



People`s Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
University of Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculty of Technology
Department of Process Engineering & Petrochemistry

Dissertation

ACADEMIC MASTER

Domain: Science and Technology

Division: Génie mécanique

Specialty: Electromécanique

Presented by:

TAMMA Oussama

HECHIFA Yahia

DJABER Yacine

Entitled:

**Modélisation et commande d'une MADA dans un système éolien
utilisant une stratégie MPPT**

Publicly defended in: 27/05 /2025

Board of Examiners:

Dr. Youcef Rehouma

Chairman

Dr. Zoubir ZEGHDI

Supervisor

Dr. Housseem Guia

Examiner

Academic Year: 2024/2025

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux

La louange est à **Allah** l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Dr. ZEGHDI Zoubir, Enseignant l'Université Chahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, pour ces conseils précieux, les orientations ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordée pour mener ce travail à terme.

Je voudrais aussi remercier mes parents, tous les membres de ma famille, mes Frères et mes chères sœurs.

Mes remerciements vont également à mes amis, mes collègues et mes enseignants.

Dédicaces

Au cours de cette recherche, nous avons été confrontés à de nombreux défis et obstacles, mais grâce à Dieu en premier lieu, puis avec persévérance et détermination, nous avons pu les surmonter.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents, frères, sœurs et amis, qui ont été un véritable soutien tout au long de ce parcours académique.

Nous ne pouvons pas non plus oublier nos chers professeurs, qui ont joué un rôle majeur en nous guidant, en nous soutenant et en nous fournissant des informations précieuses.

Nous vous dédions ce travail modeste, en priant Dieu Tout-Puissant de bénir vos vies, de vous accorder santé et bien-être, et de vous récompenser généreusement.

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des symboles</i>	
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion éoliens	3
I. Introduction	4
II. Statistiques mondiales et perspectives pour 2025	4
III. Définition de l'énergie éolienne	5
IV. Different types eolienne	5
IV.1. Eoliennes à axe horizontal	5
IV.2. Eolienne à axe vertical	6
V. Principaux composants d'une éolienne	7
V.1. Le mât	7
V.2. Le rotor	8
VI. Fonctionnement d'une éolienne	8
VI.1. Eolienne à vitesse fixe	8
VI.1.1. Avantage du fonctionnement à vitesse fixe	8
VI.1.2. Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe	8
VI.2. Eolienne à vitesse variable	9
VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	9
VII.1. Avantages	9
VII.2. Inconvénients	9
VIII. Machine électrique et système de conversion d'énergie éolienne	9
VIII.1. Machines asynchrones (MAS)	10
VIII.2. Machine asynchrone a cage	10
VIII.3. Machine synchrone a aimant permanent	10
VIII.4. Machine synchrone	10
VIII.5. Machine synchrone a rotor bobiné	10
VIII.6. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)	11
IX. Présentation de la MADA	11
IX.1. Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)	11
IX.2. La double alimentation	11
IX.3. Principe de fonctionnement de la MADA	12

X. Description du fonctionnement de la MADA :	13
X.1. Structure de la machine :	13
X.2. Modes de fonctionnement de la MADA :	14
X.3. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :	15
X.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :	15
X. Application de la MADA :	16
XI. Avantages et inconvénient de la MADA:	18
XI.1. Avantages de la MADA:	18
XI.2. Inconvénients de la MADA :	18
XII. Conclusion	19
Chapitre II : Modélisation et commande MPPT de la turbine éolienne	22
I. Introduction	22
II. Modélisation de la turbine éolienne	22
III. Modélisation du vent (source primaire)	23
IV. Modèle aérodynamique	24
V. Modèle de la partie mécanique	25
VI. Stratégies de commande de la turbine éolienne	27
IV.1. Définition de la technique MPPT	27
IV.2. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation	27
IV.3. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation à base de régulateur PI	29
VII. Bloc de simulation de la turbine éolienne	31
VIII. Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans et avec asservissement de vitesse	32
IX. Conclusion	34
Chapitre III : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	35
I. Introduction	36
II. MODELISATION DE LA MADA	36
II.1. Equations générales de la GADA :	37
II.2. Equations électriques :	37
II.3. Equations magnétique :	38
II.4. La transformation de Park	39
II.5. Application la transformation de Park sur la MADA	40
III. Choix du référentiel	43
IV. Modèle de la GADA référentiel lié au champ tournant :	43
IV.1. Equations électriques :	43
IV.2. Equations des flux magnétiques :	44
IV.3. Equations mécaniques :	44
IV.4. Mise du modèle biphasé sous forme d'état :	44

V. SIMULATION DE LA MADA :	45
V.1. Résultat de la simulation :	46
V.2. Interprétation des résultats :	48
VI. CONCLUSION	48
Chapitre IV : Commande vectorielle de la MADA	49
I. Introduction	50
II. LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA :	50
II.1. Principe de la commande vectorielle :	50
II.2. La commande par orientation de flux :	51
II.3. Les méthodes de contrôle par flux orienté	52
II.4. Commande directe	52
II.5. Commande indirecte :	52
III. MODELE DE LA GADA AVEC ORIENTATION DE FLUX STATORIQUE	52
IV. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques	55
V. Relation entre tensions et courants rotoriques	56
VI. Commande vectorielle en puissance	58
VI.1. Commande directe	59
VI.2. Type de régulateur utilisé (Proportionnel-Intégral)	60
VI.3. Commande indirecte	61
VI.3.1. La commande indirecte en boucle ouverte	62
VI.3.2. La commande indirecte en boucle fermée :	62
VII. SIMULATION DE LA COMMANDE VECTORIELLE :	63
VII.1. Modèle de commande d'un système globale (GADA+Turbine) :	63
VII.2. Résultats de la simulation :	64
VII.3. Interprétation des résultats :	66
VIII. Conclusion	66
Conclusion Générale	67
Résumé	69
Résumé (Français)	70
Abstract (English)	70
الملخص (العربية)	70
Annexe	71
Paramètres du système éolien	72
Références bibliographiques	73

Liste des figures

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I.2: Technologie éolienne à axe horizontale	6
Figure I.3 : Technologie éolienne à axe vertical	6
Figure I.4: Constitution d'une éolienne.....	7
Figure I.5: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	13
Figure I.6: Cascade hypo-synchrone	14
Figure I.7 : Fonctionnement moteur hypo-synchrone.....	15
Figure I.8:Fonctionnement générateur hyper-synchrone	15
Figure I.9 .I:MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances	17
Figure II.10: Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel.....	23
Figure II.11:Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas réglé de 2 MW, pour différents angles β	25
Figure II.12: Modèle mécanique du système éolien.	25
Figure II.13 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	27
Figure II.14 : Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.....	29
Figure II.15 : Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation de la GADA	31
Figure II.16 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	31
Figure II.17: Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ et Vitesse spécifique λ	32
Figure II.18:Vitesse mécanique Ω_m et Puissance mécanique	33
Figure III.19:Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	36
Figure III.20 : Passage du système triphasé au biphasé (abc vers uv).....	40
Figure III.21 : Le modèle généralisé de la GADA selon les axes (u,v).	41
Figure III.22 : Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé	42
Figure III.23 : Schéma bloc de simulation de la GADA.....	46
Figure III.24: La puissance active et réactive.....	46
Figure III.25 : Les courants statorique et rotorique.	47
Figure III.26: Couple électromagnétique.	47
Figure IV.27 : Principe de la commande vectorielle	51
Figure IV.28 : Orientation de flux statorique sur l'axe d.....	51
Figure IV.29 : Schéma bloc de la GADA sous les contraintes du flux et de la tension.....	57
Figure IV.30 : Bloc du F.O.C (field-oriented control).....	58
Figure IV.31 : Modèle simplifié de la DFIG.	58
Figure IV.32: commande vectorielle directe.....	59
Figure IV.33: Schéma bloc d'un système régulé par un PI.	60
Figure IV.34 :Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.	62
Figure IV.35 : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	63
Figure IV.36 : schéma de simulation de la commande d'une GADA	63
Figure IV.37 : La puissance active et réactive statorique avec ses références (avec zoom).	64
Figure IV.38 : Les deux composantes du courant rotorique et statprique (avec zoom).	65
Figure IV.39 : Couple électromagnétique C_e	65

LISTE DES SYMBOLES

Symboles spécifiques à la turbine :

V_v	<i>Vitesse du vent</i>
P_{aer}	<i>Puissance aérodynamique</i>
λ	<i>Ration de Vitesse</i>
$C_p(\lambda, \beta)$	<i>Coefficient de puissance</i>
β	<i>Angle d'orientation des pales</i>
ρ	<i>Masse volumique de l'air</i>
S	<i>Surface circulaire balayée par la turbine</i>
Ω_t	<i>Vitesse de rotation de la turbine</i>
R_t	<i>Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.</i>
C_t	<i>Couple de la turbine.</i>
J	<i>Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne.</i>
J_t	<i>Moment d'inertie de la turbine.</i>
J_m	<i>Moment d'inertie de la GADA.</i>
f_v	<i>Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.</i>
C_m	<i>Couple mécanique sur l'arbre de la GADA</i>
C_{em}	<i>Couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA</i>
G	<i>Gain du multiplicateur</i>
Ω_m	<i>Vitesse de rotation de la GADA</i>
N_r et N_s	<i>Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique</i>
g	<i>Glissement</i>
p	<i>Nombre de paires de pôles</i>
u	<i>Rapport de transformation rotor/stator</i>
w_s et w_r	<i>Pulsations statorique et rotorique de la GADA.</i>
R_s, R_r	<i>Résistance statorique et rotorique</i>

$i_{as}(t), i_{bs}(t) \text{ et } i_{cs}(t)$	Courants statoriques des phases a, b et c
$v_{as}(t), v_{bs}(t) \text{ et } v_{cs}(t)$	Tensions statoriques.
$\phi_{as}(t), \phi_{bs}(t) \text{ et } \phi_{cs}(t)$	Flux de stator
$i_{ar}(t), i_{br}(t) \text{ et } i_{cr}(t)$	Courants rotoriques des phases a, b et c
$v_{ar}(t), v_{br}(t) \text{ et } v_{cr}(t)$	Tensions rotoriques.
$\phi_{ar}(t), \phi_{br}(t) \text{ et } \phi_{cr}(t)$	Flux de rotor
L_s, L_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques

M_s, M_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques
M_{123}	Inductance mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phase rotorique.
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq},$	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq},$	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq},$	Flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
I_{CCG}, i_{CCR}	Courants issus des deux convertisseurs
V_{dc}	Tension du bus continu
f_{em}	Forces électromotrices
ABREVIATIONS 1. EN FRANÇAIS	
SCEE	Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne.
GADA	Génératrice Asynchrone Double Alimentation.
CCR	Convertisseur Côté Réseau.
CCG	Convertisseur Côté Génératrice.
TE	Turbine Eolienne.
PI	Proportionnel- Intégral.
CMG	Commande par Mode Glissant.
GW	Gigawatts.
PE	Parcs Éoliens.
TEVF	Turbines Eoliennes à Vitesse Fixe.
TEVV	Turbines Eoliennes à Vitesse Variable.
μC	Microcontrôleur.
GS	Générateur synchrone (GS).
CC	Courant continu.
CA	Courant alternatif.

MADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
DTC	Direct torque control (commande directe de couple).
GADA	Machine asynchrone à double alimentation.
MCC	Machine à courant continue.
DFIG	Doubly fed induction generator.
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouvert.
MLI	Modulation de largeur d'impulsions.
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée.
MPPT	Max power point tracking
F.O.C:	Field oriented control (commande flux orienté).
MADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
DTC	Direct torque control (commande directe de couple).

2. EN ANGLAIS

WRIG	<i>Générateur à induction à rotor bobiné (WRIG).</i>
PMSG	<i>Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG).</i>
WRSG	<i>Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG).</i>
SCIG	<i>Générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG).</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing.</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
PWM	<i>Pulse width modulation.</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking.</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator.</i>
ADALINE	<i>ADaptive LINear Element.</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion.</i>

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le contexte actuel de transition énergétique mondiale, l'énergie éolienne s'impose comme l'une des sources renouvelables les plus prometteuses, en raison de son abondance, de sa durabilité et de son faible impact environnemental. Avec l'évolution des technologies de conversion électromécanique, les systèmes basés sur le **générateur asynchrone à double alimentation (GADA/DFIG)** offrent une solution performante permettant un contrôle indépendant de la puissance active et réactive, tout en opérant sur une large plage de vitesses du vent.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique et vise à étudier en profondeur les différentes étapes de la conversion de l'énergie éolienne, de l'architecture globale du système jusqu'au contrôle avancé du générateur. Il est structuré en quatre chapitres complémentaires :

◆ Le **premier chapitre** présente **un état de l'art détaillé** des systèmes électromécaniques de conversion éolienne, en mettant l'accent sur les différentes typologies de turbines et de générateurs ainsi que sur les techniques d'intégration au réseau électrique.

◆ Le **deuxième chapitre** traite de **la modélisation de la turbine éolienne** couplée à **des algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking)**, afin d'optimiser la captation de l'énergie en fonction des conditions du vent, à travers des modèles dynamiques pertinents.

◆ Le **troisième chapitre** est dédié à **la modélisation complète du générateur GADA**, en utilisant les équations d'état dans le repère tournant (dq), permettant une analyse fine des interactions électromécaniques.

◆ Le **quatrième chapitre** se concentre sur **les stratégies de commande du GADA**, notamment via la technique **FOC (Field Oriented Control)**, visant à améliorer la réponse dynamique et à garantir la stabilité dans diverses conditions de fonctionnement.

À travers cette approche, le présent travail cherche à proposer une méthodologie intégrée combinant modélisation mathématique, analyse dynamique et contrôle avancé, pour renforcer l'efficacité globale des systèmes de conversion éoliens modernes.

Chapitre I : Etat de l’art sur les systèmes de conversion éoliens

I. Introduction

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'une des principales sources d'énergie renouvelable, jouant un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale. Depuis des siècles, l'être humain exploite la force du vent, d'abord à travers les moulins à vent pour moudre le grain et pomper de l'eau, puis grâce à des technologies modernes est permettant de produire de l'électricité de manière propre et durable. Face aux préoccupations croissantes liées aux changements climatiques et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'énergie éolienne s'impose comme une alternative essentielle aux énergies fossiles, offrant une solution efficace pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en préservant l'environnement [1].

L'énergie renouvelable prometteuse et pratiquement inépuisable, bien qu'elle présente un caractère intermittent en raison de la variabilité des vents. Toutefois, les avancées récentes dans plusieurs domaines, notamment les turbines éoliennes à utilisation variable, l'électronique de puissance et les techniques de commande avancées, ont permis d'optimiser le contrôle et la gestion de la puissance produite par ces aérogénérateurs. Ces progrès contribuent à améliorer la compétitivité de l'énergie utilisée par rapport aux sources d'énergie traditionnelles.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement aux éoliennes à axe horizontal et à utilisation variable, en examinant leur structure, leurs principes de fonctionnement, ainsi que les différents types de générateurs utilisés dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne [2].

II. Statistiques mondiales et perspectives pour 2025

Jusqu'à la date d'aujourd'hui, le 10 février 2025, les derniers rapports indiquent que les énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne, connaissent une croissance significative à l'échelle mondiale .

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, les énergies renouvelables devraient devenir la principale source de production d'électricité dans le monde d'ici 2025, dépassant le charbon. On estime également que les énergies renouvelables représenteront près de 40 % de la production mondiale d'électricité en 2027, avec une contribution croissante de l'énergie éolienne et solaire, atteignant environ 90 % des nouvelles capacités installées d'ici cette année-là .[2].

En outre, les prévisions indiquent que la part combinée de l'énergie solaire et éolienne dans le mix électrique mondial atteindra 18 % en 2025, contre 15 % en 2024 et 13 % en 2023. Cette croissance

reflète l'expansion rapide des capacités de production d'électricité à partir de sources renouvelables, en particulier dans les domaines de l'énergie solaire et éolienne .[2].

Veuillez noter que ces chiffres sont basés sur des rapports et des prévisions antérieurs et peuvent être sujets à des mises à jour ou des modifications en fonction des données les plus récentes. [2].

III. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme Une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique Disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une Génératrice Figure 1 [3]

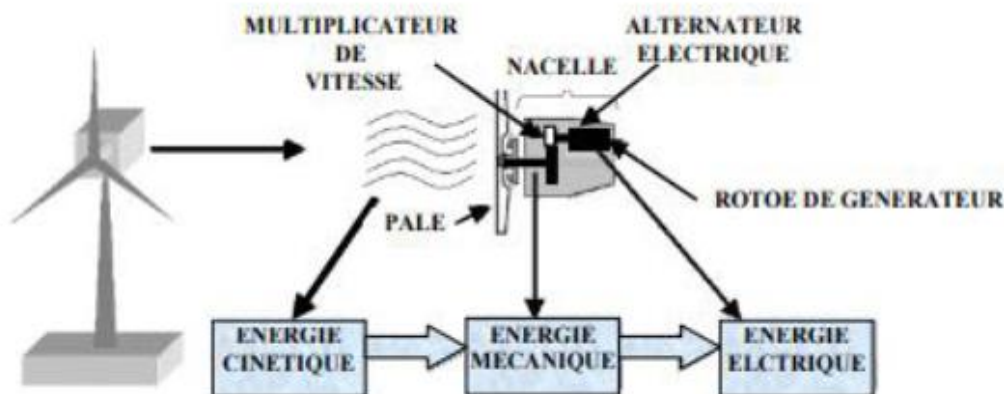


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

IV. Different types eolienne

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 horizontal
- Les turbines éoliennes à axe vertical

IV.1. Eoliennes à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courante) et les multipales. La voileure peut être placée avant la nacelle (up Wind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire [4].

Une Autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (down Wind). Dans ce cas-là

turbine se place automatiquement face au vent. La Figure I.2 technologie éolienne à axe Horizontale [5] [6]



Figure I.2: Technologie éolienne à axe horizontale

IV.2. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire De l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe Horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au Niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les Années 1920 avec un certain succès. Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisés, Puisque les contraintes mécaniques au niveau du sol occupent plus d'espace [4] [5].

