

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

**MEMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Énergies Renouvelables**  
*Option* : **Énergies Renouvelables en Électrotechnique**

**Intitulé :**

---

COMMANDE DIRECT DE PUISSANCE D'UNE EOLIENNE A  
BASE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE  
ALIMENTATION (GADA)

---

**Présenté par :**

- Chaib Aziz
- Zeggai Mouloud

*Soutenu le : 25 /06/2023.... devant le Jury :*

<i>Mlle SOUFI</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. BENMOHAMED Fayssal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mlle BEHLOUL Rabia</i>		<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. R.Lahcen</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données au cours de ces nombreuses années.*

*Par conséquent, nous voudrions également exprimer notre sincère gratitude à notre superviseur, Ben Mohamed Fayssal, pour avoir initialement suggéré ce sujet pour un suivi continu pendant la production de ce travail. Il nous a prodigué des conseils sans oublier Mme Bahloul Rabiya. co-aidante, pour ses conseils*

*Grâce à eux, nous avons pu terminer les travaux. Merci également à tous les professeurs de génie électrique qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions sincèrement tous les juges qui ont accepté d'évaluer notre travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie cette thèse*

*A mon père qui n'arrête pas de m'encourager, qui m'encourage toujours*

*A ma belle maman qui est le symbole du sacrifice et qui est tout pour moi.*

*J'ai tous mes frères et soeur.*

*Tous mes amis sans exception*

*Chaib Aziz*

*Je dédie cette thèse à :*

*Pour ceux que j'aime :*

*Mon père et ma mère qui ont toujours été là pour me soutenir,*

*A ma femme et mon fils Abdel Momen*

*Conseillez-moi de faire des sacrifices pour moi et permettez-moi d'atteindre  
ce stade de l'éducation.*

*Je le dédie également à :*

*Mes frères et sœurs, toute la famille Zaggai.*

*Zeggai Mouloud*

## Résumé

Dans ce travail, la conception, la modélisation et le contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (GADA) sont présentés.

L'objectif est le contrôle direct de la puissance active et réactive (DPC), qui est l'un des moyens modernes et efficaces d'obtenir un contrôle précis de la puissance électrique.

Les principes de base sont présentés, ainsi que la méthode de contrôle direct de la puissance en calculant la force instantanée et en estimant le débit en adoptant le Wind Power Profile pour tester et évaluer les performances du contrôle et l'étudier dans le cadre de la simulation à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, et il donne une réponse dynamique élevée et aucun besoin de boucles imbriquées, de transformations de coordonnées et d'autres éléments de contrôle traditionnels.

## Abstract

In this work, the design, modeling and control of a wind energy conversion system based on a double-fed asynchronous machine (GADA) are presented.

The focus is direct active and reactive power control (DPC), which is one of the modern and efficient ways to achieve precise control of electrical power.

The basic principles are presented, as well as the method of direct power control by calculating the instantaneous force and estimating the flow by adopting the Wind Power Profile to test and evaluate the performance of the control and study it within the framework of the simulation using MATLAB/Simulink software, and it gives high dynamic response and no need for nested loops, coordinate transformations and other traditional control elements.

Keywords: wind energy system, energy conversion, Turbine, MADA, MLI, DPC

## ملخص

في هذا العمل ، يتم تقديم التصميم والنمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة (GADA)

ينصب التركيز على التحكم المباشر في الطاقة النشطة والمتفاعلة (DPC) ، وهي إحدى الطرق الحديثة والفعالة لتحقيق التحكم الدقيق في الطاقة الكهربائية. تم عرض المبادئ الأساسية ، وكذلك طريقة التحكم المباشر في الطاقة عن طريق حساب القوة اللحظية وتقدير التدفق من خلال اعتماد ملف طاقة الرياح لاختبار وتقييم أداء التحكم ودراسته في إطار المحاكاة باستخدام / MATLAB برنامج Simulink ، وهو يعطي استجابة ديناميكية عالية ولا حاجة للحلقات المتداخلة وتنسيق التحولات وعناصر التحكم التقليدية الأخرى.

كلمات البحث : نظام طاقة الرياح , تحويل الطاقة , عفة , آلة متزامنة مزدوجة التغذية , مقوم , التحكم المباشر بالاستطاعة.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

<b>Figure I. 1-</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	13
<b>Figure I-2-</b> La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar).....	15
<b>Figure I-3-</b> Eolienne de type Darrieus et Savonius .....	16
<b>Figure I-4</b> - configuration à axe horizontal .....	17
<b>Figure I-5</b> -fonctionnement d'une éolienne .....	18
<b>Figure I-6</b> -composition d'une éolienne .....	19
<b>Figure I-7</b> - Machine synchrone connectée directement au réseau. ....	21
<b>Figure I-8</b> - système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable .....	23

## Chapitre II

<b>Figure II.1-</b> Schéma de la turbine éolienne.....	26
<b>Figure II 2</b> -Profil de la vitesse du vent .....	27
<b>Figure II.3</b> - Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de turbine .....	28
<b>Figure II.4</b> - Modél mécanique du multiplicateur.....	29
<b>Figure II.5-</b> Modèle de transmission mécanique à une masse sur l'arbre rapide.....	30
<b>Figure. II.6-</b> Schéma bloc du modèle de la turbine.....	31
<b>Figure II.7-</b> Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	31
<b>Figure. II.8</b> - <b>Quadrants</b> de fonctionnement de la MADA.....	32
<b>Figure. II.9</b> - Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.....	36
<b>Figure.II.10-</b> Schéma d'un onduleur de tension.....	40
<b>Figure II.11-</b> Principe de commande en MLI sinus-triangulaire. ....	42

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure II.12-</b> Schéma bloc de la GADA .....	43
<b>Figure II.13-</b> le Courant statorique <sup>43</sup>	
<b>Figure II.14-</b> le Courant statorique (zoom) .....	44
<b>Figure II.15-</b> le Courant rotorique.....	44
<b>Figure II.16-</b> le Courant rotorique (zoom) .....	45

### Chapitre III

<b>Figure III.1-</b> Principe de la commande vectorielle. ....	47
<b>Figure. III.2 -</b> Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	48
<b>Figure. III.3-</b> Schéma bloc de la commande directe.....	51
<b>Figure. III.4 -</b> Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé .....	53
<b>Figure. III.5-</b> Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	54
<b>Figure III.6-</b> la puissance active.....	55
<b>Figure III.7-</b> la puissance réactive .....	55
<b>Figure III.8 -</b> le Courant statorique .....	56
<b>figure III.9-</b> le Courant statorique zoom .....	56
<b>Figure III.10-</b> la puissance active .....	57
<b>Figure III.11 -</b> la puissance réactive .....	57
<b>Figure III.12-</b> la puissance active .....	58
<b>Figure III.13 -</b> la puissance ré active .....	58
<b>Figure III.14 -</b> la puissance active .....	59
<b>Figure III.15-</b> la puissance réactive .....	59

### Chapitre IV

<b>Figure IV 1-</b> Configuration de la DPC-C de la MADA .....	63
<b>Figure IV 2 -</b> principe de DPC classique .....	63

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure IV 3-</b> Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux.....	64
<b>Figure IV 4 -</b> Comparateurs à hystérésis, (a) puissance active , (b) puissance réactive .....	66
<b>Figure IV 5 -</b> Système régulé par un PI .....	67
<b>Figure IV 7 -</b> la Puissance active .....	72
<b>Figure IV 8 -</b> la Puissance réactive .....	72

# LISTE DES TABLEAUX

## liste des tableaux

**Tableau IV-4** : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive)  
..... 65

## LISTE DES SYMBOLES

GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MAS	Machine Asynchrone
SCE	Système de conversion éolien
DTC	Direct torque control
$\rho$	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
$P_v$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$\lambda$	Vitesse relative de l'éolienne
$\beta$	Angle de calage des pales de la turbine
$\Omega_s$	La vitesse de synchronisme
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$f_{turbine\_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique
v	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$C_{aer}$ [N.m]	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}$ [N. m]	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}$ [N. m]	Couple des frottements visqueux
$C_{em}$ [N. m]	Couple électromagnétique
$C_{em\_ref}$ [N. m]	Couple électromagnétique référence

## LISTE DES SYMBOLES

$C_{aer\_estimé}$ [N. m]	Couple aérodynamique estimé
$\theta$	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
$\theta_s$	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
$\theta_r$	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
$\theta_{coord}$	Angle coordonnée
$\omega$	Vitesse de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ )
$\omega_s, \omega_r$	Pulsation électrique statorique et rotorique
$\omega_m$	La pulsation mécanique de la machine
$S_s, S_r$ [VA]	La puissance apparente au stator et rotor
$P_s, P_r$ [W]	La puissance active au stator et rotor
$Q_s, Q_r$ [VAR]	La puissance réactive au stator et au rotor
$G$	Glissement
$V$ [V]	Tension
$I$ [A]	Courant
$\varphi$ [Wb]	Flux
$M$ [H]	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ( $\theta=0$ )
$l_s$ [H]	Inductance propre de chaque enroulement du stator
$l_r$ [H]	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
$M_s$ [H]	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
$M_r$ [H]	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
$L_s$	Inductance de chaque enroulement du stator
$L_r$	Inductance de chaque enroulement du rotor
$R_s$	Résistance de chaque enroulement du stator
$R_r$	Résistance de chaque enroulement du rotor
$R_f$	Résistance du filtre
$L_f$	Inductance du filtre
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique selon l'axe $d, q$
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique selon l'axe $d, q$

## LISTE DES SYMBOLES

$\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}$	flux statorique sur l'axe $\alpha \beta$
$\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}$	flux rotorique sur l'axe $\alpha \beta$
$V_{ds}, V_{qs}$	Tension statorique selon l'axe $d, q$
$V_{dr}, V_{qr}$	Tension rotorique selon l'axe $d, q$
$I_{ds}, I_{qs}$	Courant statorique selon l'axe $d, q$
$I_{dr}, I_{qr}$	Courant rotorique selon l'axe $d, q$
$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$	courant statorique sur l'axe $\alpha \beta$
$P_{res}$	puissance de réseau
$P_m$	Puissance mécanique
$s$	Opérateur dérivé de Laplace
$p$	Nombre de paire de pole de la MADA
$F_r$	Fréquence de rotor
$F_s$	Fréquence de stator
$k_p, k_i$	Constantes du régulateur PI
$r_r$	Temps de réponse du système
$Réf$	Indice indiquant la référence (la consigne)

