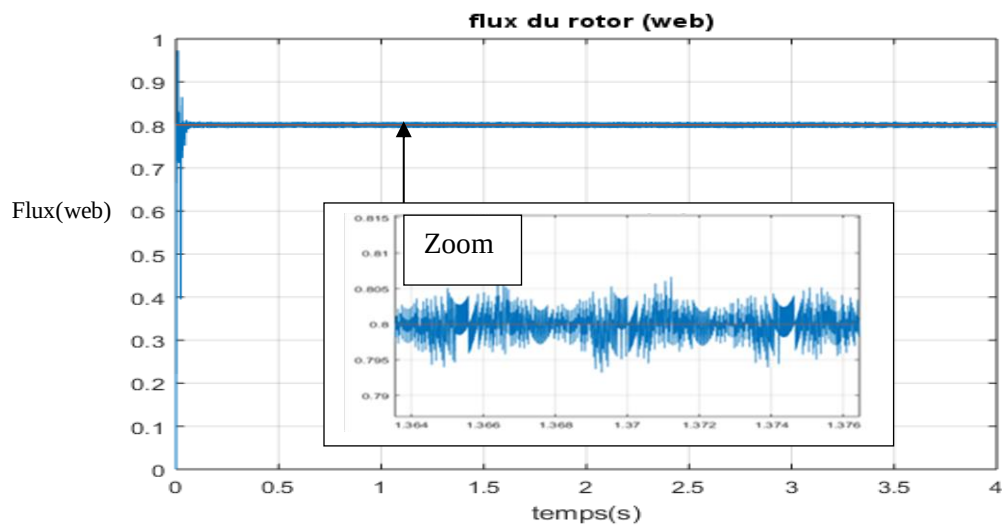


Figure (III.6) : Réponses du flux du rotor.

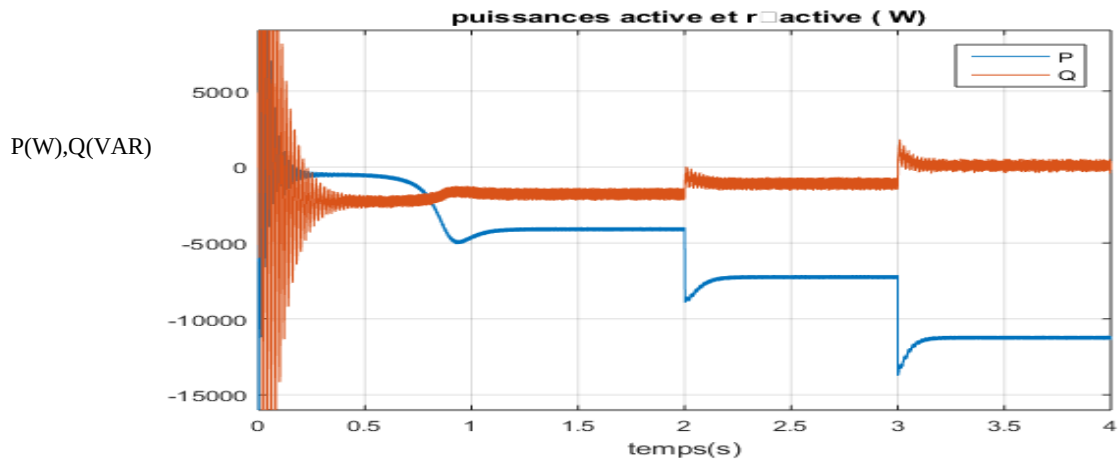


Figure (III.7) : Réponses de la puissance active et réactive du stator.