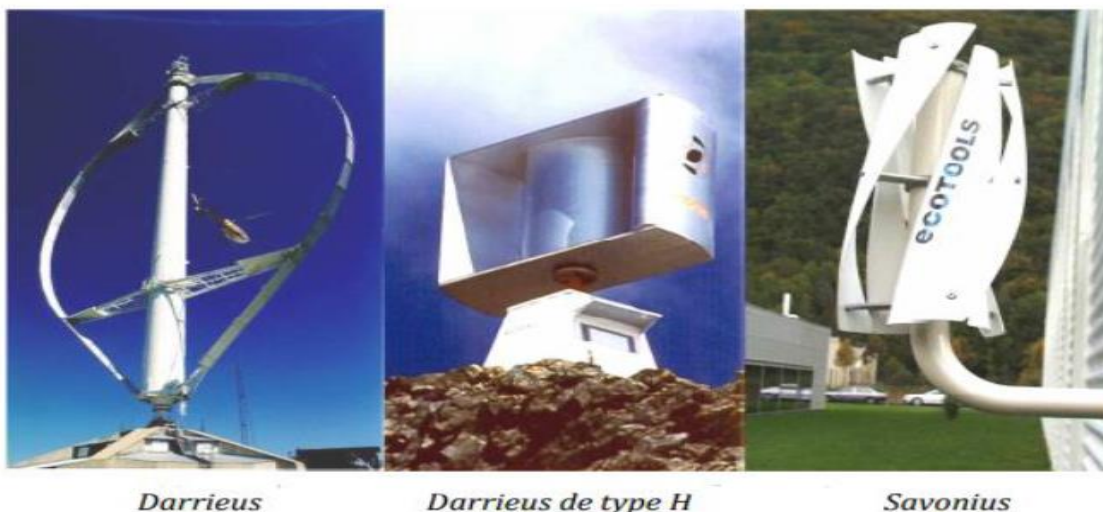


Figure I. 3: Technologie éolienne à axe vertical

V. Principaux composants d'une éolienne

Existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des Différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de deux éléments principaux

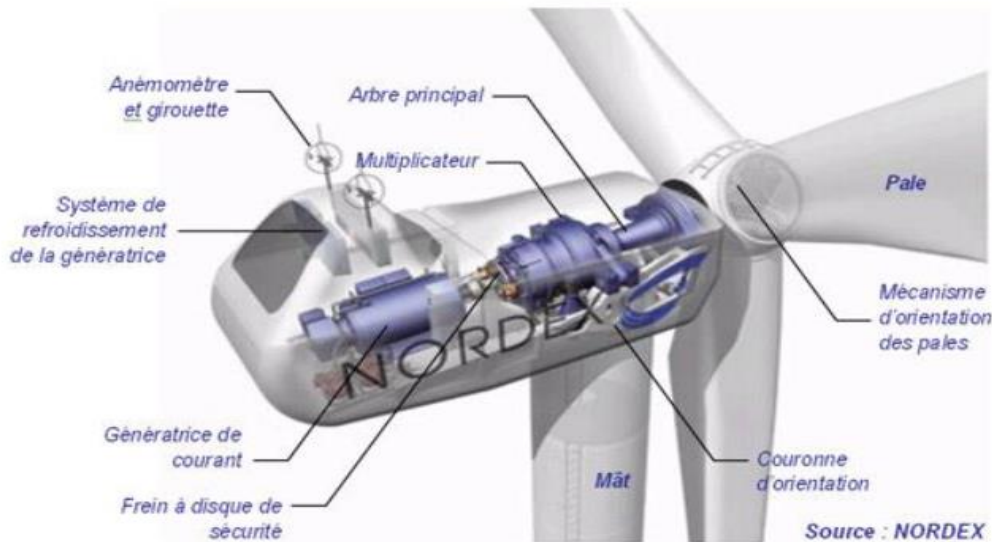


Figure I.4: Constitution d'une éolienne

V.1. Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le Plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière Mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis Consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du Rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât De 80 m de hauteur) [7]

La nacelle : Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au Générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de Commande, système de refroidissement, 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 [8]

V.2. Le rotor :

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute [9]

VI. Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau.

VI.1. Eolienne à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [10]

VI.1.1. Avantage du fonctionnement à vitesse fixe :

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

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

VI.1.2. Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe :

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

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques)
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse

- Perte de control de la puissance réactive
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée

VI.2. Eolienne à vitesse variable :

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [10]

VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

VII.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [11] .
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [12].

VII.2. Inconvénients

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif [12].
- Le bruit des pales.
- L'impact sur les oiseaux (les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux).
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [12].

VIII. Machine électrique et système de conversion d'énergie éolienne :

Dans cas des éoliennes à vitesse variable, il utilise plusieurs types des machines par rapport les éoliennes à vitesse fixe (constant)

VIII.1. Machines asynchrones (MAS) :

L'utilisation de la machines Asynchrones est largement répandue dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Il existe deux types de Machine Asynchrone pouvant être couplés avec une éolienne : Machine Asynchrone à cage, Machines Asynchrones à double alimentation (MADA)

VIII.2. Machine asynchrone a cage :

Les machines asynchrones à cage sont utilisées en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence [13].

Elles sont rarement exploitées car elles ne sont pas concurrentielles avec les autres types de machines. Ces machines (rapides) nécessitent d'être associées à leur turbine éolienne, beaucoup plus lente, à travers un multiplicateur de vitesse mécanique

VIII.3. Machine synchrone a aimant permanent :

La fréquence de la tension produite par le MSAP dépend de la vitesse de rotation. Il ne peut donc ne pas être connecté directement au réseau électrique [14].

Ce type de générateur utilise un aimant permanent à rotor multipôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique. Donc la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor [15]

VIII.4. Machine synchrone

La machine synchrone est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (Centrales) thermiques, hydrauliques ou nucléaires), les générateurs synchrones sont aussi utilisés dans le domaine éolien pour des puissances allant de 500 kW à 2 MW mais ils sont bien plus coûteux que les générateurs à induction de la même taille [6]

VIII.5. Machine synchrone a rotor bobiné:

La connexion directe au réseau de puissance implique que la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système

VIII.6. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor (bobiné) est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance. Cette interface adapte l'amplitude et la fréquence des courants rotorique, en contrôlant la tension aux bornes du rotor en fonction du point de fonctionnement de la machine. On s'autorise ainsi une variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. Le stator est lui directement connecté au réseau [17]

IX. Présentation de la MADA

IX.1. Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la machine asynchrone doublement alimentée. En tant que génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, la MADA présente bien des avantages le convertisseur lié à l'armature rotorique pourra être, et sera, dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles [18]. Pour les applications motrices, la littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [19]

IX.2. La double alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : Doubly Fed Induction Machine), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [20].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [21].

Dans les moteurs à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statoriques sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [21].

IX.3. Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices $f.m.m$ du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de $f.m.m$ des enroulements statoriques tourne, dans l'espace, avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$ et que le rotor tourne à la vitesse ω_r , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur $f.m.m$ de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse [21]

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1 - g) = \omega_s g$$

g : est le coefficient de glissement

ω_g = est la vitesse angulaire de glissement.

C'est-à-dire proportionnellement au glissement g ; si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse du synchronisme, les sens de rotation sont identiques; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur $f.m.m$ par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_g = 2\pi f_r$: c'est à dire :

$$f_r = g f_s \quad (1.2)$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. A partir de l'équation (III.1) et (III.2). On voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone $\omega_s(g = 0)$

X. Description du fonctionnement de la MADA :

X.1. Structure de la machine :

Connue depuis 1899 [5], [17], il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [7].

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures ; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou 7 Chapitre I Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [22].

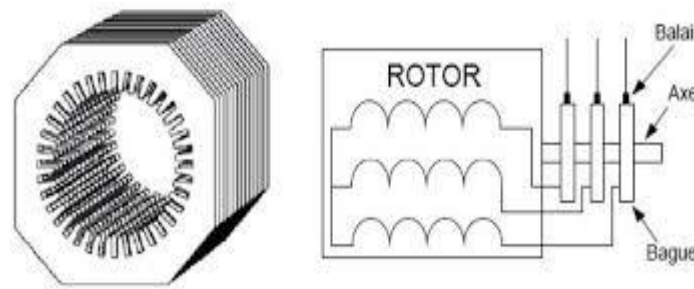


Figure I.5: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général. En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hyposynchrone (Figure 6) [23].

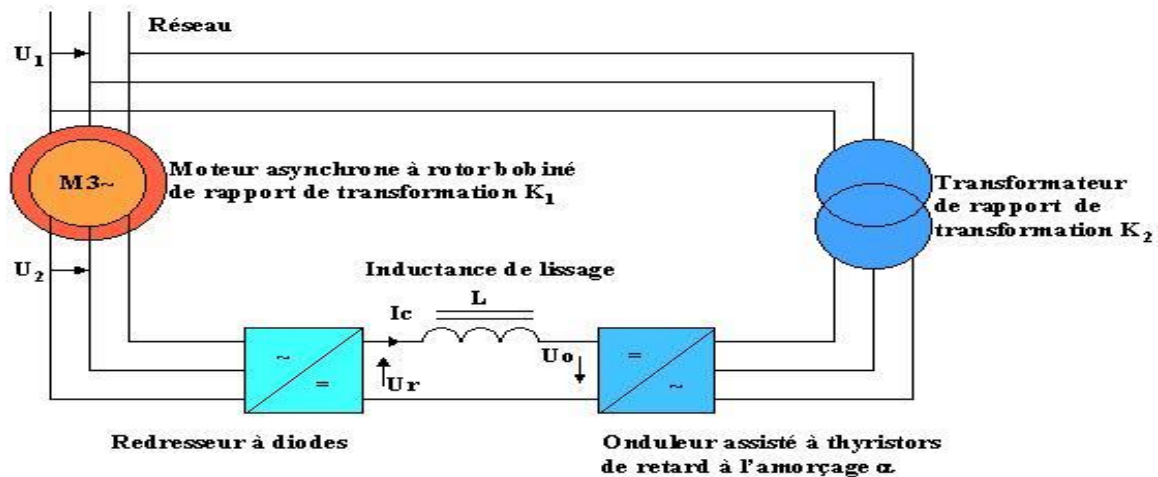


Figure I.6: Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu un aimant permanent mais est constitué d'un bobinage triphasé alimentée en alternatif. Ce fonctionnement peut-être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [23].

X.2. Modes de fonctionnement de la MADA :

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner remonteur ou générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [24].

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 hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [24].

La MADA est parfaitement commandable mais le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

X.3. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

La figure 7 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor

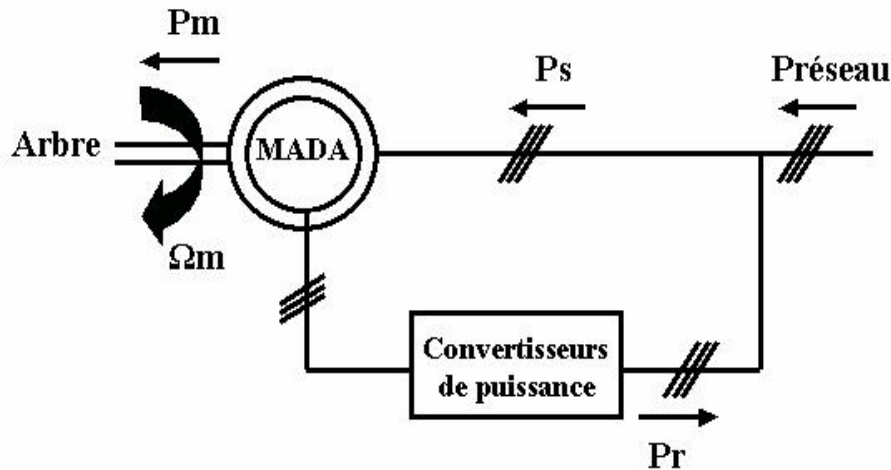


Figure I. 7: Fonctionnement moteur hypo-synchrone

X.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :

La figure I.8 montre que 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. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

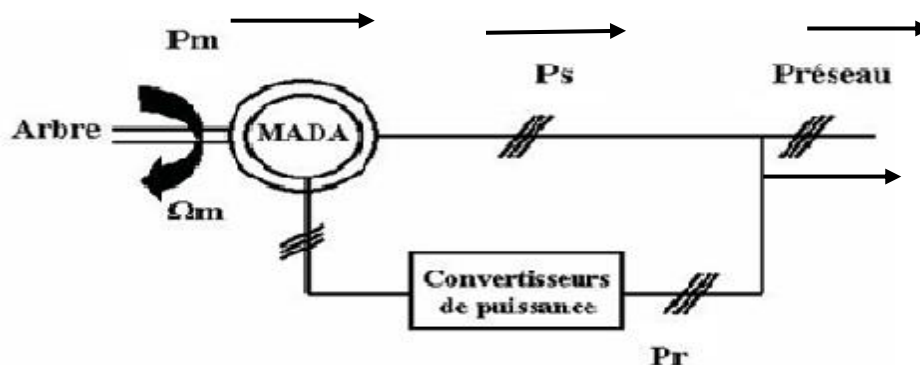


Figure I.8:Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [24].

X. Application de la MADA :

Les machines à bagues à courant alternatif ont été réalisées dans le passé en diverses variantes, dont quelques usines ont débouché sur des applications industrielles importantes.

Parmi les nombreuses utilisations de la machine, celle qui nous intéresse particulièrement est la machine à double alimentation.

La machine à double alimentation s'apparente fortement, du point de vue technologie, à la machine asynchrone à rotor bobiné classique, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car cette dernière est toujours d'actualité. Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placée dans le circuit rotorique, ou encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau. Ces machines sont donc classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation [20].

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et 11 Chapitre I Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [23]. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [23].

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

application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs un au rotor et un au stator (Figure 9).

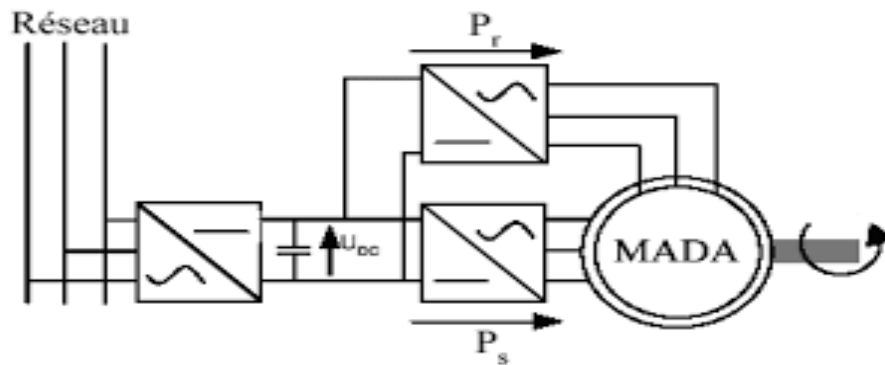


Figure I. 9.I:MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages :

- La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.
- Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.
- Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.
- Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagés entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [22]. [25] :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc.

XI. Avantages et inconvénient de la MADA:

Nous introduit-on succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable [26].

XI.1. Avantages de la MADA:

Parmi sombrons avantages, nous chitons :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la Vitesse nominal.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

XI.2. Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [26].
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'auto pilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces. Magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir un est habilité à la machine [22], [27].

XII. Conclusion

L'énergie éolienne s'impose aujourd'hui comme une composante essentielle du paysage énergétique mondial. Grâce à son développement rapide, ses applications variées et ses nombreux avantages environnementaux et économiques, elle joue un rôle clé dans la transition vers un avenir énergétique plus durable. Cependant, des efforts doivent être poursuivis pour surmonter ses limitations, notamment en matière de stockage et d'intégration au réseau électrique. Avec l'essor des innovations technologiques et l'engagement croissant des gouvernements et des industries, l'énergie éolienne continuera de se développer et de contribuer à un monde plus propre et plus résilient.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description et un rappel des concepts Nécessaires à la compréhension du système de conversion éolienne. Des formes non similaires d'éoliennes ont été décrites, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Les composantes des différents types des systèmes éoliens ont été présentées. Avec l'étude en générale de la machine synchrone a doublé alimentation MADA, dans notre thèse nous allons prendre la machine synchrone a doublé alimentation (MADA) en mode générateur GADA. Dans le chapitre suivant, on va présenter la modélisation et commande MPPT de la turbine éolienne.

Chapitre II : Modélisation et commande MPPT de la turbine éolienne

I. Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique, **l'énergie éolienne** apparaît comme l'une des solutions les plus prometteuses pour produire de l'électricité de manière propre, durable et efficace. Toutefois, la nature variable et instable du vent représente un défi majeur pour l'optimisation de la production énergétique des turbines éoliennes.

Afin d'atteindre un rendement optimal, il est essentiel d'établir **un modèle mathématique complet de la turbine éolienne**, prenant en compte les aspects dynamiques, mécaniques et électriques du système. Une modélisation rigoureuse permet de mieux comprendre le comportement de la turbine face aux variations du vent, et de concevoir des **stratégies de commande non linéaire** adaptées pour améliorer ses performances globales.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la technique **MPPT (Maximum Power Point Tracking)**, qui joue un rôle clé en assurant **le fonctionnement de la turbine au point de puissance maximale**, et ce, quelles que soient les conditions de vent. Grâce à des algorithmes performants, cette méthode permet d'ajuster dynamiquement les paramètres du système pour extraire la puissance maximale disponible à chaque instant.

Ce chapitre se propose donc d'explorer en détail la modélisation mathématique de la turbine, de présenter des stratégies de commande avancées, et de valider l'efficacité de la stratégie MPPT à travers des **résultats de simulation illustrant l'amélioration significative des performances du système** [28], [29].

II. Modélisation de la turbine éolienne

L'objectif principal d'une éolienne est de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, transmise par ses pales vers l'arbre lent du rotor. Ensuite, le multiplicateur de vitesse augmente la faible vitesse de rotation générée par le vent pour atteindre une vitesse plus élevée du côté du générateur, permettant ainsi un fonctionnement optimal du rotor.

D'un point de vue théorique, aucune éolienne ne peut capter la totalité de l'énergie disponible dans le vent. La puissance effectivement extraite (P_{aer}) est déterminée par **le coefficient de puissance C_p** , qui représente le rapport entre l'énergie mécanique récupérée et l'énergie cinétique totale contenue dans le vent.

III. Modélisation du vent (source primaire)

Afin que la chaîne éolienne fonctionne et produise des puissances utilisables, elle a besoin d'une source primaire et fondamentale c'est l'énergie cinétique du vent. Le vent joue un rôle primordial pour l'étude du système de conversion d'énergie éolienne car la puissance éolienne est en fonction de sa vitesse.