***Etat de l'art sur les systèmes éoliens***

<b><i>I1.Introduction</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>I2.Hsitorique</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>I3.Source primaire</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b><i>I3.1.Le vent</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b><i>I4.Définition de l'énergie éolienne</i></b>	<b><i>13</i></b>
<b><i>I5.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b><i>I5.1.Les avantages de l'énergie éolienne</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b><i>I5.2.Les inconvénients de l'énergie éolienne</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b><i>I6.Energie éolienne en Algérie</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b><i>I7.Les différents types d'evoliennes</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b><i>I7.1.Les èoliennes à axe vertical</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b><i>I7.2.Les éoliennes à axe horizontal</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b><i>I8.Principe de fonctionnement d'une éolienne</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b><i>I9.Constitution d'une éolienne classique</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b><i>I9.1.Les rotors à vitesse fixe</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>I9.2.Les rotors à vitesse variable</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>I10.Types des machines électriques utilisées dans le système éolien</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>-Fonctionnement à vitesse fixe</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>-Fonctionnement à vitesse variable</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b><i>I10.1.Générateur synchrone</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b><i>I10.2.Générateur asynchrone</i></b>	<b><i>22</i></b>
<b><i>I10.2.1.Machine asynchrone à cage</i></b>	<b><i>22</i></b>
<b><i>I10.2.2.Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b><i>I11.Avantages et inconvénients de la GADA</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b><i>I11.1.Avantages de la GADA</i></b>	<b><i>23</i></b>

<i>I.11.2. Inconvénients de la GADA</i>	24
<i>I.12. Conclusion</i>	24
<b>Modélisation d'une système (éolienne-GADA)</b>	
<i>II.1 Introduction</i>	26
<i>II.2 Modélisation de la partie mécanique</i>	26
<i>Figure II.1</i>	26
<i>II.2.1 Modèle du turbine</i>	26
<i>Coefficient de puissance <math>C_p(\lambda, \beta)</math></i>	28
<i>II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse</i>	29
<i>II.2.3 Equation dynamique de l'arbre</i>	29
<i>II.3 Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation</i>	31
<i>II.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation</i>	31
<i>II.3.2 Mode de fonctionnement de la MADA</i>	32
<i>II.3.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA</i>	32
<i>II.4 Domaines d'application de la MADA</i>	33
<i>II.5. Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation</i>	34
<i>II.5.1. Hypothèses simplificatrices</i>	34
<i>II.5.2. Modèle de la GADA dans le plan ABC</i>	34
<i>II.5.2.1 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)</i>	35
<i>II.5.2.2 Choix du référentiel</i>	36
<i>II.5.2.2.1 Expression de la puissance active et réactive</i>	38
<i>II.5.2.2.2 Expression du couple électromagnétique</i>	39
<i>II.6. Modélisations de l'onduleur</i>	39
<i>II.7. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)</i>	41
<i>II.8. Simulation de la GADA</i>	42
<i>II.8.1 Les résultats de Simulation de la GADA (avec une vitesse fixe 150rd/s)</i>	42

## TABLE DES MATIÈRES

<i>II.8.2.1</i> <i>Interprétation des résultats de simulation</i> _____	45
<i>II.9</i> <i>Conclusion</i> _____	45

### *Commande Vectorielle de la GADA*

<i>III .1</i> <i>INTRODUCTION</i> _____	47
<i>III.2</i> <i>COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA</i> _____	47
<i>III .2.1</i> <i>Principe de la commande vectorielle de la GADA</i> _____	47
<i>III .3.</i> <i>Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique</i> _____	47
<i>III 3.1.</i> <i>Choix du référentiel pour le modèle diphasé</i> _____	48
<i>III.3.2.</i> <i>Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques</i> _____	49
<i>III.3.3.</i> <i>Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :</i> _____	49
<i>III.3.4.</i> <i>Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques</i> _____	50
<i>III.4.</i> <i>La commande vectorielle directe</i> _____	50
<i>III.4.1.</i> <i>Commande directe en puissance active et réactive de la GADA</i> _____	51
<i>III.5.</i> <i>Commande indirecte</i> _____	52
<i>III.5.1.</i> <i>Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA</i> _____	52
<i>II.5.1.1.</i> <i>Commande en boucle fermée</i> _____	52
<i>II.5.1.2.</i> <i>Commande en boucle ouverte</i> _____	53
<i>III.6.</i> <i>Type des régulateurs utilisés</i> _____	54
<i>III.7.</i> <i>Simulation de la commande vectorielle</i> _____	54
<i>III.8.</i> <i>Interprétation des résultats</i> _____	60
<i>III.9.</i> <i>CONCLUSION</i> _____	60

### *Commande direct de puissance*

<i>IV.1.</i> <i>Introduction</i> _____	62
<i>IV.3.</i> <i>Principe générale de la technique DPC-C</i> _____	62

## TABLE DES MATIÈRES

<i>IV.4.DPC classique :</i>	<i>63</i>
<i>IV.5. Tableau de commutation:</i>	<i>64</i>
<i>IV.6 Régulateurs à hystérésis</i>	<i>66</i>
<i>IV.2.Théorie de la commande directe de puissance</i>	<i>67</i>
<i>IV.7 Calcule des puissances instantanées :</i>	<i>68</i>
<i>IV.7.1 Calcule des puissances instantanées par estimation de la tension :</i>	<i>69</i>
<i>IV.7.2 Calcul des puissances instantanées par estimation du flux :</i>	<i>69</i>
<i>IV.8 Avantages et les inconvénients de la structure de contrôle DPC classique :</i>	<i>70</i>
<i>IV.8.1 Les avantages :</i>	<i>70</i>
<i>IV.8.2 Les inconvénients :</i>	<i>71</i>
<i>III.7 Résultats de simulation :</i>	<i>71</i>
<i>II.8 Interprétationdes résultats</i>	<i>73</i>
<i>III.9 Conclusion</i>	<i>73</i>

INTRODUCTION

GENERALE

Une augmentation significative de la consommation d'électricité à partir de combustibles fossiles ou nucléaires et une prise de conscience croissante de l'environnement ont considérablement accru l'intérêt pour les énergies renouvelables. L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses au monde en termes de développement. La raison principale est qu'il est écologique et économique car il utilise l'énergie cinétique du vent pour générer de l'énergie électrique en faisant tourner des éoliennes. C'est une forme d'énergie électromécanique, et l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Encore une fois, il existe de nombreux appareils, mais les machines asynchrones sont les plus utilisées dans l'industrie en raison de leur fiabilité et de leur simplicité de construction. Elle représente plus de 80% dans le domaine de la conversion d'énergie électromécanique. La plupart des éoliennes installées aujourd'hui sont également équipées de générateurs asynchrones à double alimentation. Ce dernier permet une production d'électricité à vitesse variable, faisant un meilleur usage des ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont également équipées d'hélices à pas variable qui s'adaptent aux conditions de vent.

La commande de telles machines est un processus délicat en raison du couplage qui existe entre les différentes variables. Malgré leur dynamique complexe, les machines à courant continu ont l'avantage d'être plus faciles à contrôler que ce type de machine. Pour réaliser une machine asynchrone à forte alimentation qui fonctionne comme une machine à courant continu, il est nécessaire de s'assurer que le flux électromagnétique et le couple sont séparés. C'est l'idée derrière l'émergence de la technologie de contrôle vectoriel, ou contrôle directionnel du flux. Cette technique a été proposée par Blaschke et Hasse en 1973.

Le but de cette technique est de contrôler la quantité de flux (courant d'excitation) et la quantité associée au couple (moteur). existe actuellement).

L'application de ce dernier aux machines asynchrones à double alimentation offre de meilleures performances de production d'énergie et une solution intéressante pour les applications d'entraînement électrique à vitesse variable. Pour présenter ce travail, j'ai organisé mes souvenirs comme suit :

Le premier chapitre présente les derniers développements de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu des différents types d'éoliennes et de leurs caractéristiques techniques, sans oublier l'Algérie et les diverses associations mécaniques telles que les convertisseurs statiques utilisés pour l'énergie éolienne, la production d'énergie éolienne et l'énergie

éolienne dans le monde Il fournit des statistiques montrant l'évolution de la consommation . La transformation est explorée à l'aide d'une machine asynchrone à double alimentation.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude des éléments de base des chaînes éoliennes. Il se compose d'une turbine et d'un générateur asynchrone à double alimentation (GADA).

Modélisation et développement de mécanismes d'éoliennes (pales)

Dans ce chapitre, nous développons un contrôleur approprié pour obtenir la puissance maximale possible, modélisé comme un générateur asynchrone à double alimentation.

Le chapitre 3 est consacré aux machines asynchrones à double alimentation, présentant une description générale des machines asynchrones à double alimentation et la modélisation du référentiel de Park en relation avec les champs magnétiques tournants, cette dernière permettant d'obtenir des transformations hypothétiques. La complexité du système peut être réduite en convertissant une machine triphasée en une machine biphasée équivalente.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude du DPC, une stratégie de contrôle visant à contrôler directement les puissances active et réactive de GADA.

Un transformateur à deux niveaux dont l'état de commutation est déterminé à partir d'une table de commutation. Cette dernière est fournie par une comparaison hystérétique (DPC classique) dont l'entrée est l'erreur instantanée résultant de la différence entre la valeur de référence et les estimations de puissance active et réactive.

*ETAT DE L'ART SUR LES  
SYSTEMES EOLIENS*

## **I.1.Introduction**

Pendant longtemps, l'énergie éolienne, portant exploitée depuis l'antiquité, connaît ces dernières décennies un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers et au réchauffement climatique dû à la pollution causée par les produits fossiles utilisés pour la production d'énergie.

En essayant de donner un aperçu sur cette énergie et ses différentes structures, nous allons, dans ce premier chapitre, présenter les différents types d'aéro-turbines en décrivant leur principe de fonctionnement, pour en déduire les différentes méthodes de contrôles et de limitation de puissance utilisées. Ensuite, nous introduisons les différentes structures d'aérogénérateurs et nous donnons pour chacune des éléments de comparaisons en listant les principaux avantages et inconvénients. Les différents composants des systèmes éoliens, qui seront modélisés par la suite au chapitre II, sont ainsi tous introduits une première fois. Nous terminons ce chapitre par la description de quelque impact de l'énergie éolienne sur les réseaux électriques.

## **I.2.Hsitorique**

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dû au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre, il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie [MS07].

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie de vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de [AM05].

Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical [MS07]. Des moulins à vent à axe verticale étaient déjà utilisés dans les hautes terres Afghanes 7siècle A.C.Pour moudre du gain [AG45].

La première écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C. en Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur reapparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de « moulins », ils

furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des pour assécher des lacs ou des terrains inondés le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200 000[1]. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. Ainsi dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée énergie mécanique. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à poul la Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice [2]. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » Et de nouveau utilisée (les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis ou ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les compagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouvelles recherches et les réalisations éoliennes dans le monde ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donne naissance aux aérogénérateurs modernes [3].

### **I.3.Source primaire**

#### **I.3.1.Le vent**

Le vent est un sous-produit de l'énergie primaire provenant du soleil ; Le rayonnement du soleil est absorbé de façon très différente aux pôles et à l'équateur du fait de la rotondité de la terre. L'énergie absorbée à l'équateur est donc très supérieure à celles absorbée aux pôles, ces variations de températures provoquent des différences de densité d'une altitude à une autre. Ce déplacement s'effectue dans des zones où la densité de l'air (pression atmosphérique) est élevée vers celle où elle est faible. La rotation de la terre crée une force appelée force de Coriolis (d'après le mathématicien français Gustave Gaspard Coriolis, 1792-1843), sous son influence les vents adoptent une rotation dans le sens anti-horlogique autours des dépressions dans l'hémisphère Nord et horlogique autour des dépressions dans l'hémisphère Sud, le déplacement de masse d'air entre ces zones de températures différentes est appelé : vent.