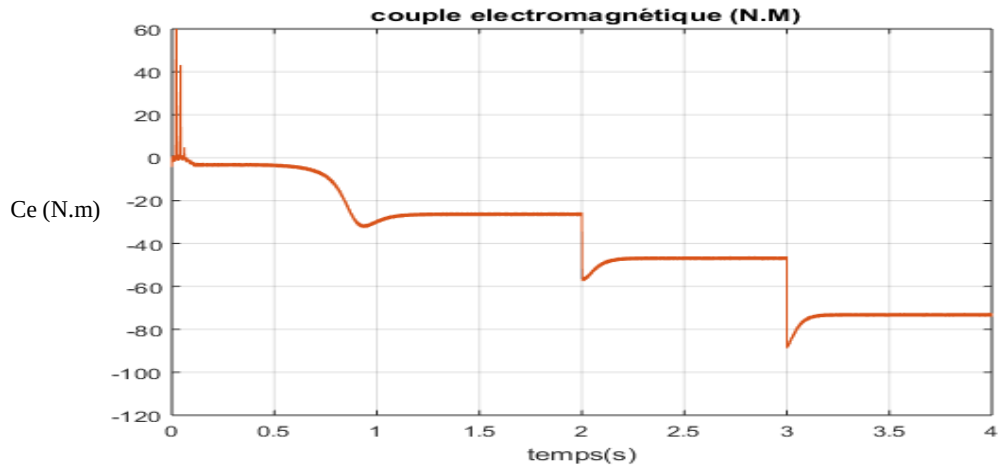


Figure (III.8) : Réponses du couple électromagnétique (N.m).

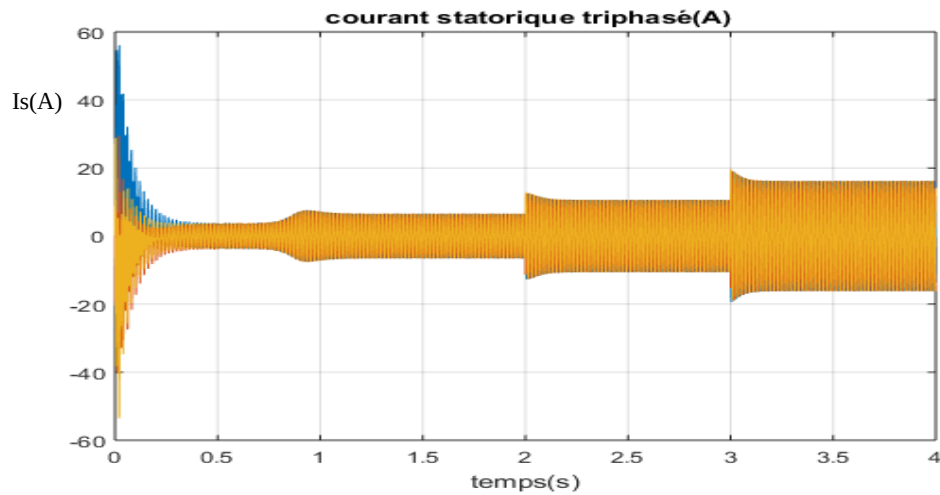


Figure (III.9) : Courant statorique triphasé.

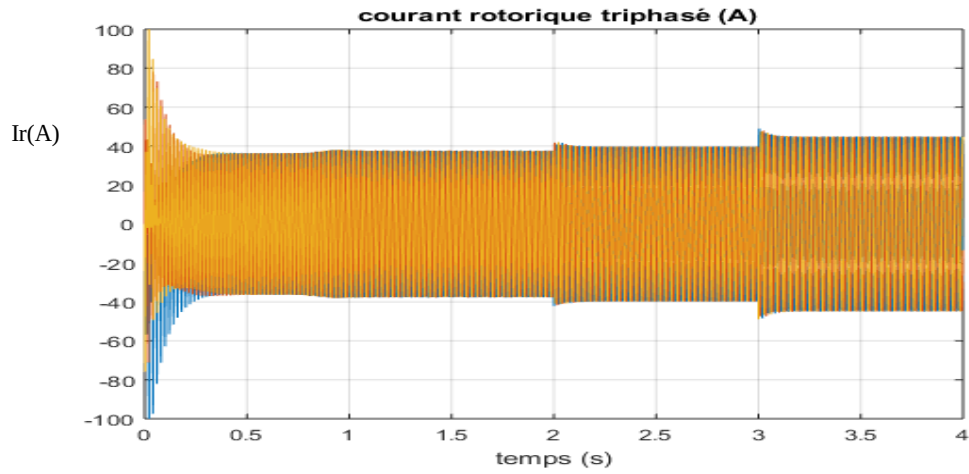


Figure (III.10) : Courant du rotor triphasé.