Dans cette étude, afin que notre GADA fonctionne en hypo et hyper synchrone et qu'on puisse aussi valider le contrôle d'orientation des pales (pitch control) nous avons choisi un profil de la vitesse du vent représenté par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [30], [31] :

$$vv(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)) \quad (II.1)$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_n : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

$b_n \cdot w_v$: Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le range de dernier harmonique retenue dans le calcul du profil du vent

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques.

$$vv(t) = 6 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)$$

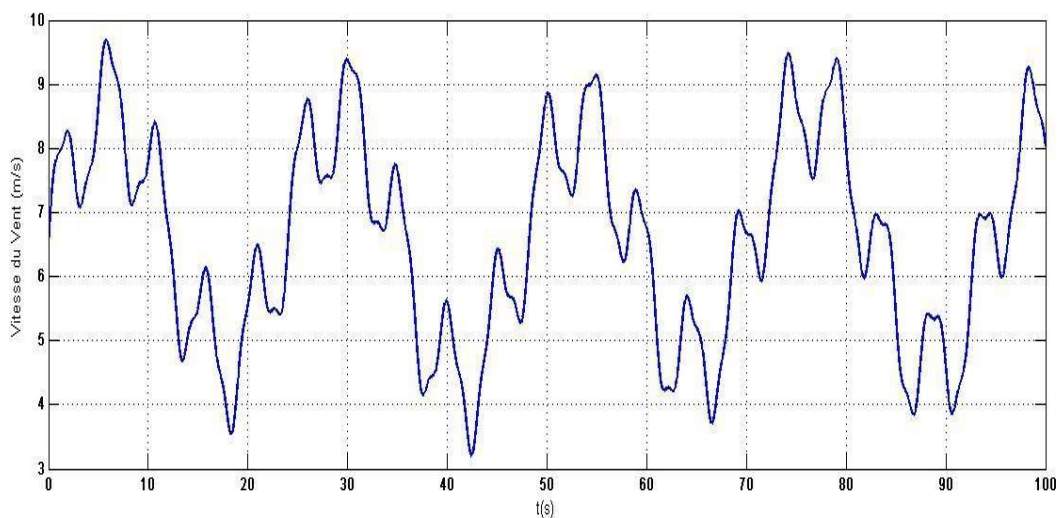


Figure II.10: Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel

IV. Modèle aérodynamique

La puissance aérodynamique d'une éolienne P_{aer} , en régime permanent selon la théorie de Betz peut être déterminée par [32]:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.2)$$

Où :

- ρ : Masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C)
- S : Surface circulaire balayée par la turbine
- V_v : Vitesse du vent.
- $C_p(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales
- β . Le ratio de vitesse λ définit comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (II.3)$$

Avec :

- Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine ;
- R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Généralement, le coefficient de puissance est fonction du rapport de vitesse de pointe et de l'angle de pas des pales. Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons une expression pour une éolienne de 2 MW , qui est donnée dans les travaux de recherche de [45]–[48]:

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (II.4)$$

Par exemple:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73(151 + 0.002\beta^{2.14} - 13.2)e^{-18.4/\lambda_i}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (II.5)$$

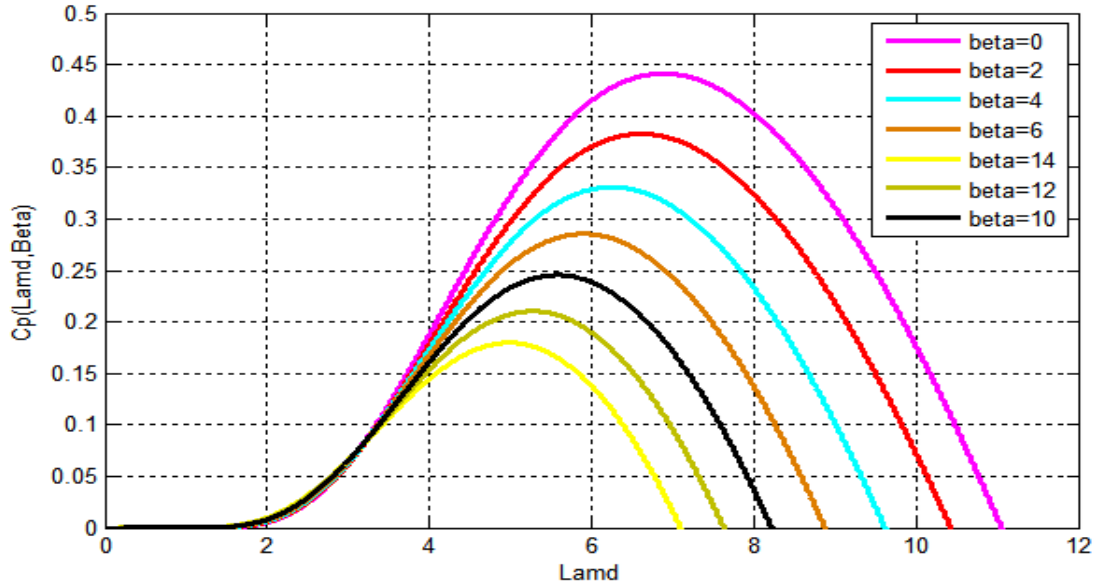


Figure II.11: Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas réglé de 2 MW, pour différents angles β

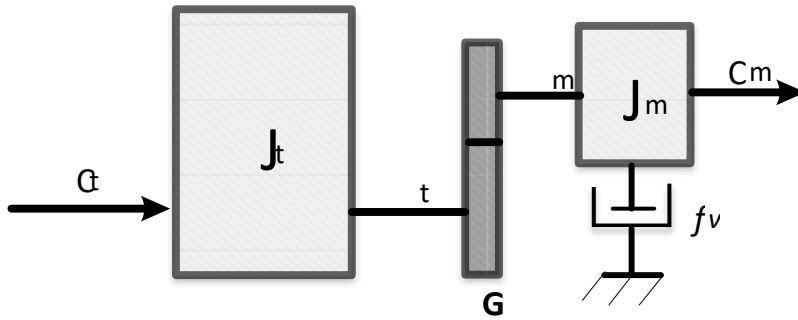
À partir de la vitesse de rotation de la turbine, nous pouvons définir le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine par l'équation suivante [43]:

$$C_t = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.6)$$

V. Modèle de la partie mécanique

Dans un système de conversion de l'énergie éolienne (SCEE), la génératrice est entraînée par une turbine à trois pales orientables de longueur R_t , tournant à une vitesse angulaire Ω_t . Un multiplicateur de vitesse, de rapport GGG, permet d'adapter cette vitesse à celle requise par la génératrice Ω_m . La modélisation mécanique du système repose sur une structure à deux masses : la première représente l'inertie du rotor de la turbine, incluant les pales et le moyeu, tandis que la seconde correspond à l'inertie du rotor de la génératrice. Ce modèle, basé sur des hypothèses dynamiques simplificatrices, permet d'étudier les interactions mécaniques entre la turbine et la génératrice via le multiplicateur, comme illustré dans la figure 12 [45] :

- Les trois pales de la turbine sont considérées identiques.
- La répartition de la vitesse du vent sur toutes les pales est considérée uniforme donc une égalité de toutes les forces de poussé.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- Les pertes de frottement de l'arbre de la turbine seront négligeables devant les pertes par frottement de l'arbre de la génératrice.



D'après la figure 12 le multiplicateur est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{C_t}{G} \quad (II.7)$$

$$C_m = \frac{\Omega_m}{G} \quad (II.8)$$

Et d'après la même figure, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la GADA peut être donnée comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f_v \cdot \Omega_m \quad (II.9)$$

On pose : $J = \frac{J_t}{G^2} + J_m$ Avec :

J : Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolien ;

- C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la GADA ;
- C_{em} : Couple électromagnétique généré par la GADA ;
- G : Gain du multiplicateur ;
- Ω_m : Vitesse mécanique de rotation de la GADA ;
- Ω_{mec} : Couple de frottement visqueux de la GADA.
- $C_f = f_v \cdot \Omega_{mec}$: Couple de frottement visqueux de la GADA

A partir des équations précédentes le schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne est représenté par la figure suivante :

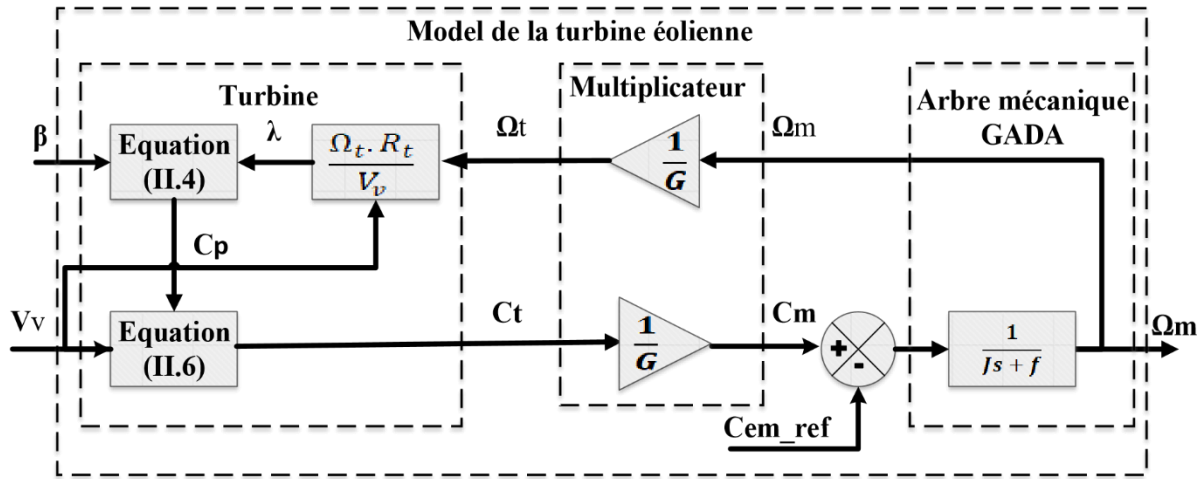


Figure II.13 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

D'après le schéma bloc de la figure 13, la vitesse mécanique de l'arbre de la GADA résulte de l'application du couple mécanique disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette vitesse peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

VI. Stratégies de commande de la turbine éolienne

IV.1. Définition de la technique MPPT

La technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) est l'une des stratégies de contrôle les plus importantes dans les systèmes d'énergie renouvelable, en particulier les éoliennes. Cette technique vise à améliorer l'efficacité de l'extraction de l'énergie éolienne en ajustant le fonctionnement de la turbine afin d'atteindre la puissance électrique maximale possible malgré les variations constantes de la vitesse du vent. Le MPPT repose sur des algorithmes de contrôle intelligents qui assurent un fonctionnement optimal du système, contribuant ainsi à augmenter l'efficacité de la production d'électricité et à maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.

IV.2. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Dans la pratique, mesurer la vitesse du vent avec précision est une tâche complexe, car l'anémomètre est positionné derrière le rotor de l'éolienne, et la zone balayée par les pales est considérablement vaste. Dans ces conditions, on adopte un contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation, basé sur l'hypothèse que la variation de la vitesse du vent en régime permanent est relativement faible par rapport aux constantes de temps électriques du système

éolien. Cela permet de considérer le couple d'accélération de la turbine comme négligeable. De plus, si l'on omet l'effet du couple dû aux frottements visqueux C_{vis} l'équation mécanique (II.9) du système éolien s'écrit alors sous la forme suivante :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_m = C_m - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II-10)$$

$$C_m = C_{em} \quad (II-11)$$

Le principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation est basé sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice, donc à partir de cette mesure on peut estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.12)$$

A partir des équations (II.12) et (II.3), on estime la valeur de la vitesse du vent comme suit :

$$V_{v_est} = \frac{R \Omega_{mec}}{\lambda} \quad (II.13)$$

À partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine (Eq. II.12) ainsi que de celle de la vitesse du vent (Eq. II.13), il est ensuite possible d'exprimer le couple développé par la turbine éolienne de la manière suivante :

$$C_{t_est} = \frac{1}{2 \Omega_{t_est}} \rho V_{v_est}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.14)$$

A partir des équations (II.8) et (II.11), on peut déterminer le couple électromagnétique de référence ou bien le couple de réglage comme suit :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{t_est}}{G} = \frac{1}{2 \Omega_{t_est}} \rho V_{v_est}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.15)$$

En remplaçant les équations (II.12) et (II.13) dans (II.15), on obtient une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2 G^3 \lambda^3} \rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta) \Omega_m^2 \quad (II.16)$$

30 Afin d'obtenir le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} pour obtenir le maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Donc le couple électromagnétique de réglage devient :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2G^3\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 C_{pmax} \Omega_m^2 \quad (II.17)$$

Dans la méthode de contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique de référence est déterminé en fonction du carré de la vitesse de rotation de la GADA. En se basant sur les relations établies précédemment, le principe de cette stratégie de commande appliquée au système éolien est représenté sous forme de schéma bloc, illustré par la figure suivante :

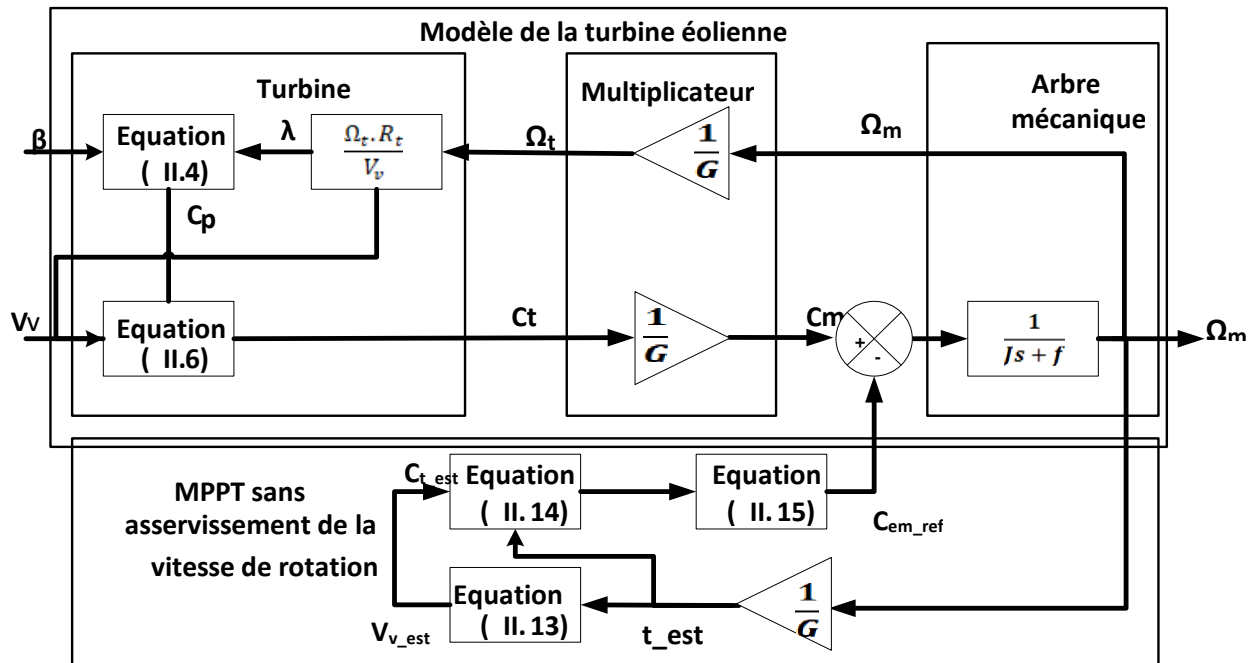


Figure II.14 : Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

IV.3. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation à base de régulateur PI

Cette approche de contrôle repose sur la mesure de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation du générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Afin d'extraire un maximum d'énergie de l'éolienne, la vitesse de rotation du générateur doit être réglée à une valeur de référence spécifique. Pour y parvenir, un couple électromagnétique de référence C_{em_ref} est généré de manière à s'opposer au couple mécanique produit par la turbine,

considéré comme une perturbation du système. Ce couple est obtenu grâce à une régulation de la vitesse de rotation, qui remplit deux fonctions essentielles au sein du système éolien :

- L'asservissement de la vitesse mécanique du rotor à sa vitesse de référence.
- Réduire l'action du couple éolien

Afin que la puissance mécanique soit maximale la valeur du coefficient de puissance

$C_p(\lambda, \beta)$ doit être maximale. Celle-ci est obtenue avec la fixation de la valeur de la vitesse spécifique à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$).

Selon l'équation II.5, la vitesse de rotation de référence de la turbine est définie comme suit :

$$\Omega_{t_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R_t} \quad (II.18)$$

En tenant compte du gain du multiplicateur, on peut déduire la référence de la vitesse de rotation de la GADA :

$$\Omega_{m_ref} = G \cdot \Omega_{t_ref} \quad (II.19)$$

Le principe de ce schéma de commande est illustré à la figure II-8, où la vitesse du vent mesurée V_v est utilisée pour produire la référence de vitesse du générateur Ω_{m_ref} en fonction du rapport de la vitesse spécifique optimal λ_{opt} . La vitesse du générateur Ω_m est contrôlée par les convertisseurs de puissance et sera égale à sa référence en régime établi, à laquelle le MPPT est atteint.

Dans le cadre de ce travail, et afin de réguler la vitesse dans ce mode de commande, un types de régulateurs ont été utilisés : l'un d'eux est de type PI.

Le contrôleur a pour rôle de réduire l'écart entre la vitesse mécanique mesurée et sa valeur de référence, en agissant sur le couple électromagnétique de la génératrice. Pour la conception du régulateur adopté, la méthode de compensation des pôles a été retenue.