I.4. Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité et classifie dans la catégorie des énergies renouvelables.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande) [4]

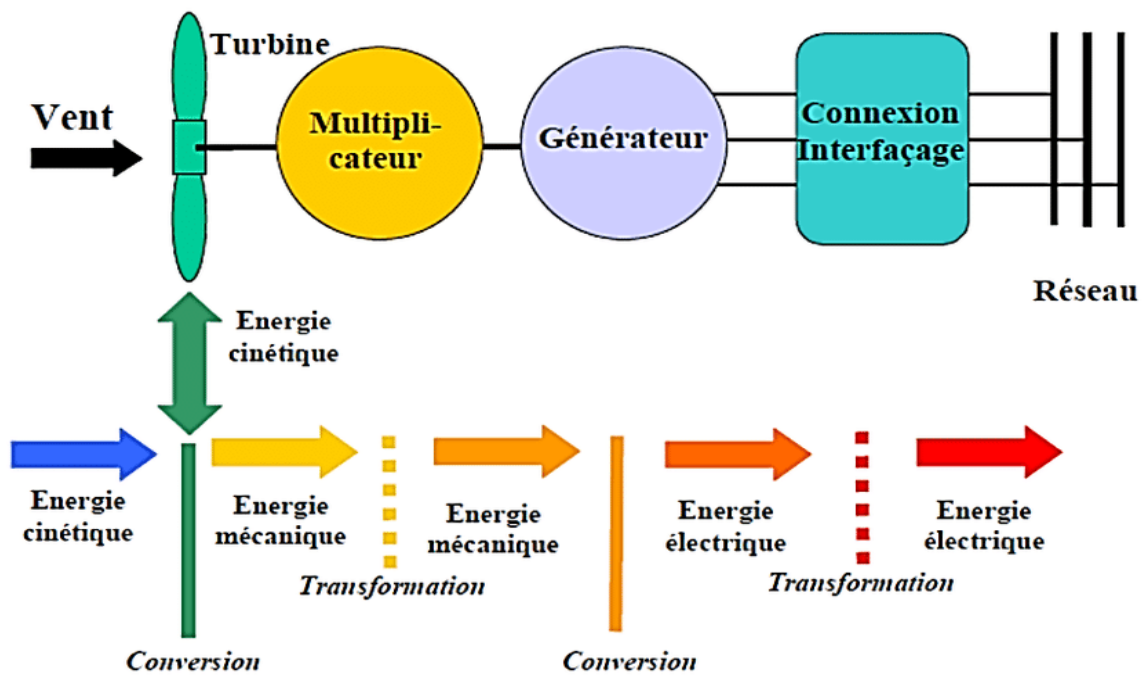


Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [4]

## **I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

### **I.5.1. Les avantages de l'énergie éolienne**

- On peut obtenir une production d'énergie régulière et continue si le parc éolien est situé dans un lieu adéquat et suffisamment exposé aux vents ;
- La durée de vie des éoliennes est d'environ 25 ans ;
- Elle n'émet aucun gaz à effet de serre ;
- Le vent est disponible partout et gratuit ;
- Une énergie renouvelable.

### **I.5.2. Les inconvénients de l'énergie éolienne**

- La production de l'électricité n'est pas stable : cela dépend de la force du vent ;
- Le bruit produit par les éoliennes peut être déranger ainsi que la modification du paysage ;
- Elles tournent uniquement si il y a du vent, donc elles sont dépendantes de la météo et aussi de la nature du sol ;
- Dangereux pour les oiseaux, la vitesse des pales peuvent les surprendre ;
- Le coût des pales étant élevé, une longue période est donc nécessaire pour assurer le retour sur l'investissement.

## **I.6. Energie éolienne en Algérie**

Sur le continent africain, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne ont fait l'objet d'une grande attention ces dernières années dans de nombreux pays du continent, car certains pays africains disposent d'un environnement propice à l'investissement dans l'énergie éolienne, et à cet égard, nous mentionnerons l'un des plus importants pays du nord pays africains, l'Etat algérien, où l'Algérie dispose d'un potentiel éolien exceptionnel qui peut la placer devant le monde dans le domaine de l'énergie éolienne. En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Plusieurs autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Actuellement, la capacité éolienne totale installée en Algérie est négligeable malgré les gisements éoliens disponibles [5]. Cependant un premier bon pas a été déjà fait par le groupe Sonelgaz en 13 décembre 2010

qui a confié la réalisation de la première ferme (parc) éolienne de Kabertène à Adrar d'une puissance totale de 10MW (Figure I-2). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014, Le parc éolien d'Adrar est considéré comme le premier du genre au niveau national, d'une capacité de 10 mégawatts, implanté sur une superficie de 30 hectares dans la région de Kabertin, à 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52/850/50-60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) [6].



**Figure I-2:** La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [6].

Par ailleurs, dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables, le ministère de l'énergie et des mines prévoit d'installer sept centrales éoliennes supplémentaires d'une capacité totale de 260 MW à moyen terme pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030, Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales [7].

Dans le domaine de la production d'énergies renouvelables en Algérie, la ressource

éolienne occupe la deuxième place (le soleil est la ressource la plus présente) et cela est principalement dû à la très grande diversité de terrain et de climat d'une région à l'autre. Mais dans ce domaine, et compte tenu des capacités exceptionnelles dont bénéficie l'Algérie, il est attendu que l'Algérie devienne un pionnier dans ce domaine au niveau africain et mondial. Selon un rapport publié par l'agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) intitulé " Statistiques de capacité renouvelable 2017", l'Algérie se classe au 18e rang du classement de la production d'énergies renouvelables en Afrique avec une capacité installée de 536 mégawatts [8]. Cette position ne fait que refléter le début des investissements dans ce domaine, et l'Algérie envisage d'entrer dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables et d'atteindre d'ici 2030 environ 40% de la production nationale d'électricité à partir de sources renouvelables [6]

## I.7. Les différents types d'éoliennes

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

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

### I.7.1. Les éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale [9].[10]



**Eolienne de type darrieus**



**Eolienne de type savonius**

**Figure I-3:** Eolienne de type Darrieus et Savonius[10]

### I.7.2. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [11].

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [12]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [13],[14].

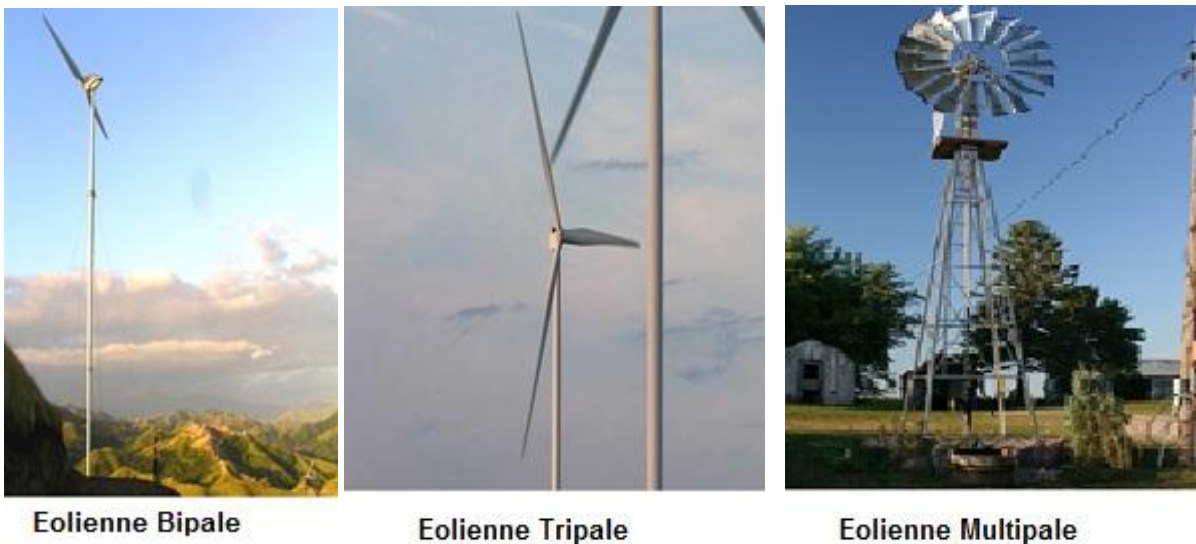


Figure I-4 configuration à axe horizontal [14].

### I.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Héritiers des moulins à vent, les aérogénérateurs - plus souvent appelés éoliennes - utilisent la force du vent pour la transformer en électricité.

La machine se compose de pales (3 en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. Le générateur transforme

l'énergie mécanique ainsi créée en énergie électrique injectée dans le réseau en conformité aux normes électriques applicables [15].

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

La probabilité d'occurrence de vents plus forts étant faible, il n'est pas économiquement rentable de dimensionner les machines pour résister et produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m / s [15].