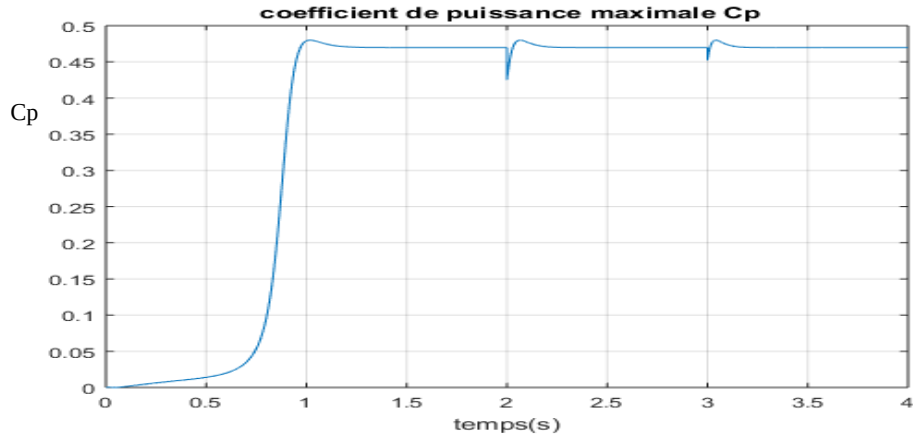


Figure (III.11) : Le coefficient de puissance C_p

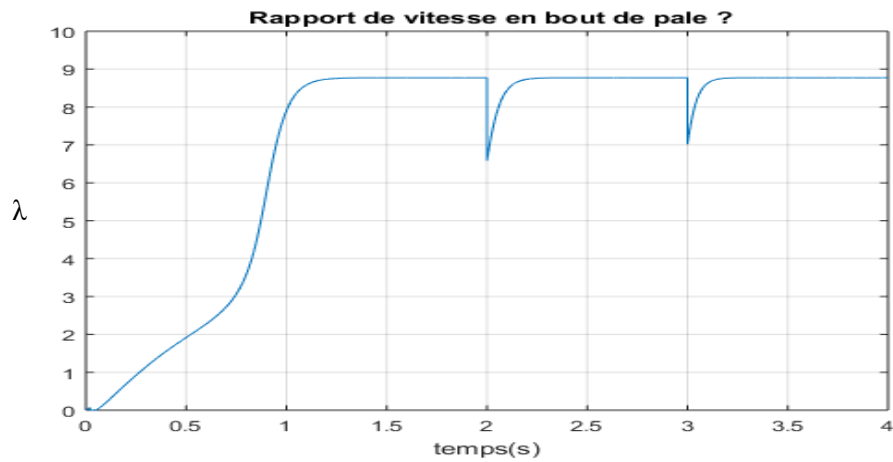


Figure (III.12) : Le rapport de vitesse λ .

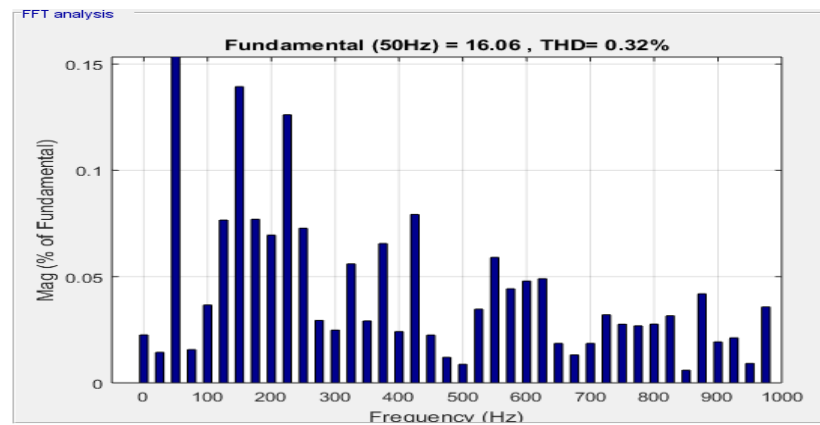


Figure (III.13) : Spectres de courant statorique.