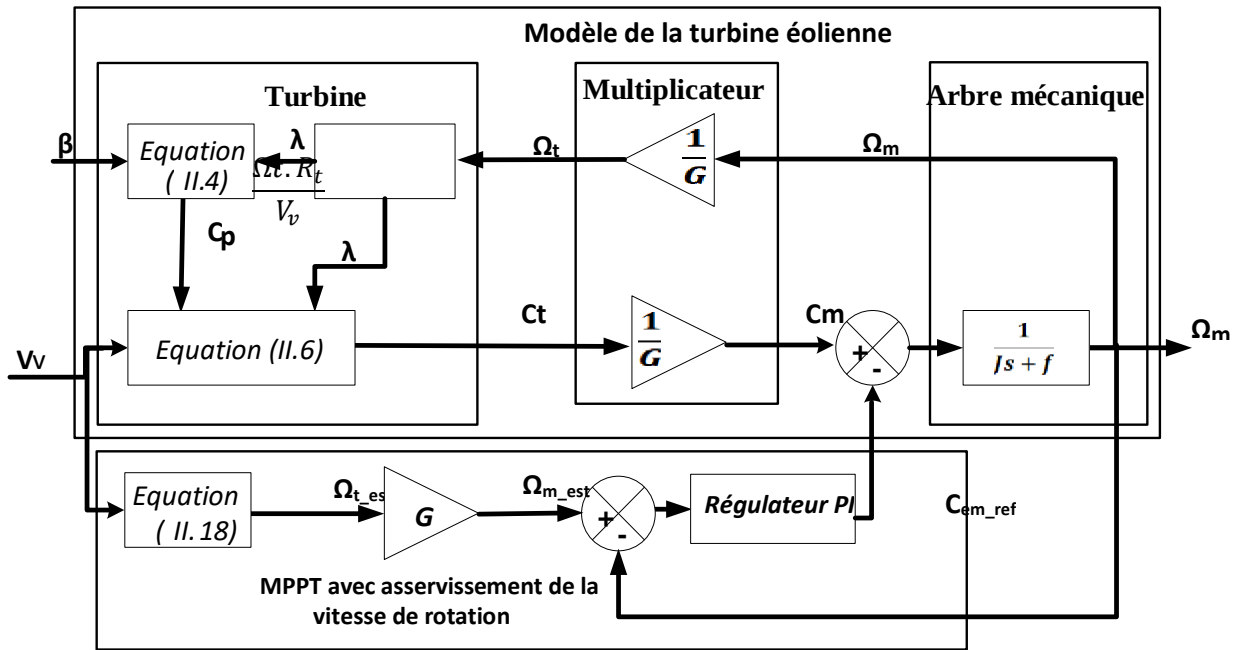


Figure II.15 : Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation de la GADA

VII. Bloc de simulation de la turbine éolienne

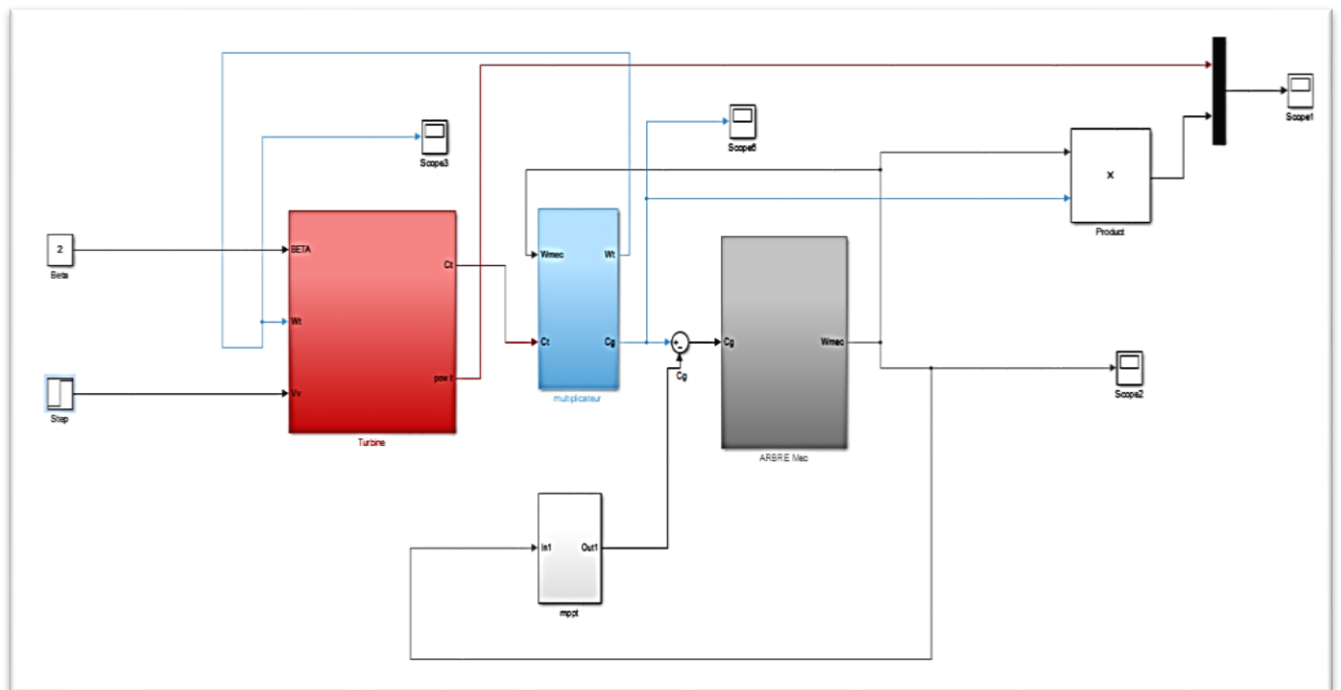


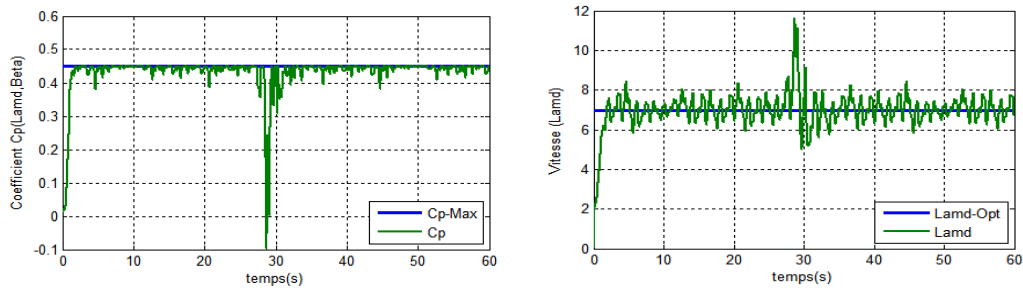
Figure II.16 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

L'ensemble des modèles représentant la turbine, incluant les pales, le multiplicateur de vitesse et l'arbre mécanique, a été simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink tout en respectant

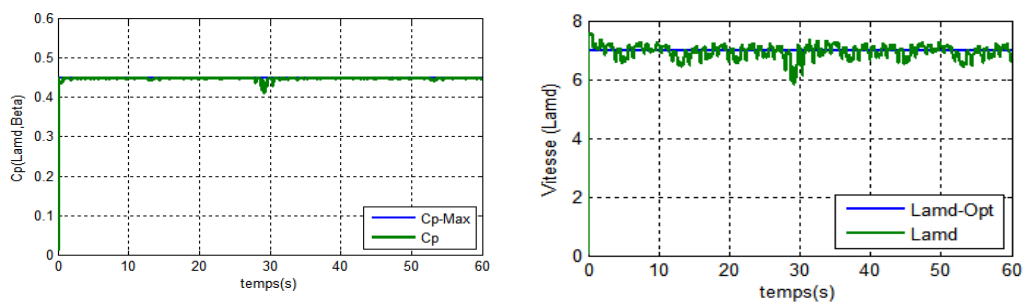
l'architecture réelle du système.

VIII. Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse et avec asservissement de vitesse

Les courbes obtenues permettent de comparer le comportement du système avec et sans régulation de la vitesse à l'aide d'un contrôleur PI. En présence du régulateur PI, on observe une stabilité significative de la vitesse mécanique autour de sa valeur de référence, ce qui permet de maintenir le coefficient de puissance C_p proche de sa valeur optimale C_{pmax} . Par conséquent, la puissance mécanique extraite reste élevée et stable. En revanche, sans régulation de vitesse, les courbes montrent des oscillations importantes de λ autour de λ_{opt} , accompagnées de baisses soudaines du C_p , ce qui entraîne une perte partielle de puissance. Cette comparaison met en évidence l'efficacité du contrôle PI dans l'optimisation de l'extraction d'énergie et la stabilité du système global.



(a) Commande MPPT sans asservissement de vitesse.

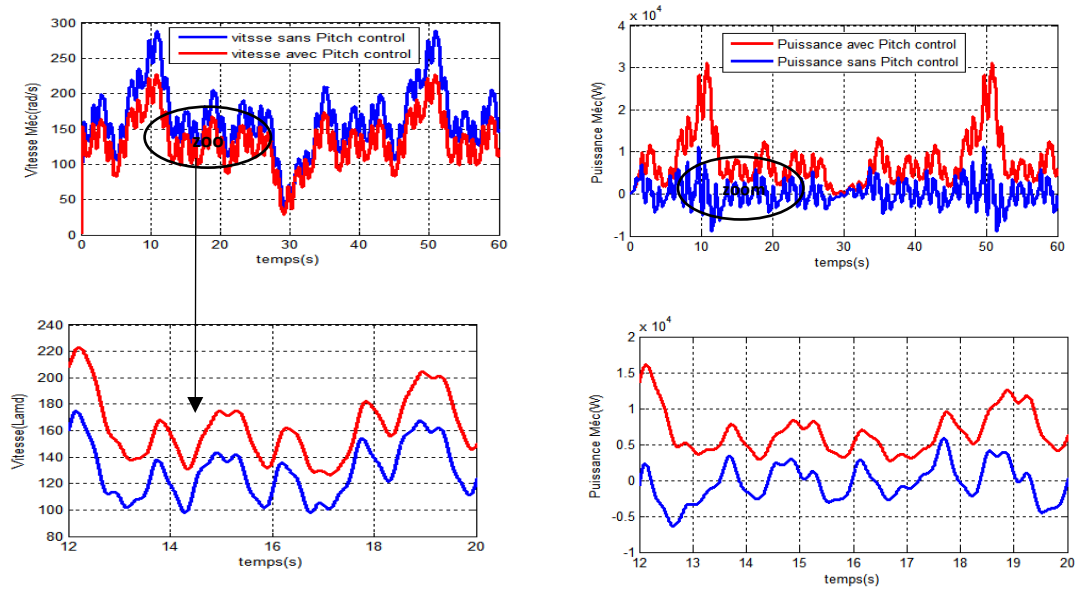


(b) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

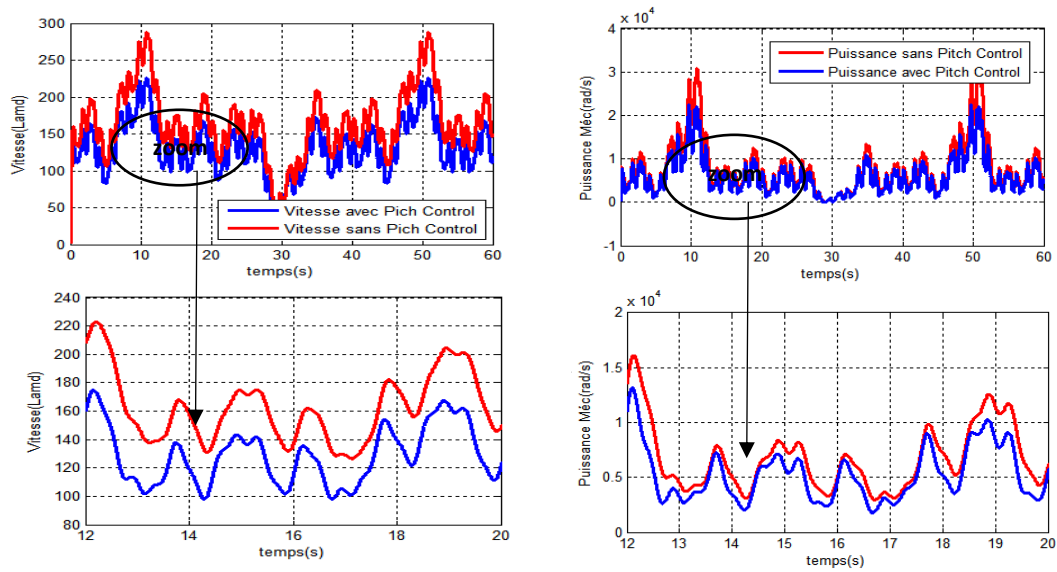
Figure II.17: Coefficient de puissance C_p (λ , β) et Vitesse spécifique λ .

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution temporelle de la vitesse et de la puissance mécanique de la turbine éolienne pour les trois stratégies de commande analysées. Il apparaît que la variation de la vitesse avec la commande GADA suit de manière cohérente les

fluctuations de la vitesse du vent, tandis que la puissance mécanique s'ajuste efficacement en fonction de l'évolution de la vitesse mécanique.



(a) Commande MPPT sans asservissement de vitesse.



(b) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI.

Figure II.18: Vitesse mécanique Ω_m et Puissance mécanique

IX. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique simplifié de l'éolienne. Ensuite, nous avons abordé la question du contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour un système éolien à vitesse variable, en utilisant deux méthodes de contrôle MPPT : la méthode : Commande MPPT sans asservissement de vitesse et Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

De plus, notre travail vise à développer et à étudier la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation et le contrôle vectoriel de cette dernière seront étudiés dans le prochain chapitre

Chaitre III : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

I. Introduction

La modélisation d'un système physique constitue une étape essentielle pour l'analyse, la compréhension et la maîtrise de son fonctionnement ainsi que son développement. Dans le cas d'une machine électrique, cette démarche permet d'appréhender son comportement dynamique et d'étudier l'interaction électromécanique de la génératrice.

Les avancées en informatique et en génie logiciel offrent aujourd'hui des outils performants pour la modélisation, facilitant ainsi l'optimisation de la conception et l'amélioration des performances des systèmes étudiés. Grâce à la modélisation, il est possible de mieux quantifier les phénomènes physiques et d'orienter efficacement les développements technologiques.

Ce chapitre propose une description détaillée de la machine asynchrone à double alimentation, en abordant sa constitution et ses différents modes de fonctionnement. L'accent sera mis sur la modélisation en mode génératrice ainsi que sur la simulation de son comportement dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

II. MODELISATION DE LA MADA

Représentation du modèle La machine asynchrone à double alimentation constituée de deux parties, un stator fixe et un rotor mobile, le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimenté par un système triphasé de tension, Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pair de pôles que celui du stator couplé

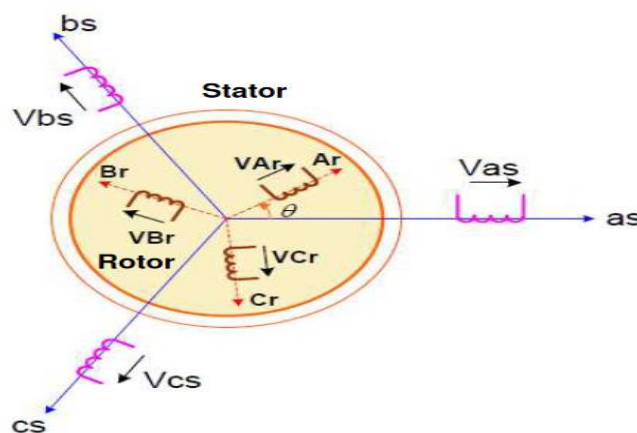


Figure III.19: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1. Equations générales de la GADA :

IV.3.1. Le modèle de la GADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à Cage d'écureuil. A cet effet, lors de la modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un Bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que les enroulements de la GADA ne sont pas en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle ne sont pas nulles [36].

II.2. Equations électriques :

Les équations des tensions statorique et rotorique sous forme matricielle s'écrivent :

a. Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\text{III. 1}]$$

b. pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad [\text{III. 2}]$$

En manière plus raccourcie :

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = -[R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \\ [v_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \end{cases} \quad [\text{III.3}]$$

Tels que

v_{sabc} : Les tensions appliquées aux phases statoriques ;

I_{sabc} : Les courants qui traversent celle-ci ;

ϕ_{sabc} : Les flux totaux à travers ces enroulements ;

Leurs résistances R_s : Pour le rotor en adoptant les mêmes notations, en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

II.3. Equations magnétique :

Les équations des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = -[L_{ss}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad [\text{III. 4}]$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = -[L_{rr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [\text{III. 5}]$$

La manière raccourcie :

$$\begin{cases} [\phi_{sabc}] = -[L_{ss}] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \end{cases} \quad [\text{III.6}]$$

Avec les matrice des inductances statoriques et rotoriques

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [\text{III. 7}]$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_s \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad [\text{III. 8}]$$

Où :

L_s : l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : l'inductance propre d'une phase rotorique ;

M_s : l'inductance mutuelle entre phase statorique ;

M_r : l'inductance mutuelle entre phase statorique ;

La matrice des inductances mutuelles entre phase statorique et phase rotorique est donné par :

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

Ou : $[M_{sr}] = [M_{rs}]$

I.2.2.2. Equations mécaniques :

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{1}{2} p [I]^T \frac{d[l]}{dt} [I]$$

: Matrice de courant total $[I]$

: Matrice inductance totale $[l]$

p : C'est le nombre des paires des pôles

$$[i] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{sr} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad [III. 10]$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants on aura :

$$C_e = p [I_s]^T \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) [I_r] \quad [III. 11]$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit : Donc,

$$\frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega$$

La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile car le système

D'équations est à coefficients variables en fonction de θ , ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé

II.4. La transformation de Park

Les transformations mathématiques comme la transformation de Park peuvent faciliter La résolution d'un tel système en transformant ces équations différentielles à paramètres Variable dans le temps en équations différentielles à paramètres constantes écrites dans un Repère à axes orthogonaux. La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des Équations des machines électriques triphasées est constitué une transformation triphasé Biphase généralisé d'un système du repère (abc) vers le repère

orthogonal (u,v) et donc D'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution Pour faire le passage d'une représentation en utilisant la matrice de transformation $p(\theta)$ cette transformation peut être appliqué aux courants, tensions, et aux flux.