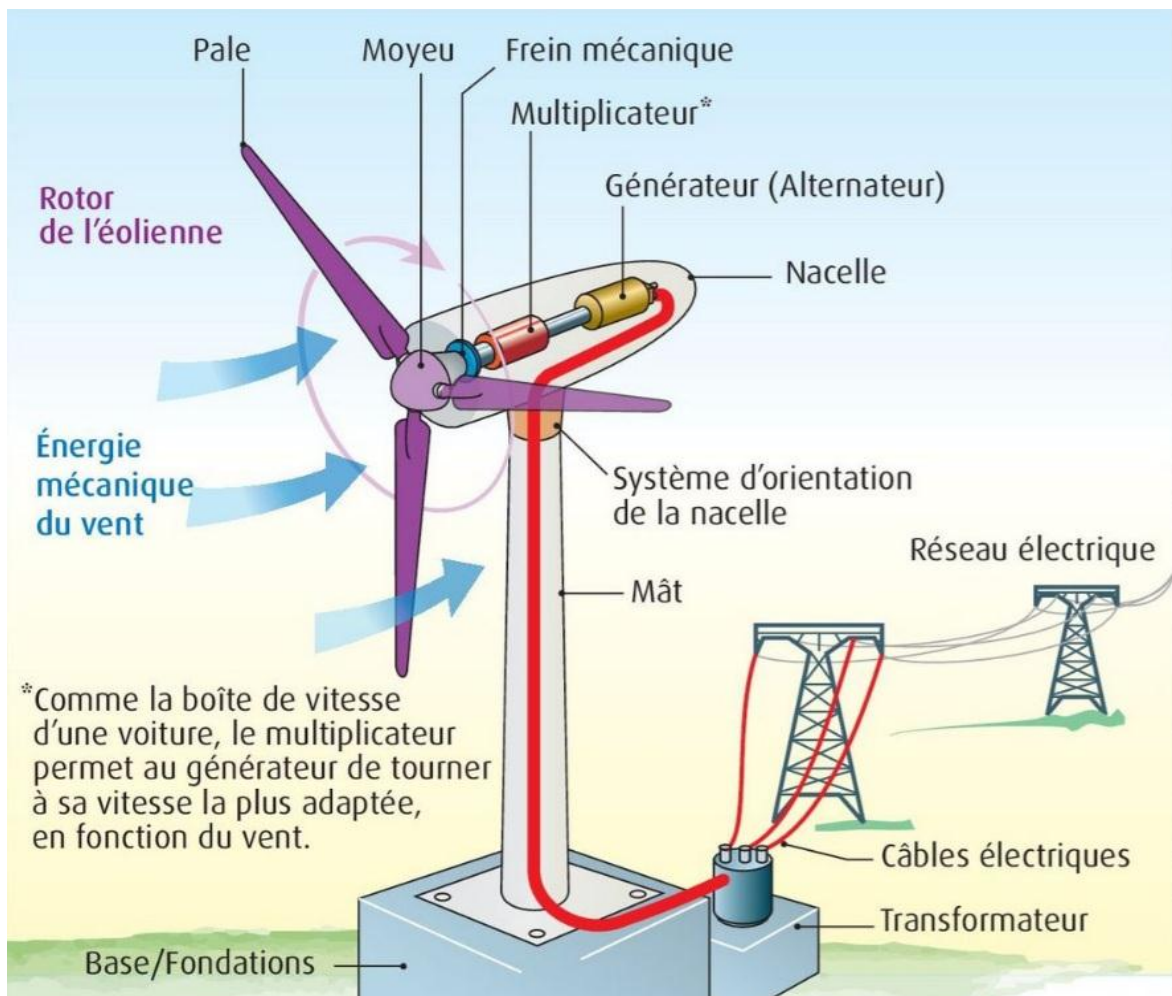


Figure I-5 fonctionnement d'une éolienne[15].

### I.9. Constitution d'une éolienne classique

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux

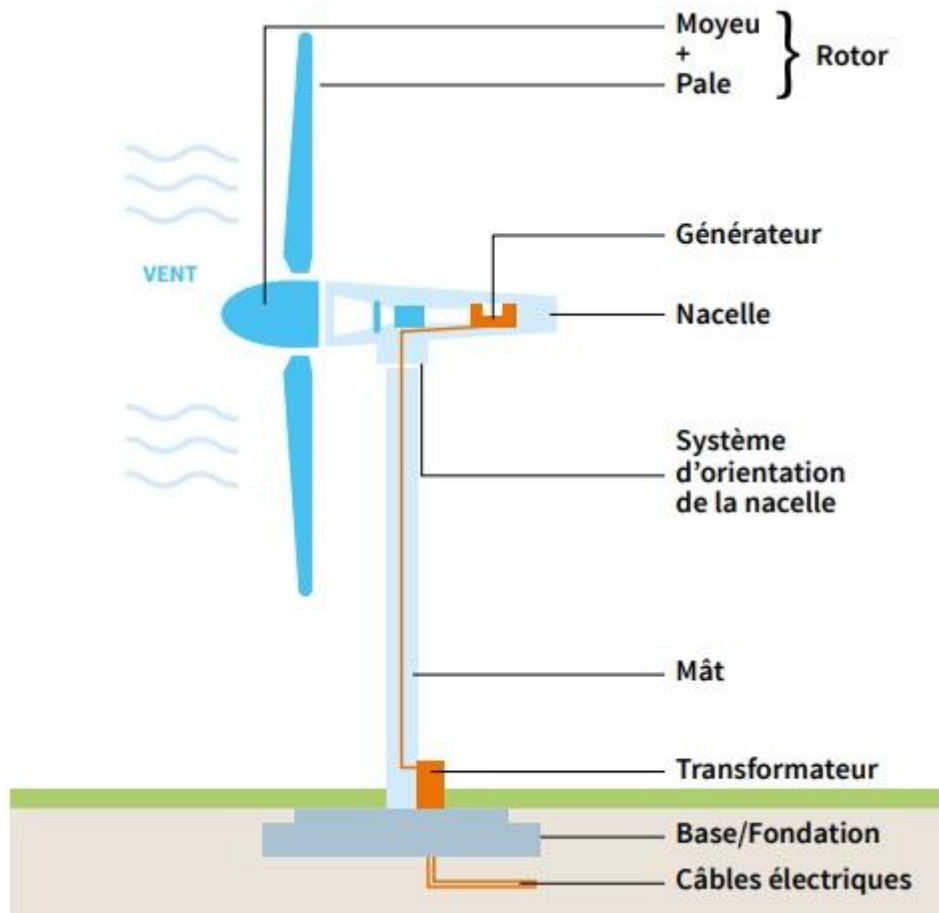


Figure I-6 composition d'une éolienne

- **[Le mat]** qui est généralement en acier ou éventuellement en treillis métallique, doit être de hauteur maximale afin de minimiser les perturbations près du sol. Cependant, il est important de limiter le poids et le coût associé à la quantité de matériau utilisée.
- **[La nacelle]** regroupe les composants mécaniques permettant de connecter le rotor de l'éolienne au générateur électrique. Cela comprend les arbres lents et rapides, les roulements, ainsi que le multiplicateur. Il y a également un frein à disque distinct du frein aérodynamique, qui est utilisé pour arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur utilisé est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Des systèmes hydrauliques ou électriques sont également présents pour orienter les pales (frein aérodynamique) et la nacelle (afin de maintenir la surface balayée par l'éolienne perpendiculaire à la direction du vent).

- [Le rotor] est constitué des pales assemblées dans un moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3 (rotor tripale). Les performances aérodynamiques et les matériaux utilisés dépendent de la géométrie des pales. Actuellement, les matériaux composites tels que la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont largement utilisés en raison de leur légèreté et de leur résistance mécanique.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable :

### **I.9.1. Les rotors à vitesse fixe**

Souvent équipées d'un système d'orientation des pales, ces éoliennes permettent à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner près de la synchronisation et d'être directement connectée au réseau sans nécessiter de dispositif électronique de puissance. Ce système offre ainsi une solution simple et économique.

### **I.9.2. Les rotors à vitesse variable**

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront des performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

## **I.10. Types des machines électriques utilisées dans le système éolien**

La configuration électrique d'une éolienne a une grande influence sur son fonctionnement. Par exemple, le choix entre un fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration. Les deux types de fonctionnement présentent des avantages significatifs, qui sont les suivants :

### **-Fonctionnement à vitesse fixe**

- Une plus grande fiabilité
- Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des composants de l'éolienne
- Pas besoin d'un système de commande électrique
- Moins coûteux

**-Fonctionnement à vitesse variable**

- Amélioration de l'efficacité énergétique
- Réduction des oscillations du couple dans le système de transmission de puissance
- Réduction des contraintes subies par le système de transmission de puissance
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité
- Les deux types des machines électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont

**I.10.1.Générateur synchrone**

Les générateurs synchrones sont couramment utilisés dans les procédés de production d'électricité traditionnels, tels que les centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires. Cependant, dans le domaine éolien, les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW sont plus coûteux que les générateurs à induction de même taille.

Lorsqu'un générateur synchrone est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et dépend de la fréquence du réseau. Cela signifie que les variations de couple captées par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite en raison de la connexion rigide entre le générateur et le réseau. C'est pourquoi les générateurs synchrones ne sont pas utilisés dans les aérogénérateurs connectés directement au réseau. Cependant, ils peuvent être utilisés lorsqu'ils sont connectés au réseau via des convertisseurs de puissance (voir figure I.7).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont dissociées. Cela permet à la vitesse de rotation de varier afin d'optimiser l'efficacité aérodynamique de l'éolienne et d'amortir les fluctuations de couple dans le train de puissance. Certaines variantes de générateurs synchrones peuvent fonctionner à des vitesses de rotation faibles, ce qui leur permet d'être directement couplées à l'aéroturbine. Cela élimine ainsi la nécessité d'utiliser un multiplicateur, un composant présent dans la plupart des aérogénérateurs et qui nécessite un entretien important.

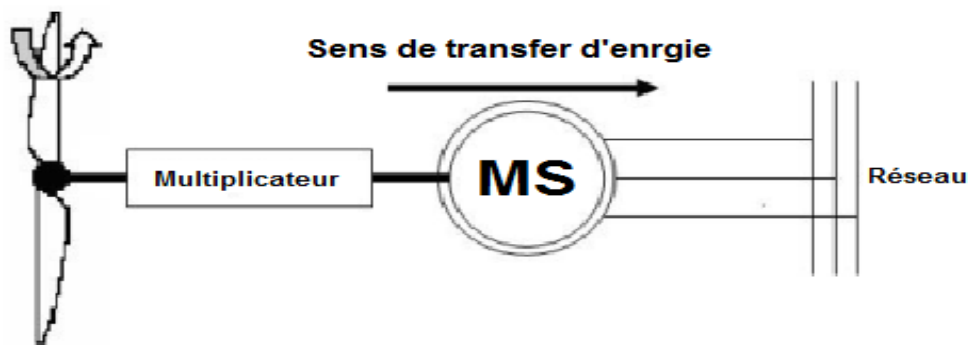


figure I-7 Machine synchronisée connectée directement au réseau.

### I.10.2. Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau est facilitée par la variation du glissement entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor de ce type de machine. C'est la raison pour laquelle la plupart des éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Il existe deux catégories de machines asynchrones : les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

#### I.10.2.1. Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples et les moins coûteuses à fabriquer. Elles bénéficient de l'avantage d'être standardisées et produites en grande quantité dans une large gamme de puissances. Elles nécessitent également moins d'entretien et présentent un faible taux de défaillance.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est plus douce en raison de la variation du glissement entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. C'est pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les Danois ont introduit une deuxième machine électrique pour permettre le fonctionnement des éoliennes à deux vitesses et ainsi améliorer leur rendement énergétique. L'ajout d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son coût élevé, permet, comme avec la machine synchronisée, de désolidariser la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, ce qui permet à l'éolienne de fonctionner à vitesse variable avec tous les avantages mentionnés précédemment.

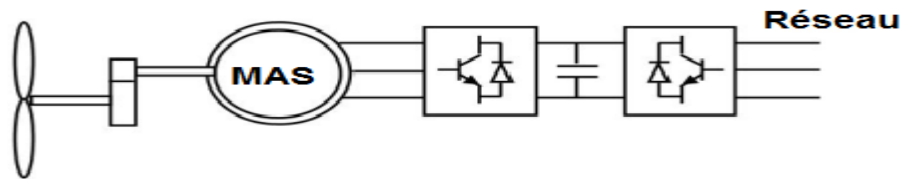


Figure I-8 système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

### I.10.2.2. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Avec les générateurs synchrones, c'est l'une des deux solutions concurrentes utilisées dans l'éolien à vitesse variable.