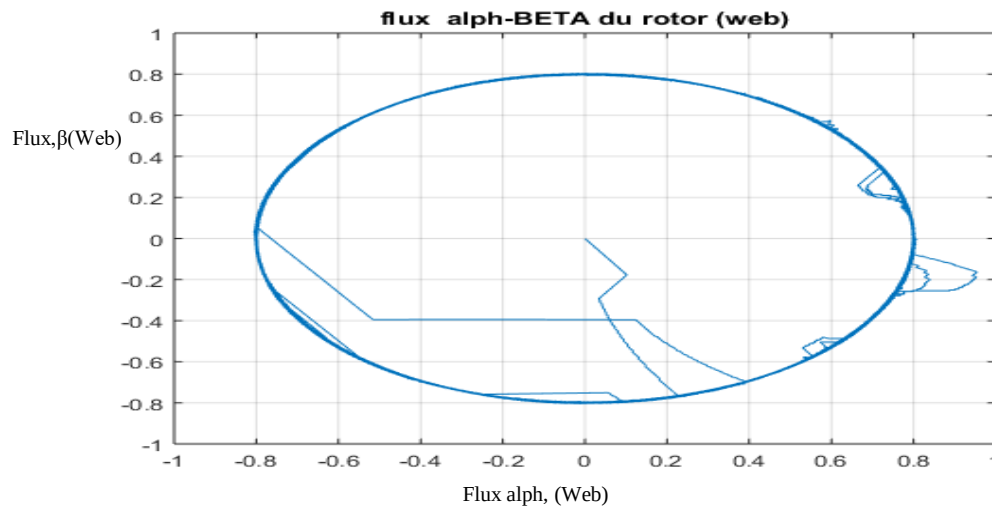


Figure (III.14) : Réponses au flux au rotor dans le repère alpha-bêta.

La réponse dynamique de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) commandée par la stratégie de commande prédictive du couple (PTC) met en évidence de bonnes performances de suivi des références de couple et de flux rotorique. Grâce à sa capacité de prédiction, le contrôleur est capable d'anticiper les variations des références et de déterminer de manière appropriée la tension rotorique nécessaire afin de suivre les trajectoires de référence.

Les variations de vitesse entraînent des variations correspondantes du couple électromagnétique, conformément aux exigences du suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Le contrôleur permet ainsi à la génératrice de s'adapter aux variations de la vitesse du vent et de maintenir son fonctionnement dans une zone favorable à l'extraction maximale de l'énergie éolienne.

La **figure III.5** présente la réponse du flux rotorique. Celle-ci suit convenablement sa référence, avec une dynamique suffisamment rapide pour maintenir un niveau de flux approprié dans les différentes conditions de fonctionnement. Les performances de régulation du flux dépendent notamment de la précision du modèle de prédiction et du choix du facteur de pondération associé à l'objectif de flux, une augmentation de la pondération accordée au flux peut favoriser un suivi plus rapide de sa référence, au détriment éventuel d'autres objectifs de commande.

La **figure III.7** présente la réponse du couple électromagnétique, on observe un temps de montée relativement court ainsi qu'un dépassement limité, avec un temps d'établissement de l'ordre de quelques millisecondes. La commande prédictive permet ainsi d'assurer un suivi rapide de la référence de couple tout en limitant les oscillations. Cette stratégie contribue également à améliorer le découplage entre les dynamiques du couple et du flux, réduisant ainsi les interactions indésirables pouvant être observées dans certaines structures de commande vectorielle.

Les résultats de simulation présentés à la **figure III.6** montrent une bonne dynamique de la génératrice asynchrone à double alimentation sous la commande MPPT. On constate que les références de puissance sont correctement suivies par la génératrice, aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. En particulier, la puissance réactive est maintenue proche de zéro, ce qui correspond à un fonctionnement avec un facteur de puissance proche de l'unité.

Les résultats obtenus pour les courants statoriques et rotoriques, présentés aux **figures III.8 et III.9**, montrent que la GADA génère des courants triphasés présentant une forme d'onde proche de la sinusoïde. Ces résultats indiquent que la stratégie de commande permet d'assurer un fonctionnement satisfaisant de la génératrice tout en maintenant une bonne qualité des courants électriques.