La transformation est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{uvo}] = [p(\theta)][x_{abc}] \quad [III.12]$$

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad [II.13]$$

Pour le passage biphasé-triphasé il faut utiliser la matrice inverse :

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad [II.14]$$

II.5. Application la transformation de Park sur la MADA

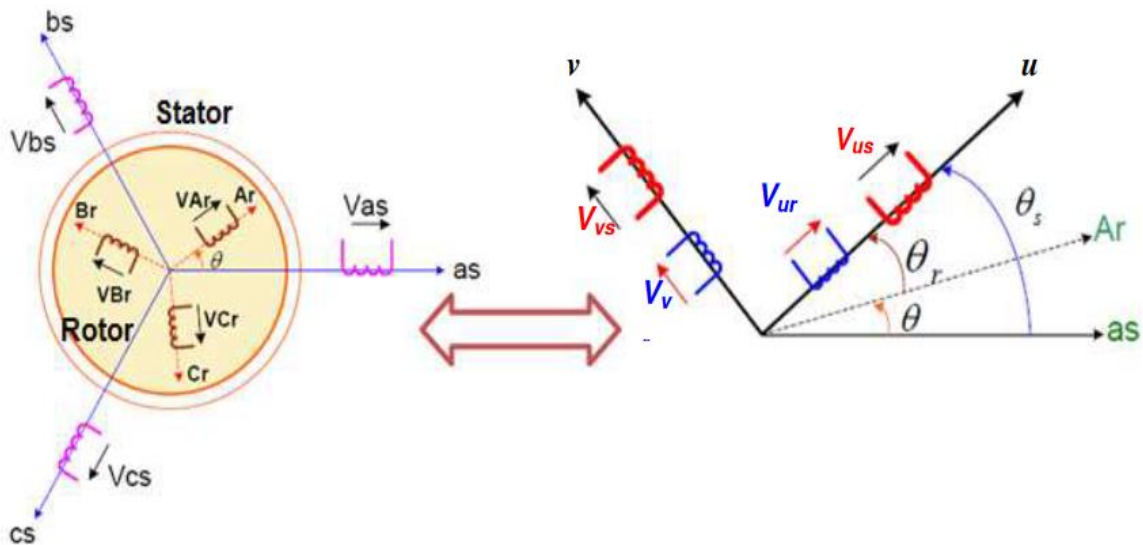


Figure III.20 : Passage du système triphasé au biphasé (abc vers uv).

La figure 20 représente la projection des trois enroulements triphasés

(as,bs,cs) d'axes fixe de la machine sur un repère mobile d'axes fictif (u,v,o) orthogonal.

Où :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A_r et l'axe statorique a_s

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A_r et l'axe directu ;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a_s et l'axe direct u ; $\theta_s = \theta_r + \theta$

L'indice o est une composante homopolaire. Le système d'axes (u,v) tournant à la vitesse $\omega_{coord} = \frac{d\theta_s}{dt}$. En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (Tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s Pour les équations du stator et θ par θ_r Pour celles du rotor [12]

$$\begin{cases} [V_{suv}] = [p(\theta_s)] \cdot [v_{sabc}] \\ [V_{ruv}] = [p(\theta_r)] \cdot [v_{rabc}] \end{cases} \begin{cases} [I_{sdq}] = [p(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \\ [I_{rdq}] = [p(\theta_r)] \cdot [I_{rabc}] \end{cases} \begin{cases} [\phi_{suv}] = [p(\theta_s)] \cdot [\phi_{sabc}] \\ [\phi_{ruv}] = [p(\theta_r)] \cdot [\phi_{rabc}] \end{cases}$$

On représente le modèle de la GADA dans le système d'axes (u,v) tournant à la vitesse ω_{coord}

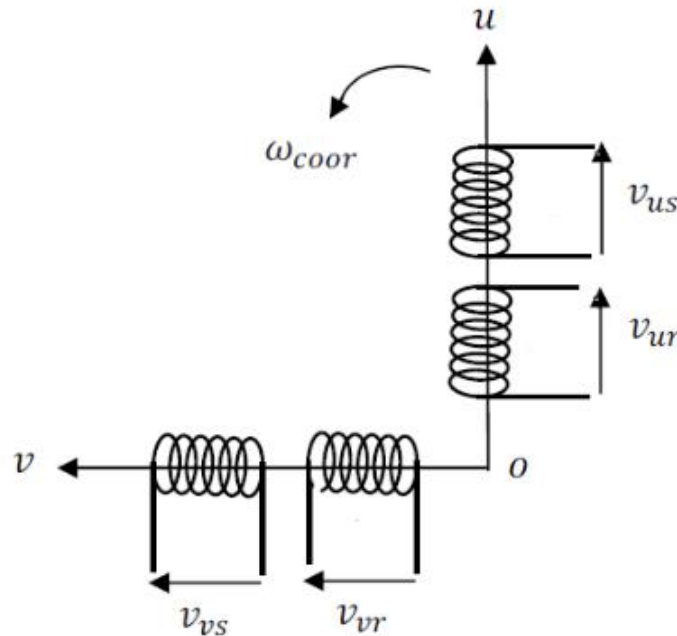


Figure III.21 : Le modèle généralisé de la GADA selon les axes (u,v).

La figure 21 représente le schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park

Généralisé (u,v)

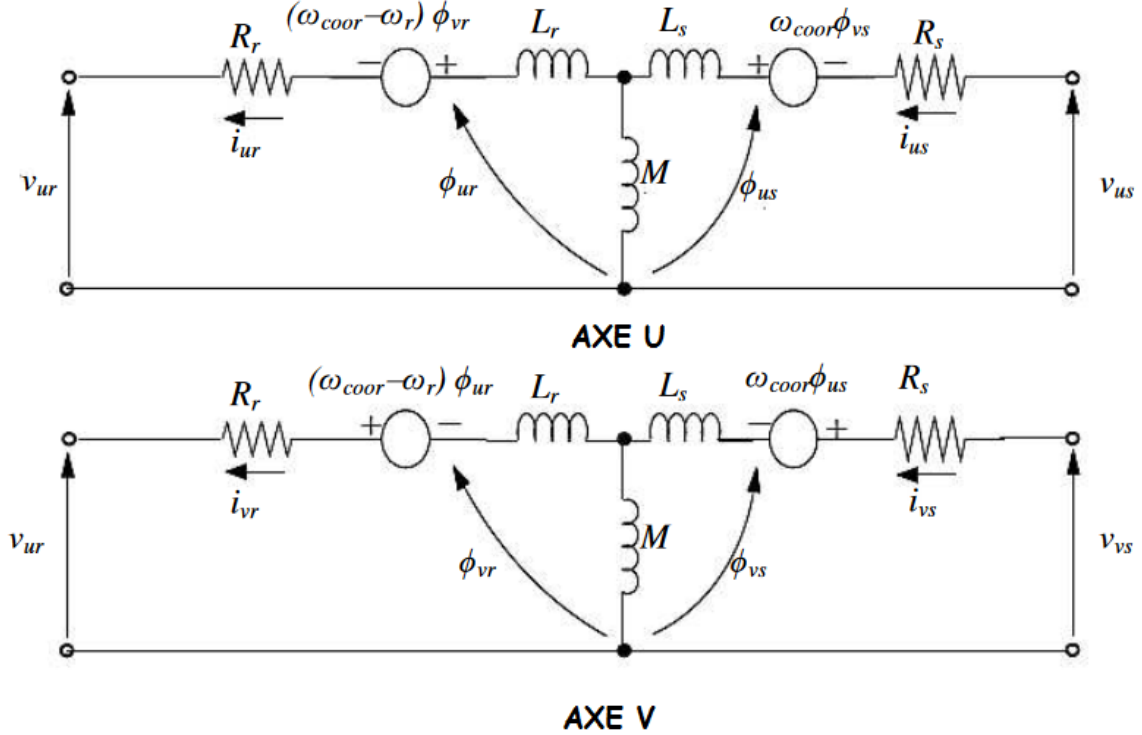


Figure III. 22: Schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé

Après développement et simplification, les tensions statoriques et rotoriques sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{us} = -R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coor} \phi_{vs} \\ v_{vs} = -R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} - \omega_{coor} \phi_{us} \\ v_{ur} = -R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = -R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{ur} \end{array} \right. \quad [III. 15]$$

Et les équations des flux magnétiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{us} = -L_s i_{us} + M i_{ur} \\ \phi_{vs} = -L_s i_{vs} + M i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} - M i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} - M i_{vs} \end{array} \right. \quad [III. 16]$$

Tel que :

L_s : Inductance cyclique statorique

L_r : Inductance cyclique rotorique

$$M = \frac{3}{2}M_{sr} = \frac{3}{2}M_{rs}$$

III. Choix du référentiel

Il y a trois systèmes d'axes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes

Généralisé (u,v). Ces systèmes d'axes sont :

- Le système d'axes (α, β) lié au stator, alors $\omega_{coor} = 0$

- Le système d'axes (x,y) lié au rotor $\omega_{coor} = \omega$

- Le système d'axes (d,q) lié par rapport au champ tournant c.-à- $\omega_{coor} = \omega_s$ Utilisation de ce système d'axes lié par rapport au champ tournant dernier système est recommandée Généralement pour étudier les machines asynchrones, en particulier celles qui sont Commandées par des convertisseurs de fréquence [37].

IV. Modèle de la GADA référentiel lié au champ tournant :

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié Au champ tournant comme suit :

IV.1. Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_{qs} \phi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} - \omega_{ds} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad [III.17]$$

IV.2. Equations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = -L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = -L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = -L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad [\text{III. 18}]$$

IV.3. Equations mécaniques :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ j \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad [\text{III. 19}]$$

IV.4. Mise du modèle biphasé sous forme d'état :

Si en remplaçant les flux par leurs expressions (II. 16) dans le système d'équations des

Tensions (II.15) on obtient [37].

$$\begin{cases} v_{su} = -R_s i_{su} - L_s \frac{di_{su}}{dt} + M \frac{di_{ru}}{dt} + \omega_{coor} L_s i_{sv} - \omega_{coor} M i_{rv} \\ v_{sv} = -R_s i_{sv} - L_s \frac{di_{sv}}{dt} + M \frac{di_{rv}}{dt} + \omega_{coor} L_s i_{su} + \omega_{coor} M i_{ru} \\ v_{ru} = -R_r i_{ru} - L_r \frac{di_{su}}{dt} - M \frac{di_{sv}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{rv} + (\omega_{coor} - \omega_r) M i_{su} \\ v_{rv} = R_r i_{rv} + L_r \frac{di_{ru}}{dt} - M \frac{di_{su}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{ru} - (\omega_{coor} - \omega_r) M i_{sv} \end{cases}$$

Posons $\omega_m = \omega_{coor} - \omega$

En mettant le système d'équations précédant sous forme compacte, on obtient :

$$[B][U] = [L][i] + \omega_m [C][I] + [D][I] \quad [\text{III. 20}]$$

Avec :

$$U = [v_{su} v_{sv} v_{ru} v_{rv}]^T; [I] = [I_{su} I_{sv} I_{ru} I_{rv}]^T; [i] = \frac{d}{dt} [I]$$

$$[B] = \text{diag}[1111];$$

$$[L] = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_{coor}L_s & 0 & -\omega_{coor}M \\ -\omega_{coor}L_s & -R_s & \omega_{coor}M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant [II. 20] sous forme d'état, on trouve :

$$[i] = [L]^{-1}\{[B][U] - [D][I] - \omega_m[C][I]\} \quad [\text{III. 21}]$$

V. SIMULATION DE LA MADA :

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné à la figure III.23, dont les Paramètres sont donnés en l'annexe, la tension rotorique imposé par une façon sinusoïdale. La turbine éolienne couplé avec la machine asynchrone à double alimentation (MADA); Le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé (398/690 V/ 50 Hz), le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI.

Les figures III.24-25-26 présentent les résultats de simulation de la génératrice couplée à la turbine éolienne.

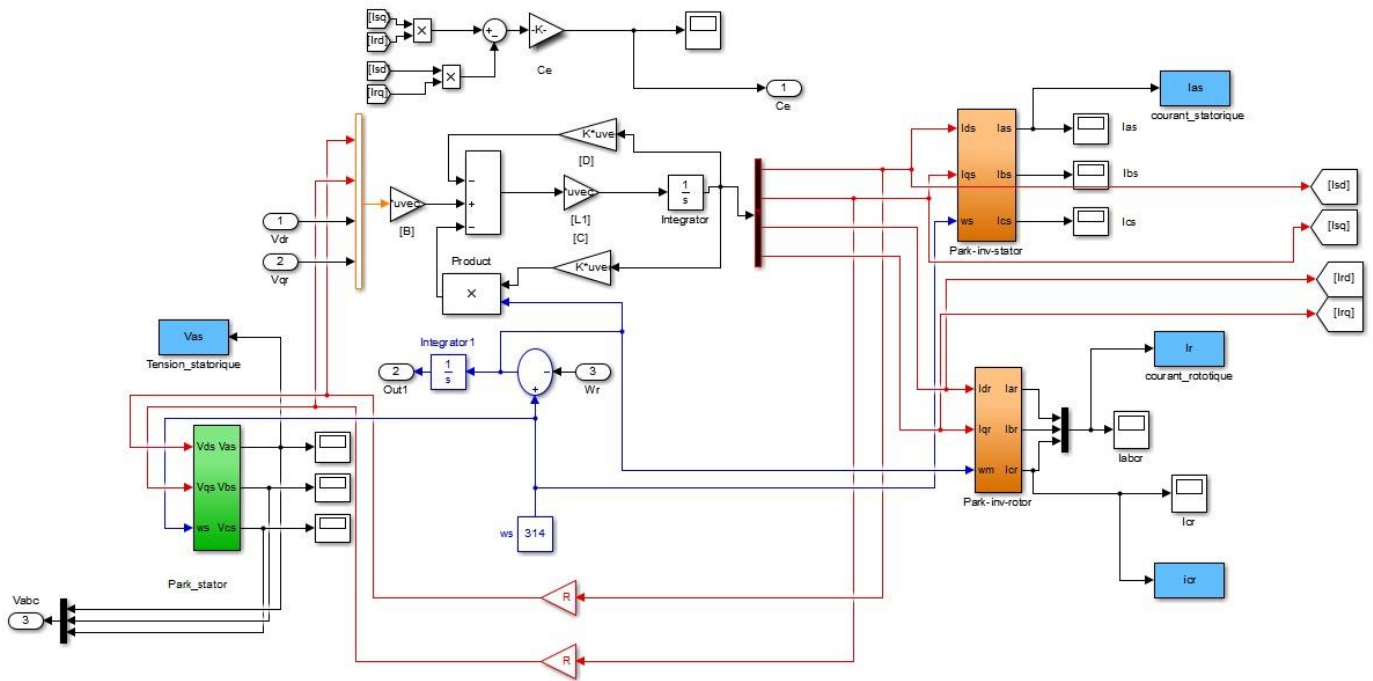


Figure III.23 : Schéma bloc de simulation de la GADA

V.1. Résultat de la simulation :

Les résultats de simulation de la MADA à rotor bobiné obtenus sont représentés dans les figures comme suit :

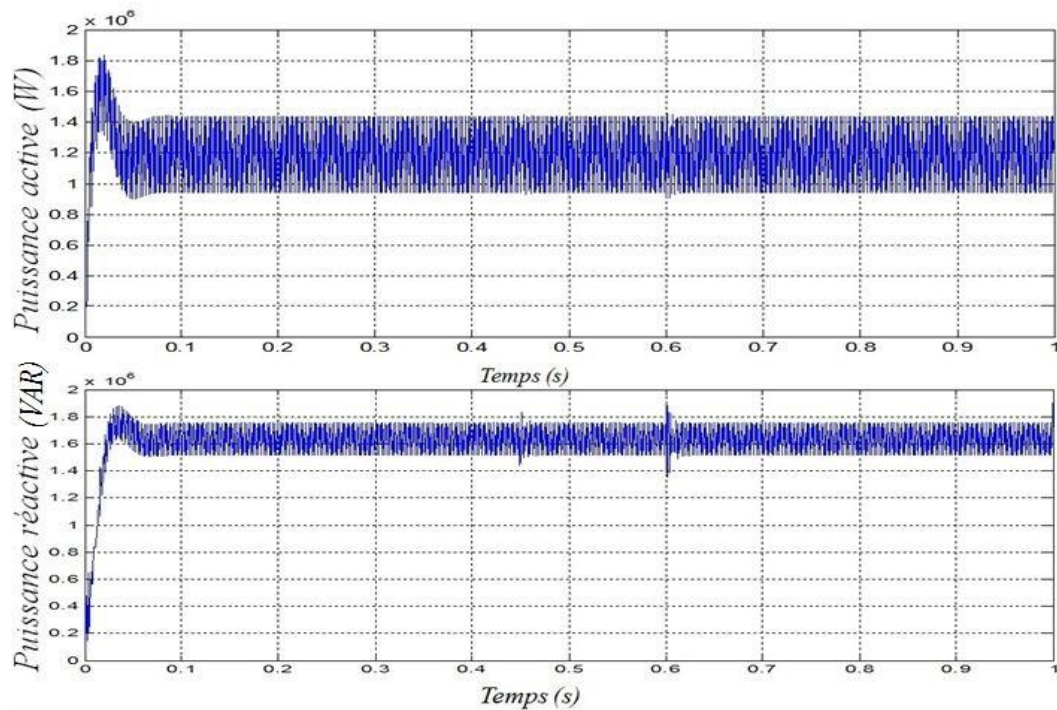


Figure III.24: La puissance active et réactive.