Dans ces machines, le stator de la génératrice est directement connecté au réseau, généralement via un transformateur. Au lieu d'avoir un rotor à cage d'écureuil, ces machines possèdent un rotor bobiné dont le réglage électrique permet de varier le glissement.

Actuellement, la plupart des projets éoliens de plus de 1 MW utilisent des machines asynchrones contrôlées par le rotor. Le circuit statorique de la machine est directement connecté au réseau électrique, tandis qu'un second circuit situé au niveau du rotor est relié au réseau via des convertisseurs de puissance.

Étant donné que la puissance transmise par le rotor est réduite, le coût des convertisseurs est moins élevé par rapport à une éolienne à vitesse variable alimentée par des convertisseurs de puissance au niveau du stator.

C'est la principale raison pour laquelle on utilise cette configuration de générateur pour la production à grande échelle. Une autre raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où la génératrice injecte l'électricité produite.

## I.11. Avantages et inconvénients de la GADA

### I.11.1. Avantages de la GADA

- Efficacité élevée : La GADA peut atteindre une plus grande efficacité dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

- Contrôle précis : La conception du GADA permet un contrôle précis du facteur de puissance et du taux de tension pour répondre aux exigences du réseau électrique.
- Réglage de la vitesse : La vitesse de rotation de l'éolienne peut être ajustée pour tirer le meilleur parti des conditions variables du vent et améliorer l'efficacité du système.
- Réduction des vibrations : La conception du GADA peut réduire les vibrations et les variations de puissance et de couple dans le système moteur, améliorant ainsi la stabilité du système et réduisant le bruit et les vibrations.
- Amélioration de la qualité de l'énergie : La GADA permet d'améliorer la qualité de l'énergie générée et de réduire les interférences électromagnétiques.

### **I.11.2. Inconvénients de la GADA**

- Coût élevé : La GADA peut être plus coûteux par rapport à d'autres systèmes de génération éolienne.
- Maintenance complexe : La GADA peut nécessiter une maintenance complexe et des cycles de maintenance plus complexes en raison de sa conception double et de l'utilisation de transformateurs supplémentaires.
- Encombrement : La GADA nécessite un espace plus important pour son installation en raison des transformateurs supplémentaires et de la conception double.
- Complexité du système : Le système électromécanique du GADA peut être plus complexe en raison de l'intégration des différentes parties et des éléments de contrôle.

### **I.12. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes facettes de l'énergie éolienne, en mettant l'accent sur les avantages et les inconvénients de cette source d'énergie renouvelable. Nous avons examiné les différents types d'éoliennes et nous nous sommes concentrés sur le fonctionnement et la constitution d'une éolienne classique. De plus, nous avons étudié les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de la GADA (Génération à Double Alimentation).

Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne .

*MODELISATION D'UNE  
SYSTEME (EOLIENNE –GADA)*

## II.1 Introduction

L'éolienne a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en utilisant des éléments spécifiquement conçus pour maximiser cette conversion. La turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, car la turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui fait tourner le rotor de la génératrice, responsable de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans ce contexte, le choix de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est préférable pour l'énergie éolienne en raison de ses avantages. Cela est abordé après la présentation de la théorie de production d'énergie éolienne et la modélisation de ses composants, y compris la machine asynchrone à double alimentation.

## II.2 Modélisation de la partie mécanique

Cette section effectue deux fonctions distinctes : d'abord, elle exploite l'énergie éolienne sous forme d'énergie mécanique pour faire tourner les pales, puis elle assiste le générateur en assurant son fonctionnement à la vitesse nécessaire.

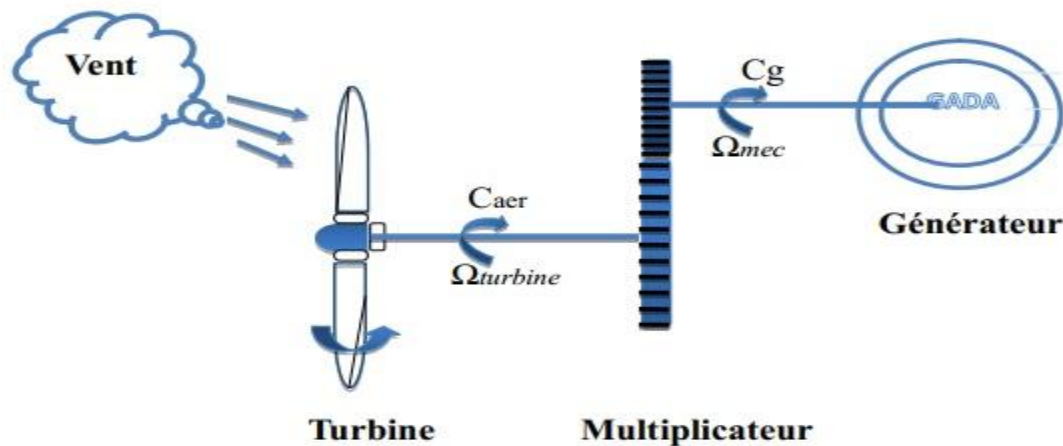


Figure II.1-Schéma de la turbine éolienne.

### II.2.1 Modèle du turbine

La puissance totale du vent qui traverse les éoliennes à chaque instant peut être imaginée ou représentée en utilisant la formule suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad [\text{II.1}]$$

\*  $P_v$  : est la puissance totale théoriquement disponible.

\*  $\rho$  : est la densité de l'air ( $1.22 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ )

\*  $S$  : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale

\*  $v$  : est la vitesse du vent

L'expression mathématique largement utilisée pour représenter la vitesse du vent est exprimée par :

$$V_v = 10 + 0.2 \sin(1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad [\text{II. 2}]$$

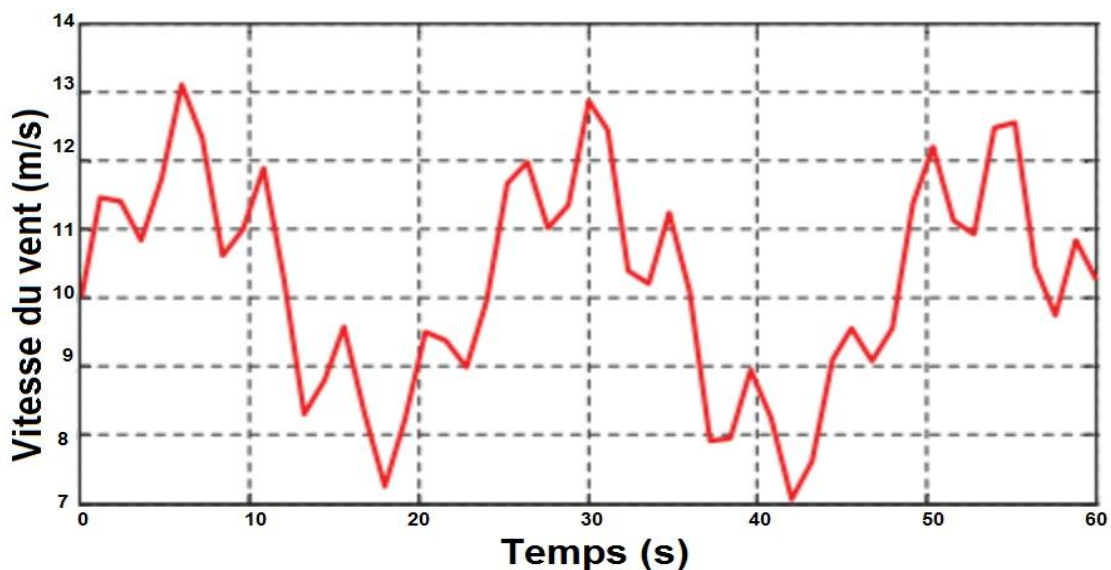


Figure II-2 Profil de la vitesse du vent

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique  $P_{aer}$  inférieure à la puissance disponible  $P_v$ .

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

Le coefficient de puissance, représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ( $\frac{P_{aer}}{P_v}$ ), il dépend de la caractéristique de la turbine [B01].

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ).

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

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad [\text{II.4}]$$

Où  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

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

$$c_{aero} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad [II.5]$$

**Coefficient de puissance Cp (λ, β)**

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent. On présente ce pourcentage par (λ, β) qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle d'orientation de pale β [YB14]

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β. A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne est approximé par l'équation :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad [II.6]$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure[II. 3] il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci est atteint pour une λ = 9, et de l'angle d'orientation des pales β = 2. Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.

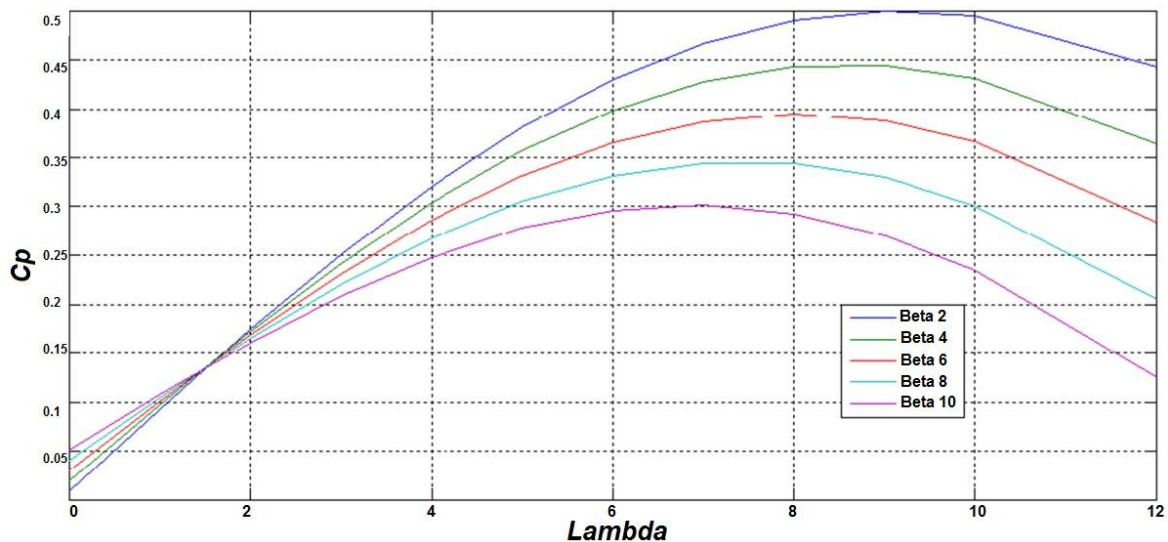


Figure II.3 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de turbine

Et on observe que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de Betz (0,59).