La **figure III.12** présente le spectre harmonique du courant, dont la fréquence fondamentale est de 50 Hz. Les quatre stratégies de commande étudiées permettent d'obtenir un taux de distorsion harmonique totale (THD) inférieur à 5 %, ce qui constitue un niveau compatible avec la limite généralement considérée dans les applications de raccordement au réseau selon les exigences de qualité de l'énergie. Parmi les stratégies étudiées, le contrôleur proposé présente le THD le plus faible, avec une valeur de **0,32 %**. Cette faible distorsion harmonique traduit une bonne qualité de la forme d'onde du courant injecté et contribue ainsi à améliorer la qualité de l'énergie échangée avec le réseau.

Enfin, l'évaluation des performances en régime permanent met également en évidence une réduction des oscillations du couple électromagnétique. Cette caractéristique constitue un avantage important de la commande prédictive du couple, car la diminution des ondulations de couple contribue à améliorer la qualité du fonctionnement électromécanique de la génératrice et à réduire les sollicitations mécaniques du système d'entraînement.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'étude et l'analyse de la commande prédictive du couple et du flux rotorique (PTC) appliquée à une génératrice asynchrone à double alimentation destinée aux systèmes éoliens. Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink montrent que la stratégie proposée permet d'assurer un suivi rapide et précis des références de couple et de flux, tout en limitant les ondulations du couple et en améliorant les performances dynamiques de la génératrice.

La commande PTC permet également d'obtenir un bon suivi des puissances active et réactive, avec une puissance réactive maintenue proche de zéro, ainsi qu'une bonne qualité des courants générés. Ces résultats confirment l'intérêt de la commande prédictive pour améliorer les performances de la GADA dans différentes conditions de fonctionnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié la commande prédictive du couple et du flux rotorique appliquée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) destinée aux systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. L'objectif principal était d'améliorer les performances dynamiques et la qualité du fonctionnement de la génératrice dans différentes conditions de fonctionnement.

Dans un premier temps, les principes fondamentaux de l'énergie éolienne, les principales architectures des aérogénérateurs ainsi que les machines électriques utilisées dans les systèmes de conversion éolienne ont été présentés. La GADA constitue une solution particulièrement adaptée aux applications à vitesse variable grâce à sa flexibilité de fonctionnement et à sa capacité de contrôle des puissances active et réactive.

La modélisation mathématique de la GADA dans le repère de Park (dq) a ensuite été développée afin de faciliter l'analyse du système et la conception de la stratégie de commande. La commande orientée flux statorique a permis d'établir un découplage entre les principales grandeurs électromagnétiques et d'assurer un suivi satisfaisant des références.

L'intégration de la commande prédictive du couple et du flux (PTC) a permis d'améliorer la dynamique du système, notamment par une réduction des oscillations du couple et un meilleur suivi des références. Les résultats obtenus sous MATLAB/Simulink montrent également un bon suivi des puissances active et réactive, ainsi qu'une qualité satisfaisante des courants générés, y compris lors des variations de la vitesse du vent.

En conclusion, les résultats de simulation mettent en évidence l'intérêt de la commande prédictive pour l'amélioration des performances de la GADA dans les systèmes éoliens à vitesse variable. Les perspectives de ce travail concernent notamment l'intégration de techniques de commande adaptative et d'intelligence artificielle, ainsi que le développement de stratégies hybrides permettant d'accroître la robustesse de la commande et d'améliorer davantage la qualité de l'énergie injectée au réseau.

Annexe

Annexe A: Paramètres de la GADA

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	10 kW
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.72 (Ω)
Inductance mutuelle	0.06 (H)
Inductance statorique	0.0735 (H)
Inductance rotorique	0.086 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	380 V
Fréquence du réseau	50 Hz

Annexe B: Paramètres de la turbine éolienne :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pales	3
Diamètre du rotor et longueur d'une pale	3 m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0,05 kg.m ²
Coefficient de frottement	0.0024 <i>N.m.s/rad</i>