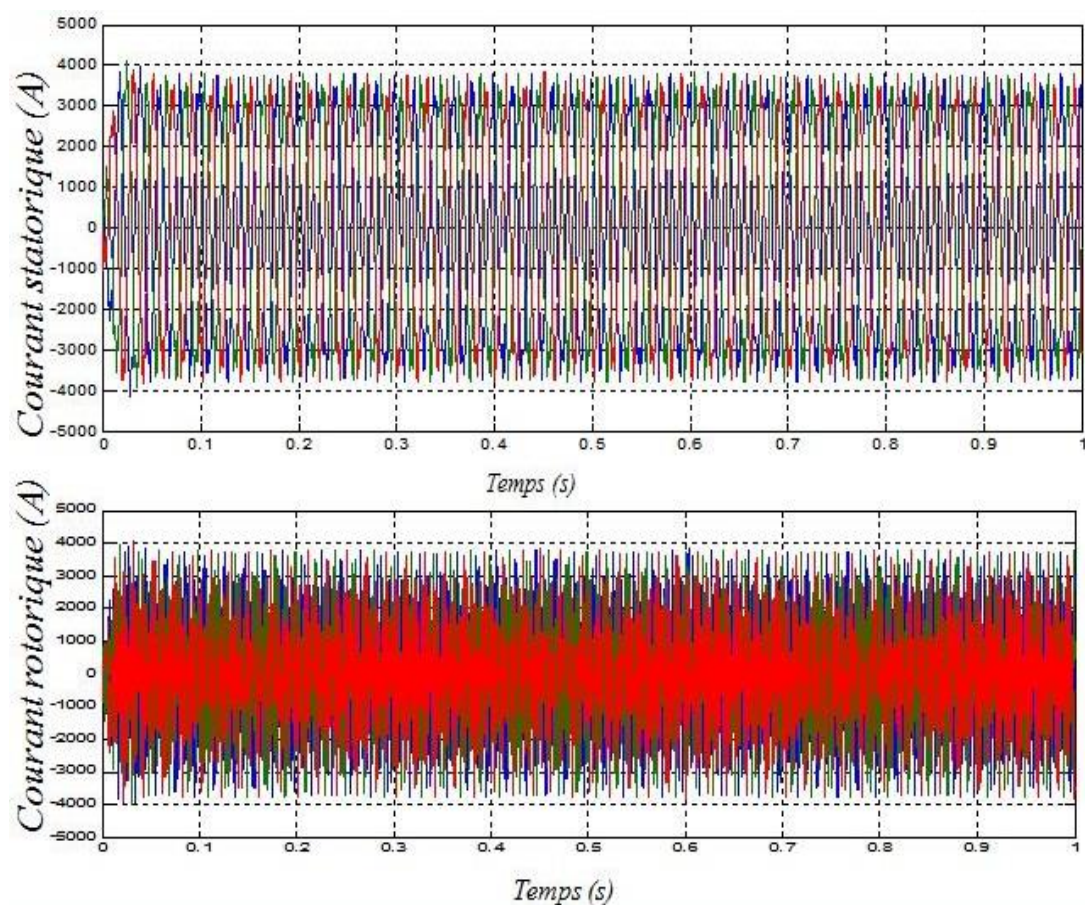


Figure III. 25: Les courants statorique et rotorique.

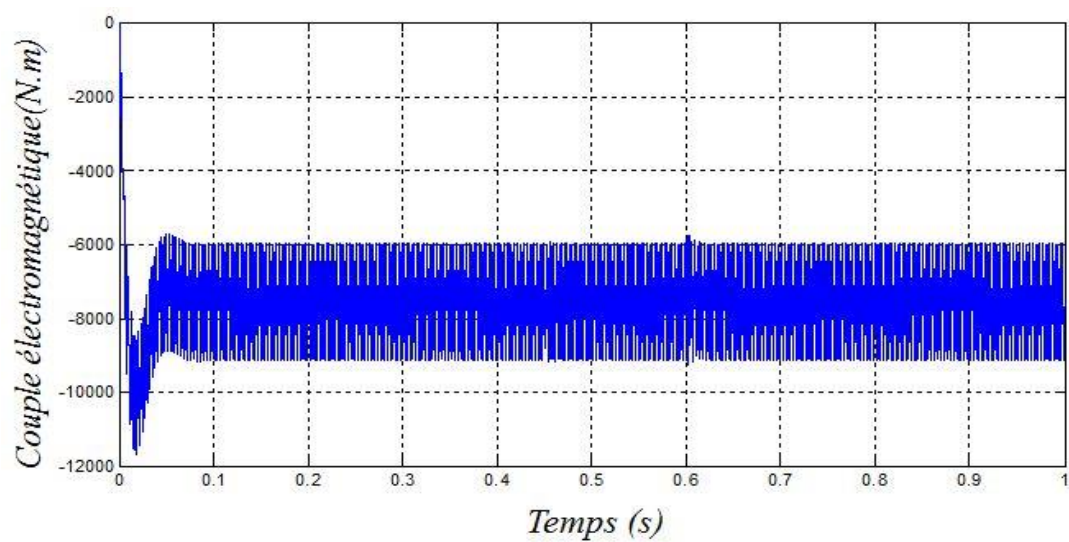


Figure III.26: Couple électromagnétique.

V.2. Interprétation des résultats :

Les figures III.24-25-26 montrent respectivement : La puissance active, la puissance réactive, le courant rotorique, le courant statorique ainsi que le couple électromagnétique de la MADA.

Les résultats obtenus montrent bien la non linéarité du système et le couplage existant entre les différentes variables de la MADA dans les puissances active et réactive, les courants rotorique et statorique, et ainsi couple électromagnétique à l'instant $t=0.6s$.

Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère plus de l'énergie réactive que l'énergie active ce qui donne un facteur de puissance plus loin de l'unité ($\cos\phi = 0.20$) et détériore le facteur de puissance global du réseau.

Donc, pour éliminer le couplage existant, on introduit la commande vectorielle qui permet d'avoir un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

VI. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter une étude approfondie de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en détaillant sa structure interne ainsi que ses principaux modes de fonctionnement. Par la suite, la modélisation de la machine en mode générateur a été développée, en s'appuyant sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en utilisant la transformation de Park, afin d'obtenir un modèle basé sur un circuit électrique équivalent.

Une simulation numérique de la génératrice a ensuite été réalisée à l'aide de l'environnement MATLAB/SIMULINK, permettant d'analyser son comportement dynamique dans les conditions étudiées.

Chapitre IV : Commande vectorielle de la MADA

I. Introduction

Le contrôle des machines à courant alternatif peut être réalisé selon deux approches principales: une méthode classique, dite scalaire, et une méthode moderne, représentée par la commande vectorielle ou encore la commande directe du couple (DTC). Parmi ces approches, la commande vectorielle s'impose comme l'une des techniques les plus répandues et les plus performantes pour le pilotage des machines électriques [35].

Cette méthode vise à piloter la machine asynchrone de manière similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante. Dans le cas spécifique de la commande vectorielle appliquée à la DFIG, l'objectif est de contrôler précisément les échanges d'énergie, notamment la gestion des puissances active et réactive injectées dans le réseau.

Ce chapitre est consacré au développement de la commande vectorielle orientée flux statorique appliquée à la GADA dans le repère (d, q). Nous y présentons le principe de fonctionnement de cette commande ainsi que sa mise en œuvre pratique sur la génératrice

II. LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA :

L'objectif principal de la commande vectorielle est d'améliorer leur comportement statique et dynamique. Le nom de cette commande vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence de la commande scalaire ces relations ainsi obtenues sont plus complexes mais par-contre elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Cette technique existe pour les machines à courant alternatif [38] .

II.1.Principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle a été découvert par Blaschke en 72 [39]. Il ramène le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu à cause de son caractère spécial lié au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et de couple par le courant d'induit. Cette assimilation présente une qualité intrinsèque car elle permet un contrôle séparé du flux et du couple.

La figure IV.28 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée de la machine à courant continu et la commande vectorielle d'une Machine asynchrone

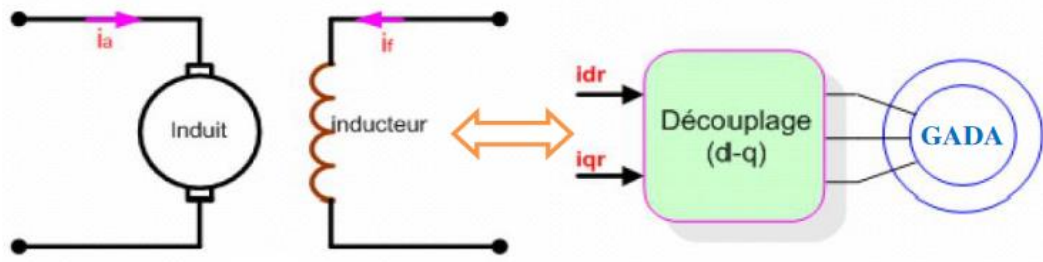


Figure IV.27 : Principe de la commande vectorielle

II.2. La commande par orientation de flux :

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux. Cette opération permet de découpler des grandeurs internes dans la machine. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent et donner une souplesse du contrôle indépendant du flux et du couple du moteur ou des puissances active et réactive du générateur. Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissance active et réactive de la Génératrice asynchrone à double alimentation. Il est possible d'orienter les différents flux de la machine comme suit :

- Le flux rotorique. $\phi_{rd} = \phi_r$; $\phi_{rq} = 0$
- le flux statorique. $\phi_{sd} = \phi_s$; $\phi_{sq} = 0$
- Le flux d'entrefer. $\phi_{gd} = \phi_g$; $\phi_{gq} = 0$

Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est consacré sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande [40].

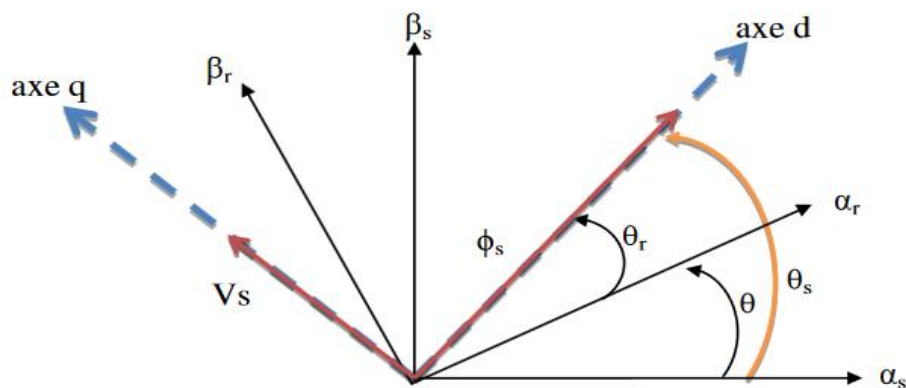


Figure IV.28 : Orientation de flux statorique sur l'axe d.

II.3. Les méthodes de contrôle par flux orienté

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse...etc. Pour cela, Deux approches sont envisageables.

- La commande vectorielle direct
- La commande vectorielle indirecte

II.4. Commande directe

La position du flux à orienter est mesurée électriquement en utilisant un capteur Physique de flux ou un modèle dynamique de flux

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

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

II.5. Commande indirecte :

Dans cette commande, les courants rotoriques sont estimés à partir de la mesure de Puissances active et réactive. Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la Sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation duCircuit magnétique et la variation de la température.

III. MODELE DE LA GADA AVEC ORIENTATION DE FLUXSTATORIQUE

Pour faire l'orientation du flux statorique on rappelle d'abord le système d'équations Différentielles de la machine dans le référentiel (d,q) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad [IV. 1]$$

En orientant l'un des flux, le modèle obtenu de la GADA se simplifie et le dispositif de Commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu

En orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul

$$\Phi_{qs} = 0.$$

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s di_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad [\text{IV.2}]$$

L'expression des flux statoriques sera :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = -L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = -L_s i_{qr} + M i_{qr} \end{cases} \quad [\text{IV.3}]$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique, on obtient

Les expressions suivantes des courants statoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{\Phi_{ds}}{L_s} + \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = \frac{M i_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad [\text{IV.4}]$$

En remplaçant dans les équations des flux rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) i_{dr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} = L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) i_{qr} = -L_r \sigma i_{qr} \end{cases} \quad [\text{IV.5}]$$

σ : est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad [\text{III.6}]$$

En intégrant les équations des courants statoriques et des flux rotoriques dans les équations des tensions statoriques ainsi que celles du rotor, on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} M i_{dr} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} M i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad [\text{IV.7}]$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} i_{dr} + \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \phi_{ds} - L_r (\omega_s - \omega_r) \sigma i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} i_{qr} + \frac{M}{L_s} (\omega_s - \omega_r) \phi_{ds} + M_r (\omega_s - \omega_r) \sigma i_{dr} \end{cases} \quad [\text{IV.8}]$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{dr} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \frac{d}{dt} i_{qr} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q - e_\phi) \end{cases} \quad [\text{IV.9}]$$

Avec les f.é.m :

$$\begin{cases} e_d = \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \phi_{ds} - L_r (\omega_s - \omega_r) \sigma i_{qr} \\ e_\phi = \frac{M}{L_s} (\omega_s - \omega_r) \phi_{ds} \\ e_q = L_r (\omega_s - \omega_r) \sigma i_{dr} \end{cases} \quad [\text{IV.10}]$$

D'autre part l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_e = -\frac{3}{2} p \left(\frac{M}{L_s} \right) \phi_{ds} i_r \quad [\text{IV.11}]$$

Si l'on néglige la résistance du stator, ce qui est une hypothèse valable pour les machines de moyennes et grandes puissances utilisées dans l'énergie éolienne. Donc on

simplifie les expressions des tensions statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d}{dt} \phi_{ds} \\ v_{qs} = \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad [\text{IV.12}]$$

Si on suppose que le réseau électrique est stable, ayant pour tension simple v_s et pour ω_s pulsation (supposée constante), cela conduit à un flux statorique constant ϕ_{ds} , avec une variation nulle en régime établi, ce qui permet d'écrire :

$$v_{ds} = 0; v_{qs} = \omega_s \phi_{ds} \quad [\text{IV.13}]$$

Alors :

* Relations de découplage

$$\begin{cases} e_{d-ref} = -L_r \sigma (\omega_s - \omega_r) \cdot i_{qr-ref} \\ e_{q-ref} = L_r \sigma (\omega_s - \omega_r) \cdot i_{dr-ref} \end{cases} \quad [\text{IV.14}]$$

* Les régulateurs des courants rotoriques :

$$\begin{cases} v_{d-ref} = PI \cdot (i_{dr-ref} - i_{dr}) \\ v_{qr-ref} = PI (i_{qr-ref} - i_{qr}) \end{cases} \quad [\text{IV.15}]$$

IV. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad [\text{IV.16}]$$

Avec $v_{ds} = 0$ et en remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions, avec $\phi_s = v_s / \omega_s$ on

Obtient :

$$\begin{cases} P_s = v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -\frac{v_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{M}{L_s} v_s i_d \end{cases} \quad [\text{IV.17}]$$

$$\begin{cases} P_{s\text{ ref}} = v_s \frac{M}{L_s} i_{qr\text{ ref}} \\ Q_{s\text{ ref}} = -\frac{v_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{M}{L_s} v_s i_{dr\text{ ref}} \end{cases} \quad [\text{ IV.18}]$$

* Les régulateurs des puissances statoriques :

$$\begin{aligned} i_{dr\text{-ref}} &= PI. (Q_{s\text{-ref}} - Q_s) \\ i_{qr\text{-ref}} &= PI. (P_{s\text{-ref}} - P_s) \end{aligned} \quad [\text{ III.19}]$$

V. Relation entre tensions et courants rotoriques

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les expressions flux rotoriques, on aura :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad [\text{ IV.20}]$$

On introduit les expressions des flux rotoriques d'axe d et q dans les expressions des tensions rotoriques diphasées. Nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad [\text{ IV.21}]$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courant rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad [\text{ IV.22}]$$

Avec :

v_{dr}, v_{qr} : sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine
obtenir les courants rotoriques voulus ;pour

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes ;

$g\omega_s \frac{Mv_s}{\omega_s L_s}$: Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation

D'après (IV.18), la commande vectorielle de la DFIG revient alors à contrôler les deux puissances P_s et Q_s par les composantes v_{dr} et v_{qr} . A Partir des équations (IV.17) et (IV.22), on peut établir le schéma bloc de la GADA [40].

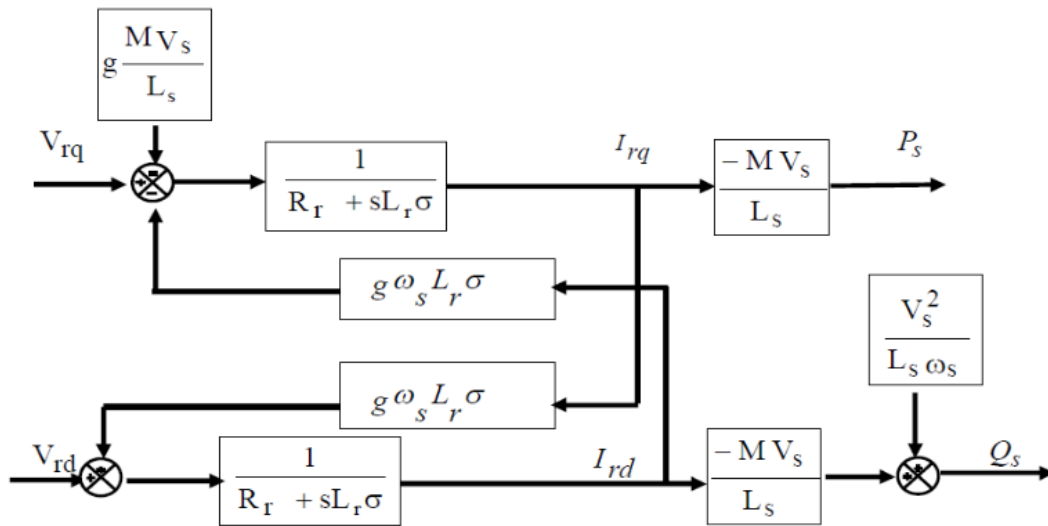


Figure IV.29 : Schéma bloc de la GADA sous les contraintes du flux et de la tension

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique on considère les tensions rotoriques v_{dr}, v_{qr} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques i_{dr}, i_{qr} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne p_{ref} et ϕ_{ref} . Donc on peut également envisager une commande vectorielle de la MADA basée sur un contrôle des puissances actives et réactives au rotor.



Figure IV.30 : Bloc du F.O.C (field-oriented control).

Si l'on observe le schéma de la Figure IV.31 on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{Mv_s}{L_s}$. Le modèle (IV.22) est non linéaire à cause des termes de couplages $g\omega_s L_r \sigma i_q r$ et $g\omega_s L_r \sigma i_d r$. Ces termes de couplage sont généralement considérés comme des perturbations qu'il convient de compenser afin de réaliser une commande découplée, c'est-à-dire en supprimant les interactions entre les commandes de la puissance directe et en quadrature.

VI. Commande vectorielle en puissance

Dans le but de simplifier la synthèse des régulateurs, plusieurs hypothèses ont été formulées afin de linéariser et d'alléger le modèle de la MADA. La première consiste à négliger les termes de couplage, ce qui permet de considérer les deux axes comme découplés. Autre simplification est de considérer le terme $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ comme étant constant, en supposant que le réseau est stable et suffisamment puissant. Par conséquent, cette constante n'intervient pas dans la loi de commande. Ces hypothèses de travail permettent ainsi de transformer un problème de commande multivariable en deux problèmes monovariabiles [41]. (Figure 32).