### II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$ , assez lente à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_g$ . [17]



Figure II.4 : Modél mécanique du multiplicateur [17]

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [18] :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{[II.7]}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{[II.8]}$$

### II.2.3 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad \text{[II.9]}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

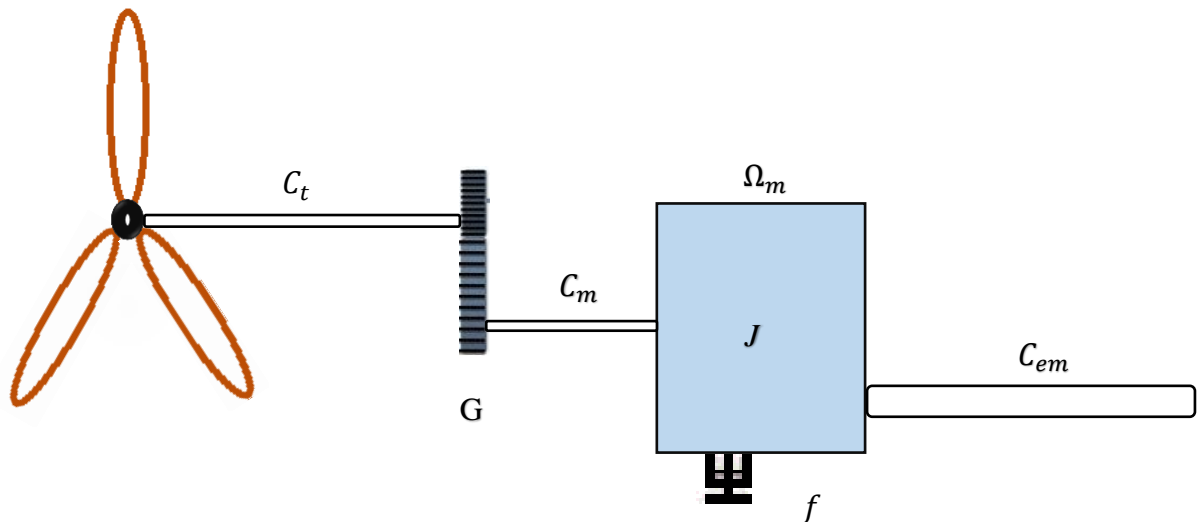


Figure II.5 Modèle de transmission mécanique à une masse sur l'arbre rapide

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J_t = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad \text{[II.10]}$$

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{[II.11]}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{[II.12]}$$

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

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux

$$f: C_{vis} = f * \Omega_{mec} \quad \text{[II.13]}$$

Le schéma bloc (Figure II.6) correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes. Cette dernière génère le couple aérodynamique  $C_{aer}$  qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent  $V$ , l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , et la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_{turbine}$ . Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  et le couple aérodynamique  $C_{aer}$  respectivement en vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  et en couple de multiplicateur  $C_g$ . Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$ , il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur  $C_g$ , le couple électromagnétique  $C_{em}$  fourni par la génératrice.

Le schéma montre que la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale  $\beta$  et le couple électromagnétique de la génératrice  $C_g$ . La vitesse du vent  $V$  est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système [19]

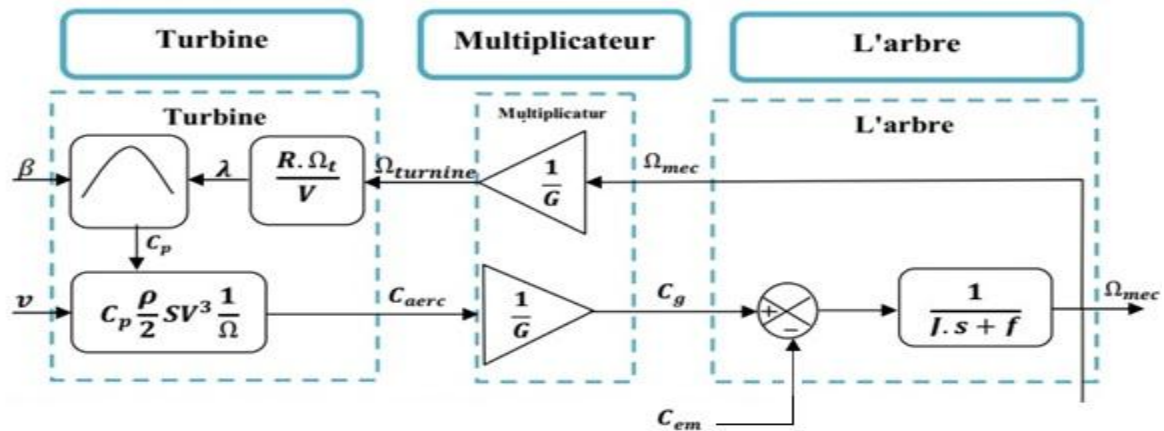


Figure. II.6:Schéma bloc du modèle de la turbine

### II.3 Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation date de l'année 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [18].

#### II.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou 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 de fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine [20]

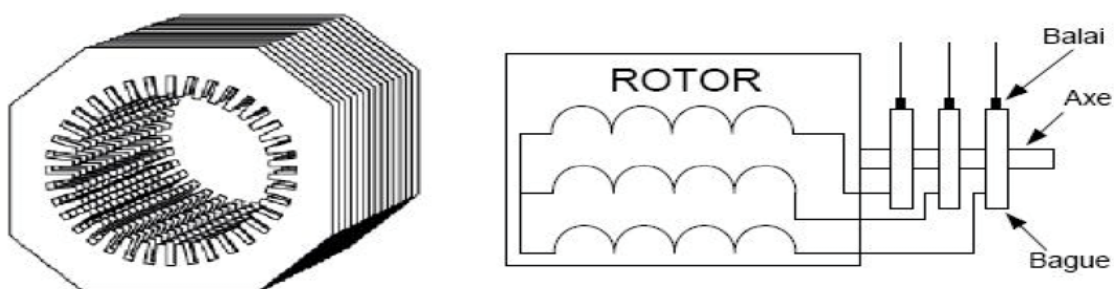


Figure II.7:Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

II .3.2 Mode de fonctionnement de la MADA

La MADA est une machine réversible, son stator est directement connecté au réseau et le rotor est alimenté par un onduleur. La commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la MADA, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Cependant, dans une machine à cage c'est la vitesse de rotation qui impose la mode de fonctionnement moteur ou générateur, elle doit tourner en dessus de sa vitesse de synchronisme pour être en générateur et au-dessous pour être en moteur [21]

II.3.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La figure (II.8) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [22]

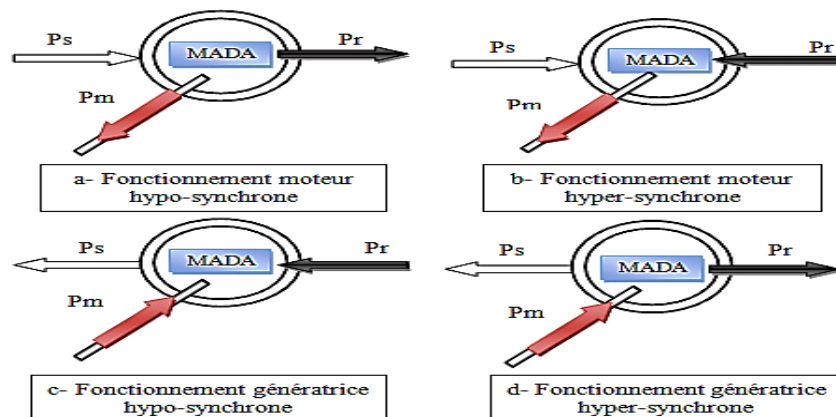


Figure. II.8 : Quadrants de fonctionnement de la MADA [22].

- **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone**

La figure (II.8.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [22]

- **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :**

La figure (II.8.d) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La

machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [22].

- **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :**

La figure (II.8.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [22]

- **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La figure (II.8.a) 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 [22]

## II.4 Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la "MADA" est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [23]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la "MADA" comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que [24] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La "MADA" peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [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... .

On note que les applications de la "MADA" en moteur sont relativement très limitées,

parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [26].

## II.5. Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation

L'étude du comportement de la GADA est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique. Généralement, ce modèle est défini dans un référentiel diphasé tournant (d, q). Ce référentiel est défini à partir du référentiel triphasé naturel de la GADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées.

Afin d'élaborer un modèle simple de la GADA, il est nécessaire de tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications [27].

### II.5.1. Hypothèses simplificatrices

- Notre modèle est basé sur les hypothèses simplificatrices suivantes [28] :
- On néglige les pertes fer, le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault, effet de peau, effet des encoches et l'échauffement.
- On suppose que le bobinage soit reparti de manière à donner une force magnétomotrice sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.
- La machine est symétrique et à entrefer constant.
- La densité du courant est uniforme dans la section des conducteurs.
- Tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements
- Les résistances et les inductances ne varient pas avec la température.

### II.5.2. Modèle de la GADA dans le plan ABC

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [29] :

• **Equations électriques :**

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement, on peut écrire :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d\varphi_s}{dt} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d\varphi_r}{dt} \end{cases} \quad [\text{II.14}]$$

Avec:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; \quad [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad [\text{II.15}]$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [\text{II.16}]$$

• **Equations magnétiques**

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sabc} \\ \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix} \quad [\text{II.17}]$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad [\text{II.18}]$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad [\text{II.19}]$$

**II.5.2.1 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)**

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques [23]. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (αβ), puis vers le repère (dq).

Le repère (αβ) est toujours fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile, il forme avec le repère fixe (αβ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [30].

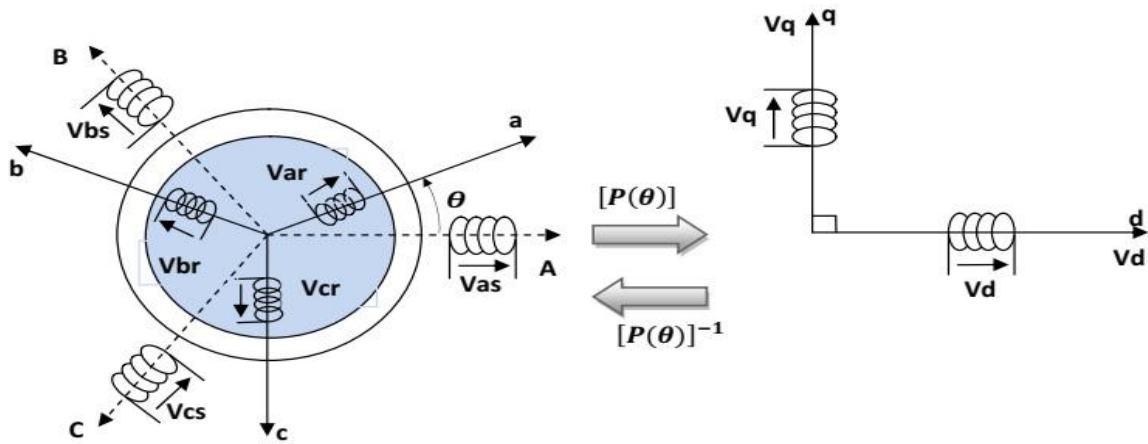


Figure. II.9 Passage du triphasé au biphasé et l'inverse [30]

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent. La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad [\text{II.20}]$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad [\text{II.21}]$$

Cette matrice permet le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes biphasées ; avec  $X_{abc}$  peut être : un vecteur de tension, courant ou flux.