Référence

- [1] Y. Zhang, Z. Li, T. Wang, J. Hu et J. Zhu, « Predictive Direct Torque and Flux Control of Doubly Fed Induction Generator With Switching Frequency Reduction for Wind Energy Applications », *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073721.
- [2] S. M. A. Cruz, G. D. Marques, P. F. C. Gonçalves et M. F. Iacchetti, « Predictive Torque and Rotor Flux Control of a DFIG-DC System for Torque-Ripple Compensation and Loss Minimization », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 12, pp. 9301–9310, déc. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2818667.
- [3] M. Abdelrahem, R. Kennel, C. M. Hackl et J. Rodriguez, « Predictive Torque Control without Weighting Factors for Doubly-Fed Induction Generators in Wind Turbine Applications », *2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2020, Art. no. 9265641, doi:10.1109/COMPEL49091.2020.9265641.
- [4] M. Abdelrahem, R. Kennel, C. M. Hackl et J. Rodriguez, « Simple and Robust Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIGs in Wind Turbine Systems », *2020 11th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2020, Art. no. 9088351, doi: 10.1109/PEDSTC49159.2020.9088351.
- [5] P. Kou, D. Liang, J. Li, L. Gao et Q. Ze, « Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIG Wind Turbines », *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1004–1013, 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2682559.
- [6] S. Yan, J. Chen, M. Wang, Y. Yang et J. M. Rodriguez, « A Survey on Model Predictive Control of DFIGs in Wind Energy Conversion Systems », *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1085–1104, 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.08500.
- [7] S. Chikha, K. Barra et A. A. Reama, « Experimental Validation of Direct Predictive Control of Variable Speed Wind Energy Conversion System Based on DFIG », *Periodica*

Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, vol. 66, no. 2, pp. 174–190, 2022, doi: 10.3311/PPee.18874.

[8] A. Younesi et S. Tohidi, « An Improved Long-Horizon Model Predictive Control for DFIG in WECS with Variable Sampling-Time », *IET Renewable Power Generation*, 2022, doi: 10.1049/rpg2.12357.

[9] M.A.HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012

[10] A. B. Patel et R. Chilipi, « Development of Constant Switching Frequency Model Predictive Control for DFIG-Based Wind Energy Conversion System in Standalone and Grid Connected Operation », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64, Art. no. 103739, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103739.

[11] D. Song, J. Yang, M. Dong et Y. H. Joo, « Model Predictive Control with Finite Control Set for Variable-Speed Wind Turbines », *Energy*, vol. 126, pp. 564–572, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.149.

[12] K. Ouari, Y. Belkhier, H. Djouadi, A. Kasri, M. Bajaj, M. Alsharef, E. E. Elattar et S. Kamel, « Improved Nonlinear Generalized Model Predictive Control for Robustness and Power Enhancement of a DFIG-Based Wind Energy Converter », *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Art. no. 996206, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.996206.

[13] A. Giannakis, A. Karlis et Y. L. Karnavas, « A Combined Control Strategy of a DFIG Based on a Sensorless Power Control Through Modified Phase-Locked Loop and Fuzzy Logic Controllers », *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 489–501, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.052.

[14] HARITZA CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003

[15] H. Li et Z. Chen, « Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons », *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123–138, 2008, doi: 10.1049/iet-rpg:20070044.

[16] G. Abad, M. Á. Rodríguez, G. Iwanski et J. Poza, « Direct Power Control of Doubly-Fed-Induction-Generator-Based Wind Turbines Under Unbalanced Grid Voltage », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 442–452, févr. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2009.2027438.

[17] J. Fournier, A. Egea Álvarez et F. Díaz González, « Modeling, Control and Experimental Validation of a DFIG-Based Wind Turbine Test Bench », mémoire de master, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne, 2013.

[18] M. E. Zarei, « Model Predictive Control (MPC) for the Power Converters for Renewable Energy Generation Systems with Switch Fault Tolerance Capability », thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espagne, 2019, doi: 10.20868/UPM.thesis.57183.

[19] M. Spasić, « Model Predictive Control Based on Sliding Mode Control », thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norvège, 2019.

[20] S. Y. Liu, « Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado », mémoire de master, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brésil, 2011.

[21] TOUATI boubaker& HAMOUGA Omar, " Commande prédictive appliquée à une machine synchrone alimentée par un onduleur triphasé", Mémoire de Fin d'Étude L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2017