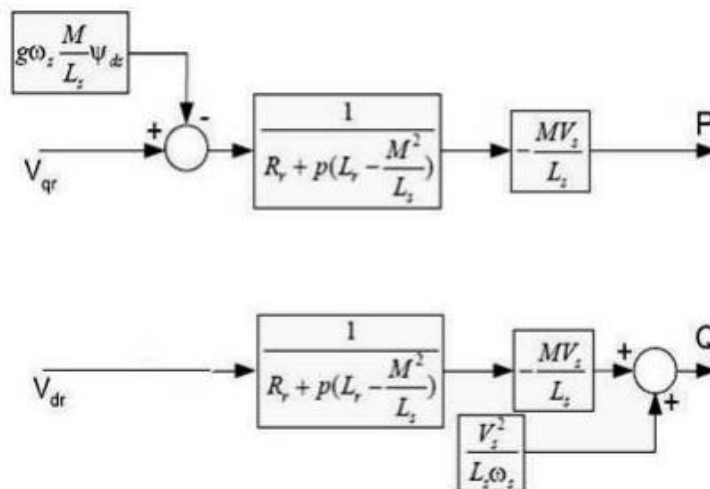


Figure IV.31 : Modèle simplifié de la DFIG.

Voici une reformulation de ton texte, en le rendant plus fluide tout en préservant la clarté technique

: À partir du modèle précédent, deux approches distinctes émergent pour la commande des puissances de la DFIG :

- La méthode directe** consiste à réguler indépendamment chaque axe pour contrôler les puissances. Les régulateurs de cette méthode agissent directement sur les tensions rotoriques, d'où le nom explicite de ce type de commande.

- La méthode indirecte** repose sur la régulation indirecte des courants rotoriques. La consigne dans cette méthode est estimée à partir des puissances de référence, et le retour est effectué à partir des courants rotoriques mesurés, en utilisant les composantes directes et quadratures.

Il est important de noter qu'il existe d'autres configurations, comme la linéarisation autour d'un point de fonctionnement, qui ne tiennent pas compte des hypothèses simplificatrices. Toutefois, les performances obtenues avec ces configurations ne surpassent pas celles du modèle simplifié [13].

VI.1. Commande directe

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la DFIG, dans lequel on négligera les termes de couplages. Le schéma de la figure 33 présente le principe de la commande dite directe.

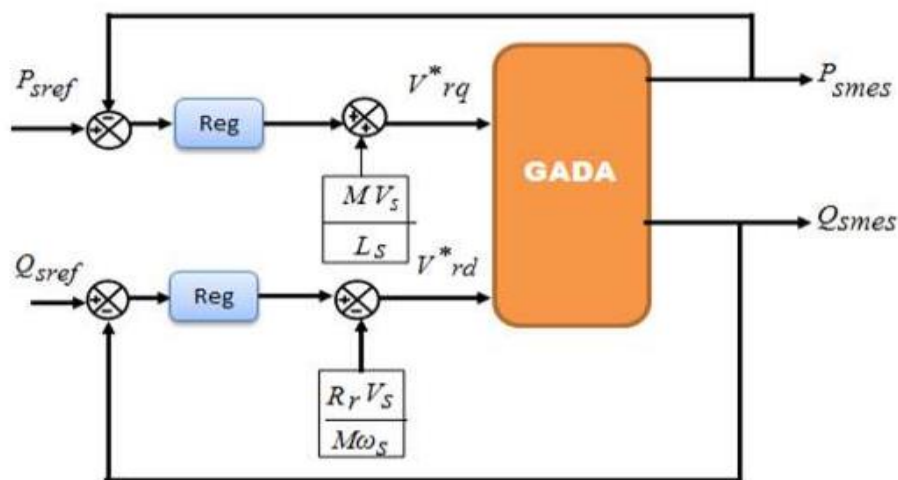


Figure IV.32: commande vectorielle directe.

Les blocs **Reg** représente les régulateurs des puissances actives et réactive. Le but de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées, et une bonne robustesse. Pour atteindre ces objectifs on utilise des régulateurs *PI* [42].

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation.

VI.2. Type de régulateur utilisé (Proportionnel-Intégral)

Pour la commande en boucle fermée, des régulateurs classiques de type **PI** (Proportionnel-Intégral) sont employés. Ce type de régulateur permet d'éliminer l'erreur statique grâce à l'action intégrale, tout en assurant une réponse rapide via l'action proportionnelle [43]. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs sont la puissance active et la puissance réactive.

Le contrôle des puissances est réalisé à l'aide des régulateurs présentés dans la Figure 33. Ce régulateur est simple et rapide à mettre en œuvre. La Figure 34 illustre le régulateur **PI** avec sa fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO).

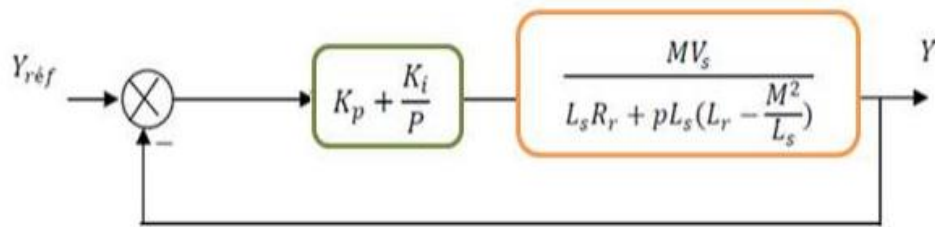


Figure IV.33: Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur s'écrit de la manière suivante :

$$\text{FTBO} = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{IV.23})$$

Par la méthode de compensation $\frac{K_i}{K_p} = L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ on obtient la FTBO suivant :

$$FTBO = \frac{Kp \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (IV.24)$$

Et la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{\tau_{BF} p} \quad \text{Avec } \tau_{BF} = \frac{I}{K_P} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad (IV.25)$$

Avec τ_{BF} représentant le temps de réponse du système, celui-ci est fixé à 10 ms [42]. Ce choix correspond à une valeur suffisamment rapide pour l'application sur l'éolienne, où les variations de la vitesse du vent sont relativement lentes et où les constantes de temps mécaniques sont importantes.

À partir de l'équation (IV.24), il est possible de déterminer les gains Kp et Ki en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse.

$$Kp = \frac{I}{\tau_{BF}} \frac{L_s(L_s - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad Ki = \frac{I}{\tau_{BF}} \cdot \frac{R_s L_s}{MV_s} \quad (IV.26)$$

La grandeur principale à contrôler avec une grande dynamique est la puissance active, car elle permet à la machine de fonctionner à sa puissance maximale, assurant ainsi un bon rendement global du système. Toutefois, il est également essentiel de contrôler efficacement la puissance réactive. Ainsi, la consigne de la puissance réactive doit être maintenue à zéro afin de garantir un facteur de puissance unitaire du côté du stator [40].

VI.3. Commande indirecte

Afin d'améliorer la commande précédente, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la DFIG en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplage $g\omega_s L_r \sigma i_q$ et $g\omega_s L_r \sigma i_d$ considérés comme étant des perturbations non négligeables, et seront compensés. La commande, ainsi découplée, est réalisée au moyen de régulateurs PI . Il existe deux méthodes de découplage en boucle ouverte et en boucle fermée pour contrôler les puissances statoriques. En boucle ouverte, les puissances ne sont pas contrôlées et elles le deviennent en boucle fermée.

VI.3.1. La commande indirecte en boucle ouverte

Le schéma du système de commande avec découplage de la machine est présenté dans la Figure III.8. Dans cette méthode, le découplage s'effectue au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques, sans retour d'information au système. Cela est réalisé en imposant les tensions de référence v_{rd}^* et v_{rq}^* appropriées. Ainsi, la commande par boucle imbriquée (interne) contrôle le le courant rotorique est ensuite appliqué à la DFIG pour des raisons de sécurité de fonctionnement [44]. De plus, la commande indirecte, sans bouclage de puissance (en boucle ouverte), permet de contrôler séparément les courants i_{dr} et i_{qr} en boucle fermée, tandis que les puissances p_s et ϕ_s sont contrôlées en boucle ouverte. Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même manière que pour la commande directe et sont identiques pour chaque axe.

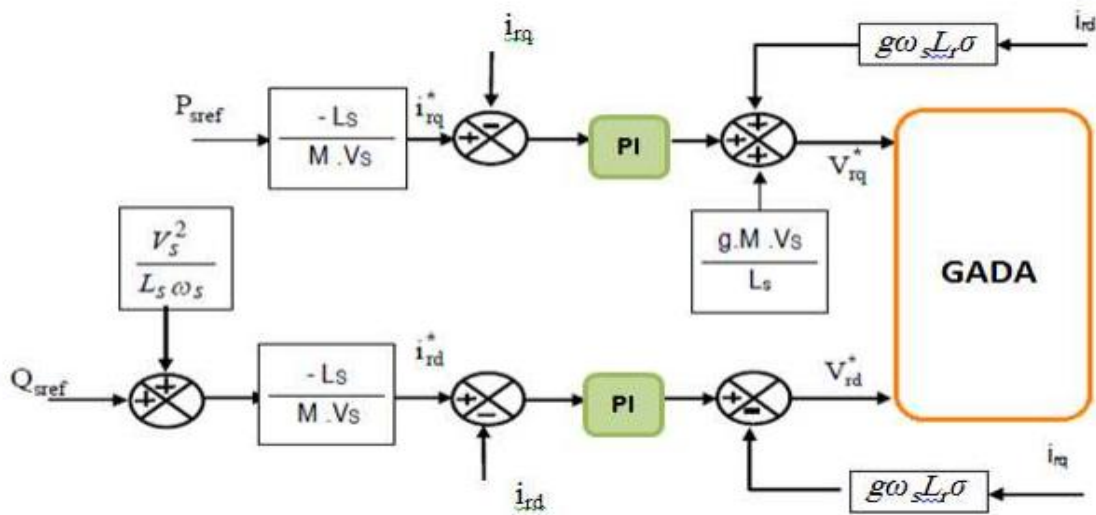


Figure IV.34 :Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.

VI.3.2. La commande indirecte en boucle fermée :

Dans cette méthode, le découplage s'effectue au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique, avec un retour d'information du système qui permet le réglage des puissances. Ainsi, on distingue une commande par boucle en cascade, où la puissance et le courant rotorique sont contrôlés pour chaque axe. Cette approche permet de gérer séparément les courants i_{rd} et i_{qr} , ainsi que les puissances ϕ_s et p_s en boucle fermée. Le schéma simplifié du système de commande avec découplage de la machine est illustré dans la Figure IV.35.

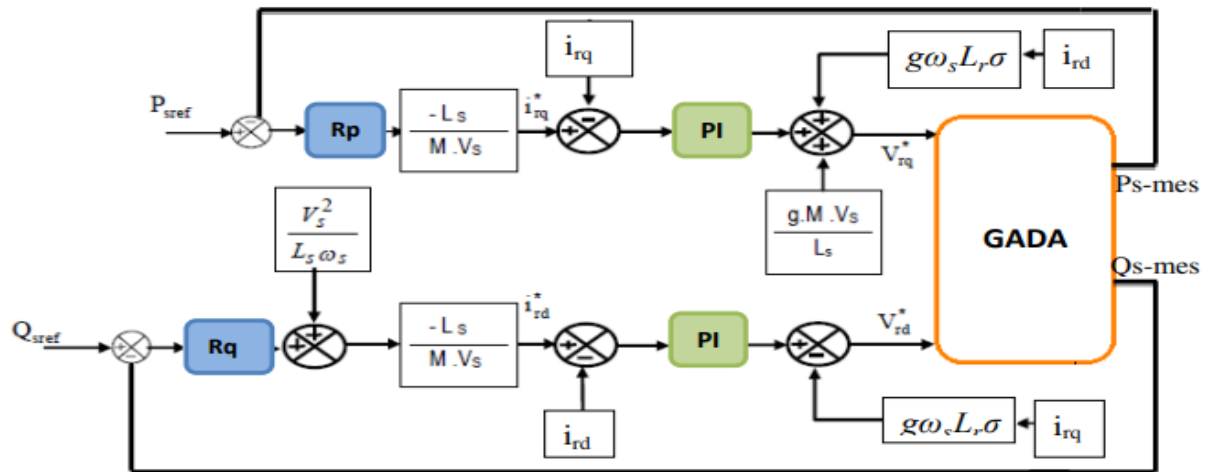


Figure IV.35 : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée

VII. SIMULATION DE LA COMMANDE VECTORIEL :

VII.1. Modèle de commande d'un système globale (GADA+Turbine) :

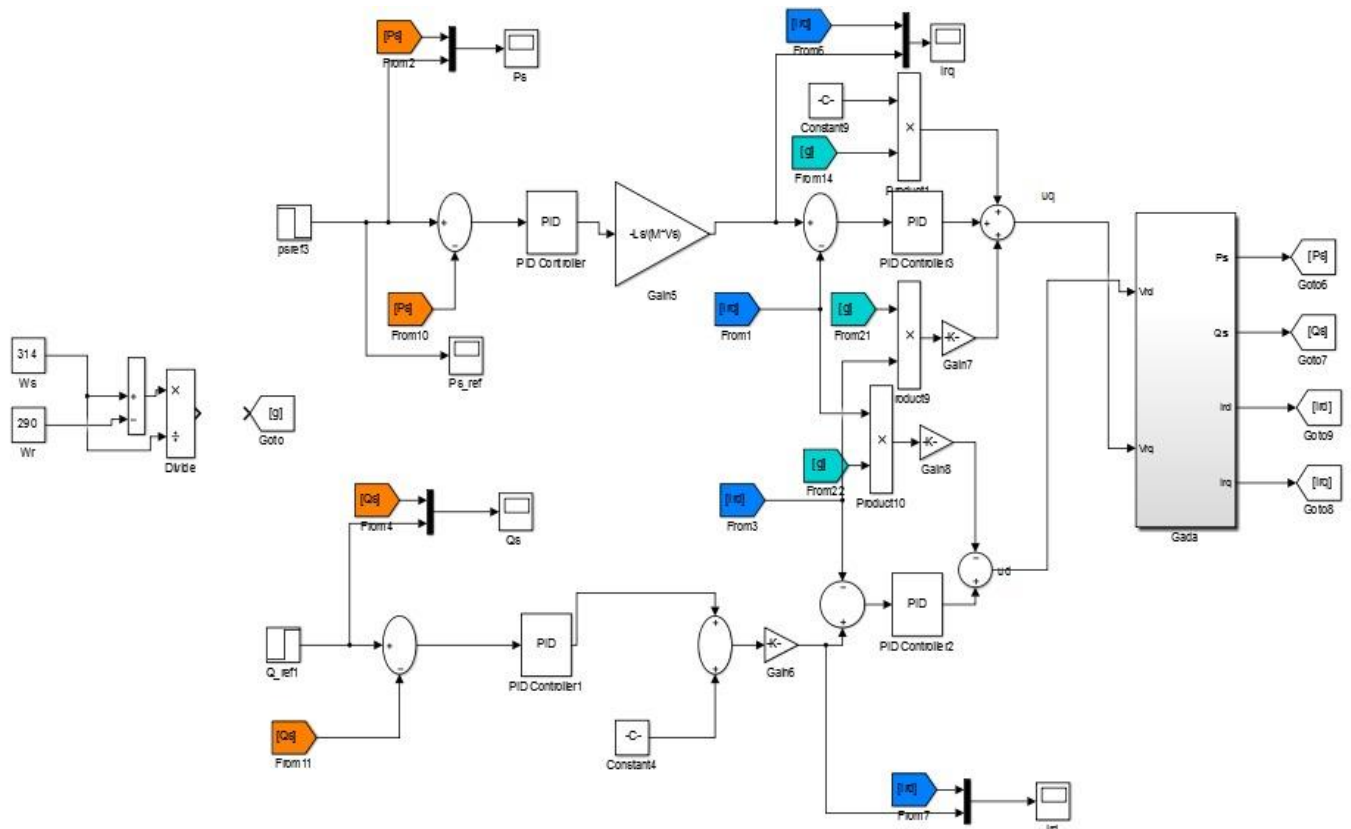


Figure IV.36 : schéma de simulation de la commande d'une GADA

VII.2. Résultats de la simulation :

Les résultats de simulation de notre système éolien (turbine + GADA) contrôlé par des régulateurs PI montrent des performances intéressantes. Ainsi, nous avons choisi de retenir la commande indirecte pour la suite de nos travaux. Les résultats présentent différentes courbes obtenues lors de la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA et les courants statorique et rotorique ainsi le couple électromagnétique. Cette commande permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur, ainsi que celles du flux et du couple.

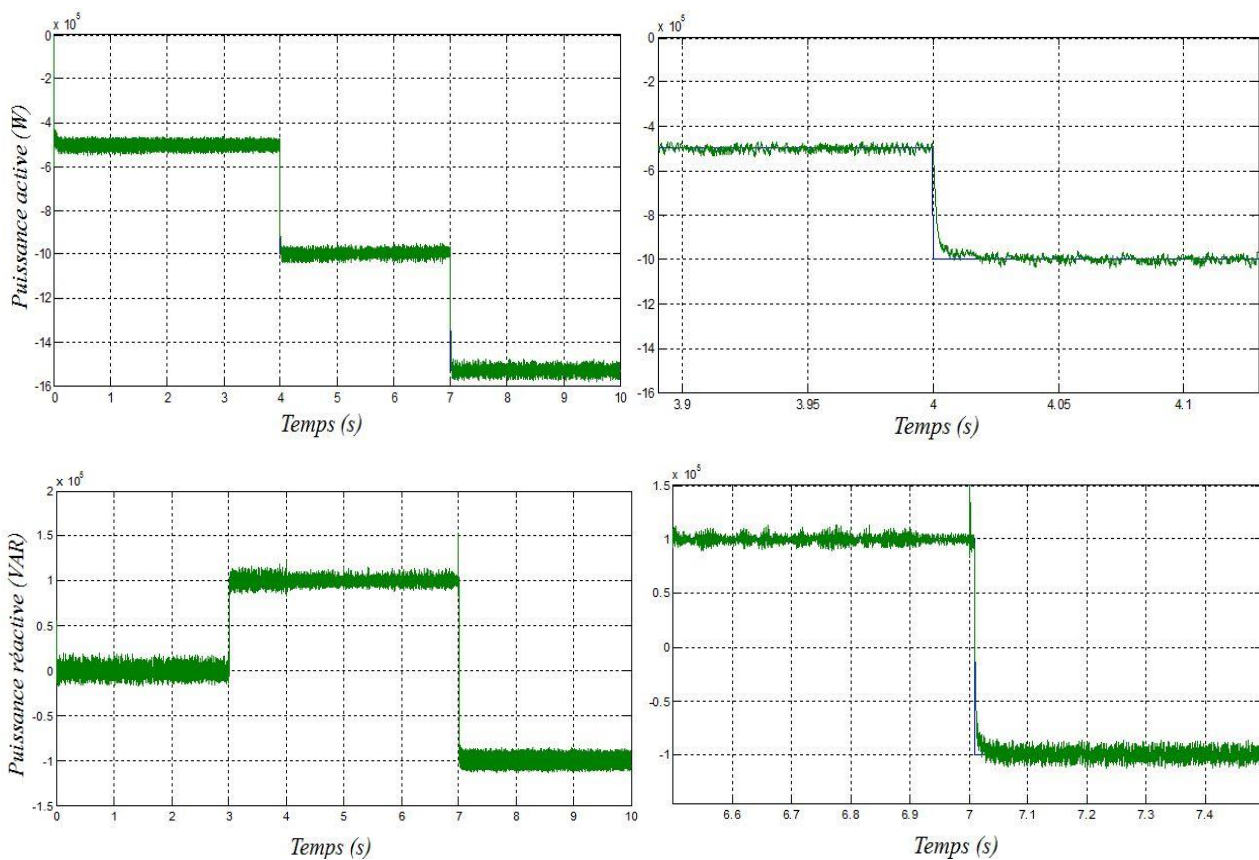


Figure IV.37 : La puissance active et réactive statorique avec ses références (*avec zoom*).