### II.5.2.2 Choix du référentiel

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la génératrice dans un repère dq faisant un angle  $\theta_s$  avec le stator et un angle  $\theta_r$  avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [31].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- 1) au stator
- 2) au rotor
- 3) au champ tournant

**II.5.2.2.1 Référentiel lié au stator**

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \leftrightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \tag{II.22}$$

Ce repère est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées  $\omega_s = 0$

**II.5.2.2.2 Référentiel lié au rotor**

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega \tag{II.23}$$

Ce repère est caractérisé par  $\omega_{r=0}$

Ce repère est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

**II.5.2.2.3 Référentiel lié au champ tournant**

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_{coord} = \omega_s$ . Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [31]

**II.5.2.2.4 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)**

• **Equations électriques**

En multipliant les systèmes des équations (2.24) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \tag{II.24}$$

• **Equations magnétiques**

En multipliant les systèmes des équations (2.25) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \tag{II.25}$$

Les deux systèmes des équations (2.26) et (2.28) s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M \varphi_{qs} + \omega L_r I_{qr} + \omega M I_{ds} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega L_r \varphi_{dr} - \omega M I_{ds} \end{array} \right. \quad [\text{II.26}]$$

### II.5.2.2.5 Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad [\text{II.27}]$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} + V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad [\text{II.28}]$$

Les équations de la génératrice ont été formulées, mais il est également important de prendre en compte le couple électromagnétique. Ce dernier peut être déterminé en effectuant un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques, en fonction des grandeurs d'axes (dq), peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ P_s &= \left( R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \right) I_{ds} + \left( R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \right) I_{qs} \\ P_s &= R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left( \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \right) + \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \end{aligned} \quad [\text{II.29}]$$

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \quad [\text{II.29}]$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \quad [\text{II.30}]$$

- 3) Puissance mécanique

$$\omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad [\text{II.31}]$$

**II.5.2.2.6 Expression du couple électromagnétique**

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad ; \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = p(\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{ds})$$

$$C_{em} = pM(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qr})$$

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r}(\varphi_{dr}I_{qs} - \varphi_{qr}I_{ds})$$

$$C_{em} = \frac{pM}{L_s}(\varphi_{qs}I_{dr} - \varphi_{ds}I_{qr}) \tag{II.32}$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotriques est donnée par :

$$\omega_r = (\omega_s - p\Omega)$$

$\omega_s$  et  $\omega_r$  représentent respectivement les pulsations des tensions statoriques et rotoriques en rad/s. Les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont obtenus respectivement par intégration de  $\omega_s$  et  $\omega_r$ .

$$\begin{cases} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt \end{cases} \tag{II.33}$$

**II.6. Modélisations de l'onduleur**

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [32], ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur à MLI [33], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandés par la modulation de largeur d'impulsions. Pour simplifier l'étude supposons que [34] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c.-à-d

$$k_{ci} (c \in [1,2,3], i \in [1,2]) \tag{II.34}$$

- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure (II.10).

On a, donc :

$$I_{kci} = 0, V_{kci} \neq 0 \text{ Interrupteur ouvert,} \tag{II.35}$$

$$I_{kci} \neq 0, V_{kci} = 0 \text{ Interrupteur fermé} \tag{II.36}$$

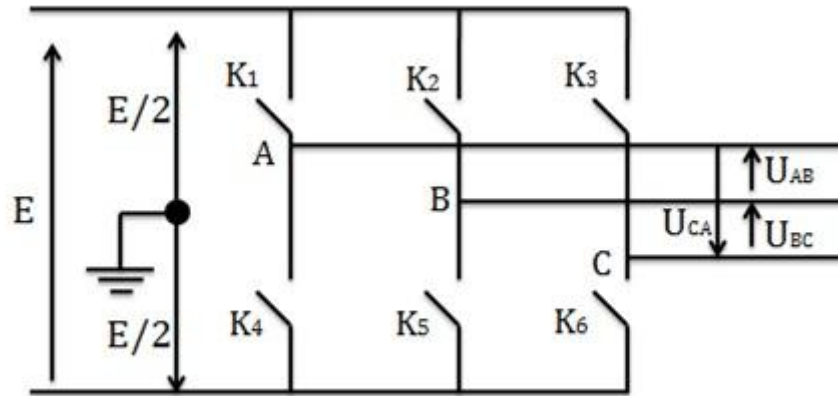


Figure.II.10:Schéma d'un onduleur de tension[34].

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} + V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} + V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} + V_{ao} \end{cases} \quad \text{[II.37]}$$

$V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad \text{[II.38]}$$

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),  
 $V_{no}$  est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système  $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$  équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{[II.39]}$$

La substitution de (II.38) dans (II.39) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad \text{[II.40]}$$

En remplaçant (II.40) dans (II.38), on obtient :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bo} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{co} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \end{cases} \quad \text{[II.41]}$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T][V_{DC}]$$

Tel que :

$$[V_{AC}] = [V_{an}V_{bn}V_{cn}]^T$$

$$[V_{BC}] = [V_{ao}V_{bo}V_{co}]^T \quad [II.42]$$

$$[V_{DC}] = U_{dc}[S_1S_2S_3]^T$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés, comme des grandeurs booléennes

Commutation supposée idéale :  $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1, 2,3\}$

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & +\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & +\frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad [II.43]$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion) [21]

### II.7. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur. Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

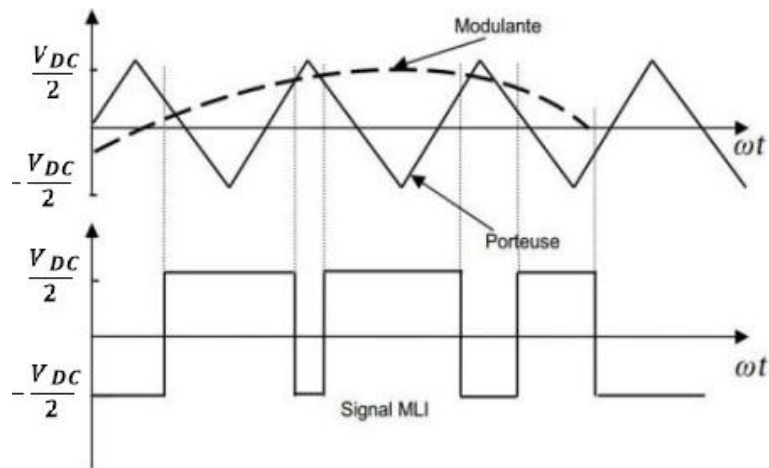


Figure II.11: Principe de commande en MLI sinus-triangulaire. [35]

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (Figure II.11) :

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

## II.8. Simulation de la GADA

Une simulation de la machine asynchrone à double alimentation a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB pour son fonctionnement en tant que générateur. Son modèle est basé sur les équations dérivées de la transformation de Park, qui sont liées au référentiel (d, q) lié au champ tournant

### II.8.1 Les résultats de Simulation de la GADA (avec une vitesse fixe 150rd/s)

Les figures présentées ci-dessous représentent les résultats obtenus à partir du modèle d'une machine de puissance de 2 W. Les résultats correspondent au modèle de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) fonctionnant à une vitesse fixe de 150

rad/sec, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfaites. L'une est au niveau du stator avec une fréquence du réseau de 50 Hz et une amplitude de 220 V, tandis que l'autre est au niveau du rotor avec une amplitude de 12 V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