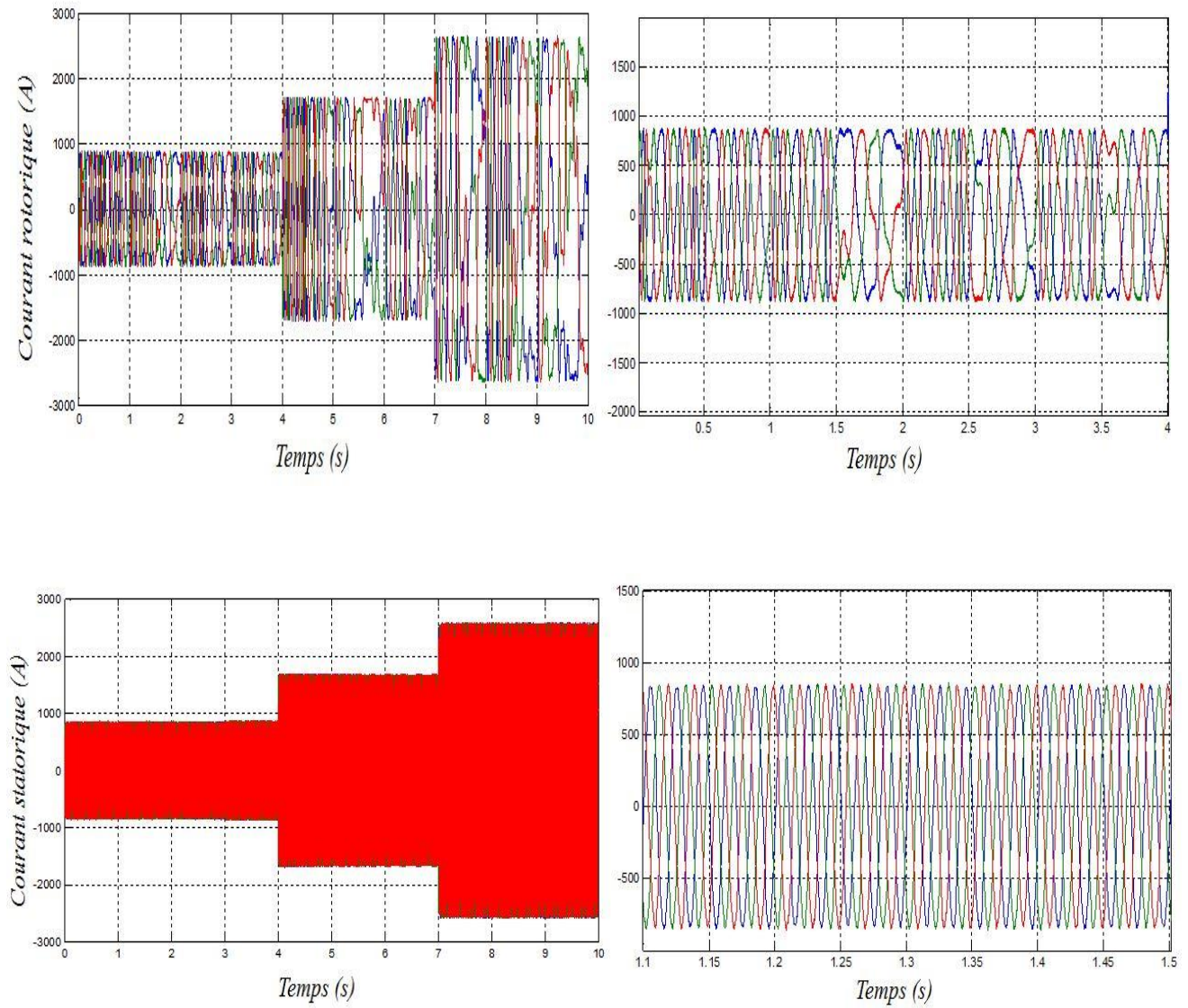


Figure IV.38 : Les deux composantes du courant rotorique et statprique (avec zoom).

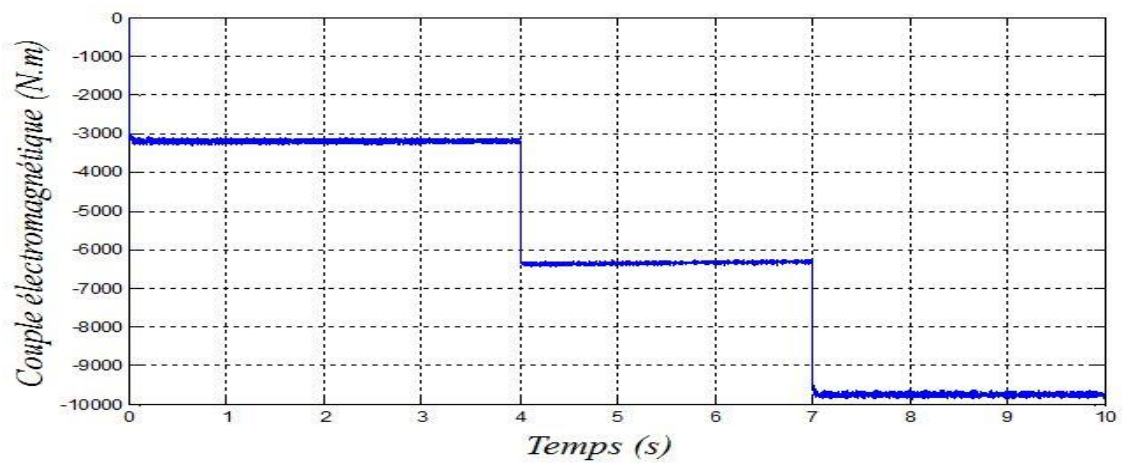


Figure IV.39 : Couple électromagnétique C_e .

VII.3. Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation par la commande vectorielle avec orientation du flux statorique sont représentés dans les figures comme suit :

D'après les résultats obtenus on remarque que les puissances active et réactive suivent rapidement et parfaitement leur référence.

Nous pouvons remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active. Ceci est traduit par la forme identique de la courbe obtenu. Donc, on peut déduire que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique.

Les deux puissances présentent une robustesse acceptable malgré la simplicité des régulateurs applique qui sont de type PI.

Les résultats obtenus, dans les cas de simulation, montrent que les courants statorique et rotorique triphasés générés sont proportionnelles à la puissance active. La forme d'onde des courants est presque sinusoïdale aussi bien pour le courant statorique que pour courant rotorique, ce qui signifie reflète bien le modèle mathématique de la MADA.

Les résultats montrent bien les grandes performances du contrôle indirect de la puissance active et réactive, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et simulé notre système par la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation par la méthode de contrôle indirecte en utilisant des régulateurs (PI) qui est utilisé pour la stabilité de système à cause de sa rapidité et de sa simplicité. Effectivement, en plus de bons résultats obtenus, cette technique de commande avec le bouclage de puissances, nous a permis d'avoir un système dynamique performant et fait l'objet d'avoir un découplage entre la puissance active et la puissance réactive.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de recherche a constitué une approche méthodique pour l'analyse et la conception d'un système énergétique basé sur la conversion éolienne, avec l'intégration du groupe auxiliaire de démarrage et d'assistance (GADA) en tant qu'élément de soutien complémentaire. Le premier chapitre a présenté un état de l'art détaillé des systèmes de conversion éolienne, en identifiant les principales architectures et technologies employées, tout en mettant l'accent sur les performances énergétiques et la stabilité.

Dans le deuxième chapitre, la modélisation de l'éolienne a été abordée, accompagnée du développement d'algorithmes de commande pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), garantissant ainsi une extraction optimale de l'énergie en fonction des variations de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement. Des modèles mathématiques précis ont été utilisés afin d'assurer un haut niveau de réalisme et une intégration fluide avec les unités de commande.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation du GADA, en décrivant ses composants électromécaniques et en développant un modèle dynamique permettant de simuler son comportement dans des conditions réelles d'exploitation. Cette représentation est essentielle pour comprendre les réponses du système face aux variations de charge et aux contraintes environnementales.

Le quatrième chapitre a traité de la commande du GADA, en concevant une stratégie de régulation fiable basée sur une logique séquentielle et un contrôle automatisé, assurant un fonctionnement sécurisé et cohérent du groupe dans l'ensemble du système. L'accent a été mis sur les aspects liés à l'automatisation du démarrage, de l'arrêt, à la protection, ainsi qu'à la gestion des situations d'urgence.

De manière globale, cette étude offre une base technique solide pour le développement futur de solutions intelligentes et performantes dans le domaine des énergies renouvelables, notamment en ce qui concerne l'automatisation des systèmes hybrides de production et l'optimisation de leur rendement énergétique dans des environnements industriels complexes.

Résumé

Résumé (Français)

Ce mémoire traite de la modélisation et de la commande des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) intégrés dans les systèmes de conversion éolienne, avec l'implémentation d'une stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser la production énergétique.

Le présente un état de l'art détaillé des systèmes de conversion éolienne, leurs topologies, ainsi que les différentes structures de générateurs utilisées.

Le aborde la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne, suivie de la mise en œuvre de l'algorithme MPPT pour optimiser le rendement sous des conditions de vent variables.

Le est consacré à la modélisation du GADA en régime dynamique, en s'appuyant sur les équations de la machine dans le repère dq.

Enfin, le explore les techniques de commande vectorielle du GADA, en assurant la régulation indépendante du flux et du couple, tout en garantissant la stabilité et la performance du système global.

Abstract (English)

This thesis focuses on the modeling and control of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG) within wind energy conversion systems, using a Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategy to enhance power extraction.

provides a comprehensive review of wind energy conversion systems, their architectures, and the generator types commonly used.

discusses the aerodynamic and mechanical modeling of the wind turbine, followed by the implementation of an MPPT control algorithm to improve efficiency under variable wind conditions.

presents the dynamic modeling of the DFIG based on the dq reference frame equations.

investigates vector control techniques for the DFIG, aiming for decoupled flux and torque control, while maintaining overall system stability and performance.

المُلخَص (العربية)

تركّز هذه الأطروحة على نمذجة والتحكم في المولدات الحثية مزدوجة التغذية (DFIG) المستخدمة في أنظمة تحويل طاقة الرياح، مع اعتماد استراتيجية تتبّع نقطة القدرة القصوى (MPPT) لتعزيز استخراج الطاقة.

يتناول في الأول عرضاً شاملاً لأنظمة التحويل الهوائي، وهياكلها المختلفة، وأنواع المولدات المستخدمة فيها.

و أيضاً في الثاني، تم تقديم نمذجة هوائية وميكانيكية للتوربين الهوائي، متبوعة بتطبيق خوارزمية MPPT لتحسين الأداء في ظل تغيّر سرعة الرياح. أما في الجزء الثالث، فيركّز على نمذجة DFIG باستخدام معادلات الإحداثيات الدوارة dq في الوضع الديناميكي. وفي الأخير، يتم تحليل تقنيات التحكم الاتجاهي في DFIG، بهدف التحكم المنفصل في الفيض والعزم، وضمان استقرار وأداء النظام ككل.

Annexe

Paramètres du système éolien

Tableau. A. Paramètres de la Génératrice [34]

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
<i>La puissance nominal P</i>	<i>1.5 MW</i>
<i>La tension nominal V</i>	<i>398/690 V</i>
<i>La résistance de la phase statorique R_s</i>	<i>0.6 Ω</i>
<i>Inductance directe L_d</i>	<i>0.0014 H</i>
<i>L'inductance quadrature L_q</i>	<i>0.0028 H</i>
<i>Moment d'inertie total de la machine J</i>	<i>0.02 Kg m²</i>
<i>Coefficient de frottement visqueux f</i>	<i>0.0014 N.m/rd/s</i>
<i>Le nombre de paires de pôles P</i>	<i>2</i>
<i>La résistance de charge R_{ch}</i>	<i>10 Ω</i>
<i>L'inductance de charge L_{ch}</i>	<i>0.002 H</i>
<i>Flux d'excitation des aimants Ψ_f</i>	<i>0.8 Wb</i>

Tableau. B. Paramètres de la turbine éolienne [34]

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Nombre de Pales (R_t)</i>	<i>3</i>	<i>Ω</i>
<i>Vitesse du vent minimale (V_{vm})</i>	<i>4</i>	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent nominale (V_{vn})</i>	<i>25</i>	<i>m/s</i>
<i>Masse volumique de l'air (ρ)</i>	<i>1.1225</i>	<i>kg/m³</i>
<i>Ratio de vitesse optimale (λ_{opt})</i>	<i>7.2</i>	<i>-</i>
<i>Coefficient de puissance maximal (C_{pmax})</i>	<i>0.44</i>	<i>-</i>
<i>Gain du multiplicateur (G)</i>	<i>90</i>	<i>-</i>
<i>Inertie de la turbine (J_t)</i>	<i>1000</i>	<i>Kg.m²</i>

Références bibliographiques

Références

- [1] D.DJEMATI, « étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne », mémoire de magistère en physique, université de BATNA, 2011.SAT 06
- [2] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [3] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.
- [4] R. REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire de magistère en Electrotechnique, l'Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [5] A. TENINGE, « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire », thèse de doctorat de l'INPG, 04 décembre 2009.
- [6] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double
- [7] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes,«
- [8] Université Mentouri de Constantine. République Algérienne. Mémoire magister,2008.
- [9] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [10] A. BOULAHIA" Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique" Mémoire de magister, Université de Constantine,2009.

Références

- [11] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE « perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [12] HARITZA CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003
- [13] M. Kassa IDJDARENE, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse de Doctorat de l'Université de Abderrahmane MIRA – Béjaia, 2010.
- [14] M. LOPEZ, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [15] Aldwaihi. H.A, « commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien », thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, octobre 2013.
- [16] A. TENINGE, « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire », thèse de doctorat de l'INPG, 04 décembre 2009
- [17] ROBYNS.B, BASTARD. P, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », Revue 3EI, n°39, décembre 2004.
- [18] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat de l'université de Toulouse Mars 2007.
- [19] S. Khojet El Khil, “Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA),” Thèse de doctorat de l'université de Toulouse Décembre 2006.

Références

- [20] A. Chaiba, “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.
- [21] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques” presses de l’université de Batna 1997.
- [22] Y. Elbia, “Commande Floue Optimisée d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2009.
- [23] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de doctorat de l’université de Nantes, 2003.
- [24] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.
- [25] M. Laamayad Tahar, “Commande optimale d’une machine asynchrone apport de la logique floue,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
- [26] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Mars 2007.
- [27] A. L. Nemmour ; “Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de magister de l’université de Batna 2002.
- [28] S. Kouro et al., “Recent advances and industrial applications of multilevel converters”, IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, 2010.
- [29] S. Engelhardt, I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann, and F. Shewarega, “Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction

Références

- generators,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, pp. 364–372, 2010.
- [30] L. Peng, “Reconfiguration du dispositif de commande d’une éolienne en cas de creux de tension,” PhD Thesis, Ecole centrale de Lille, 2010.
- [31] H. A. Pulgar-Painemal and P. W. Sauer, “Doubly-fed induction machine in wind power generation,” in Electrical Manufacturing and Coil Winding Exposition, 2009, vol. 4.
- [32] I. YAICHI, Contribution à l’amélioration de la qualité d’énergie électrique d’un système éolien basé sur la MADA, Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbès - Djillali Liabes, 2019.
- [33] S. El Aimani, “Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” PhD Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [34] Y. DJERIRI and A. MEROUFEL, “Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle,” PhD Thesis, 2015.
- [35] R. Riyadh and R. Abdessemed, “Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone doublealimentée,” PhD thesis, University of Batna, Faculty of Technology, 2016.
- [36] KENDOULI Fairouz, « Centrale éolienne et qualité de l’énergie électrique », Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2012.
- [37] Rachid ABDESSEMED, « Modélisation et simulation de machines électriques » Ellipses édition 2011.
- [38] KHETTACHE LAID, « Étude et Commande d’un Système Eolien à Base d’une Machine Electrique Double Alimentée » Thèse de Magister Université de Batna 2007.
- [39] Dr A. Meroufel, « Contrôle de la machine asynchrone » Université Djillali Liabès Sidi Bel-Abbès 2008/2009.
- [40] MEKKAoui Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d’une Mini- Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », 77

Références

Mémoire de Magister Spécialité : Maîtrise d'Énergie et Énergies Renouvelables
Université de Batna Soutenu Promo : 2004.

[41] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003

[42] AGGOUN Ghania, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », Mémoire de Magister en Electrotechnique Option : Entraînement électrique UMMTO 2010.

[43] RIHANI Lazhar, « Modélisation et Commande de la Génératrice à Induction Double Alimentée Couplée sur un Réseau Electrique », Mémoire de Magister Option : Réseaux Electriques université de Batna Soutenu le 19/ 01 /2012.

[44] Babak N. Mobarakeh, « Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrone à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification "en Ligne" des Paramètre », Thèse de Doctorat, Polytechnique de Lorraine 2001, France.