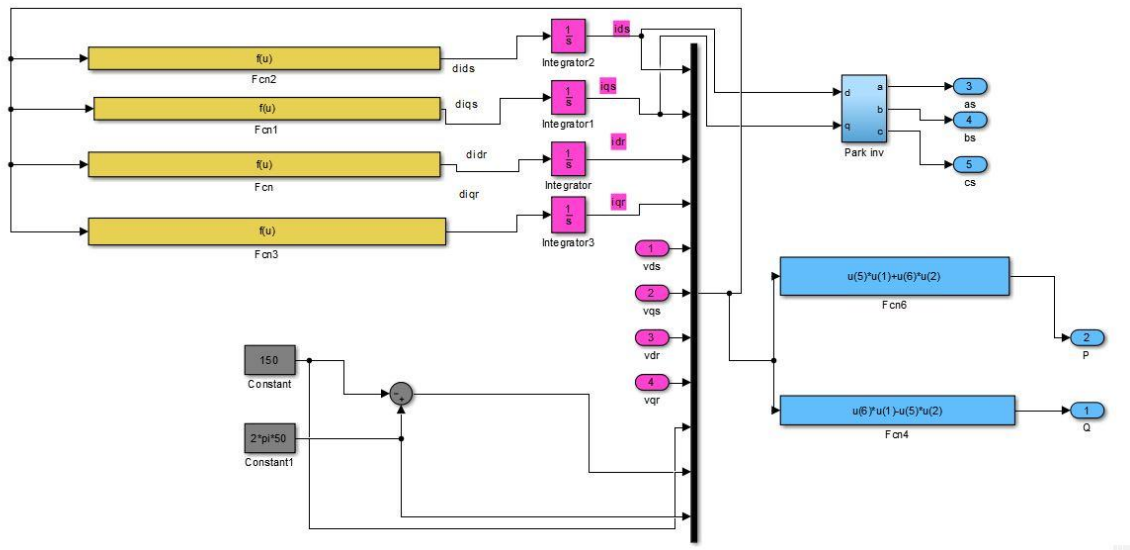


Figure II.12:Schéma bloc de la GADA

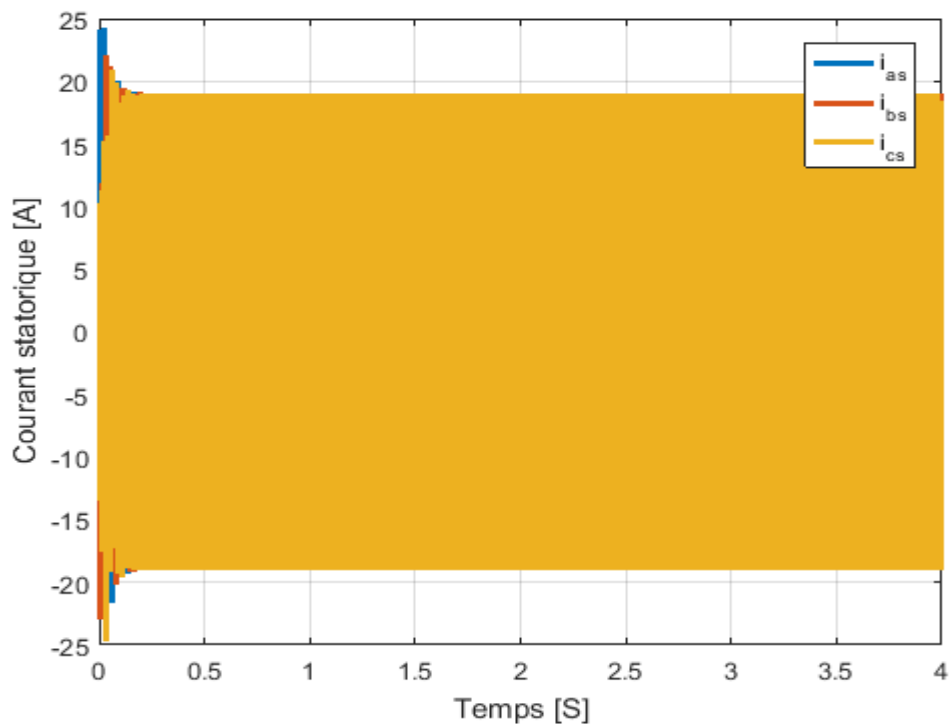


Figure II.13:Les Courants statorique

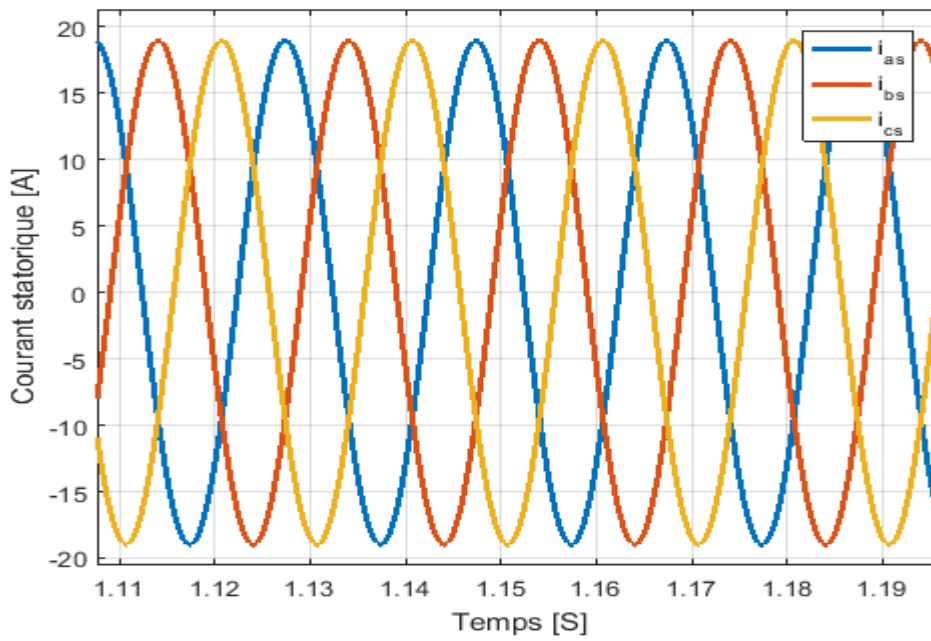


Figure II.14 Les: Courants statorique (zoom)

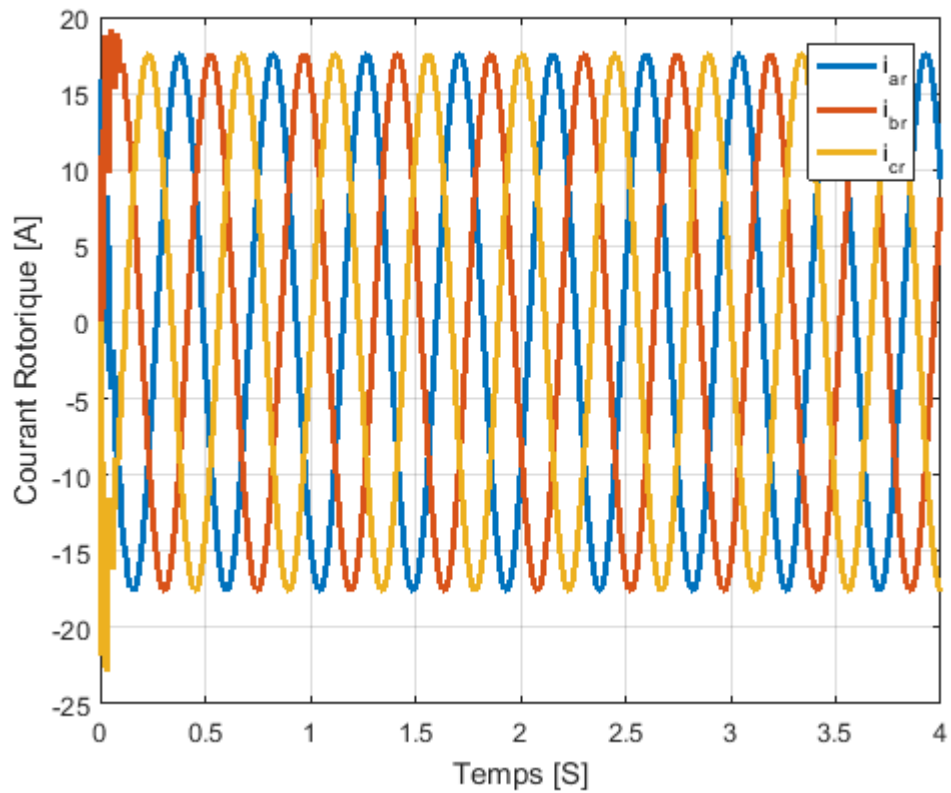


Figure II.15: Les Courants rotorique

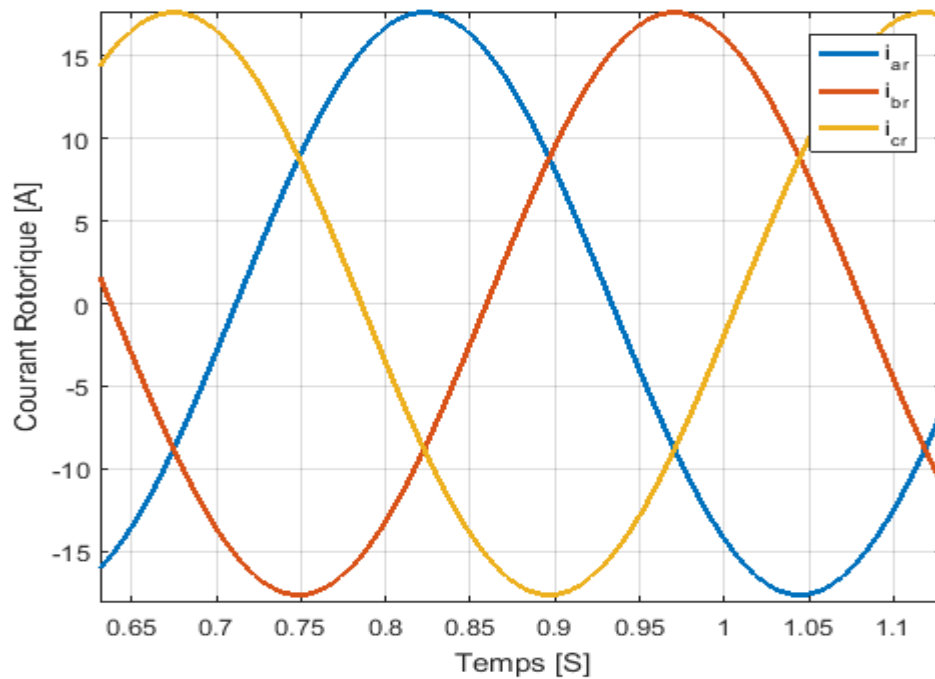


Figure II.16: Les Courants rotorique (zoom)

### II.8.2.1 Interprétation des résultats de simulation

Sur la base des résultats de simulation pour différentes conditions de fonctionnement du générateur asynchrone à double alimentation à une vitesse fixe de 150 tours par minute, il est clair que les courants statoriques et rotoriques sont stables et suivent une forme d'onde sinusoïdale.

## II.9 Conclusion

Ce chapitre a abordé les aspects essentiels du système de conversion d'énergie éolienne. La première partie a porté sur la partie mécanique comprenant la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Dans la deuxième partie, nous avons étudié la modélisation de la GADA en utilisant quelques hypothèses simplificatrices, ce qui a permis d'établir un modèle mathématique avec une complexité réduite. Nous avons constaté que le modèle de la GADA est un système d'équations différentielles, et la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. En utilisant le logiciel MATLAB, nous avons effectué des simulations qui ont montré la stabilité des courants statoriques et rotoriques, qui suivent une forme d'onde sinusoïdale. Cette étude contribue à une meilleure compréhension du comportement de la GADA et ouvre la voie à l'amélioration de sa performance et à son application dans le domaine de la production d'énergie éolienne.

*COMMANDE VECTORIELLE*  
*DE LA GADA*

### III .1 INTRODUCTION

La commande vectorielle par orientation du flux offre une solution attrayante pour améliorer les performances des applications à vitesse variable dans le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation [36]. Dans cette optique, nous avons développé une stratégie de commande pour la génératrice asynchrone à double alimentation en se basant sur l'orientation du flux statorique lorsqu'elle fonctionne en tant que génératrice. Cette approche met en évidence les liens entre les grandeurs électromagnétiques du stator et du rotor. Ces relations nous permettent d'agir sur les signaux rotoriques afin de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [37].

### III.2 COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

#### III .2.1 Principe de la commande vectorielle de la GADA

La commande par orientation de flux proposé par Blaschk, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée,  $I_{dr}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $I_{qr}$  est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  sont mutuellement découplées [38].

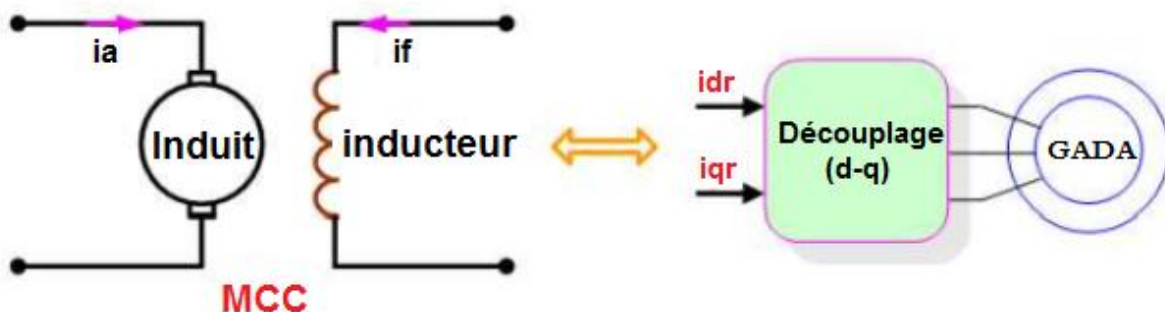


Figure III.1 Principe de la commande vectorielle.

### III .3. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est

souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [39] En se référant aux équations différentielles (III.2) qui décrivent la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant, rappelons que :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{[III.1]}$$

### III 3.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En optant pour un référentiel diphasé (x, y) associé au champ tournant et en alignant le vecteur du flux statorique  $\varphi_s$ .

Avec l'axe 'd' (afin de réaliser un découplage), nous pouvons écrire :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s$$

$$\varphi_{qs} = 0$$

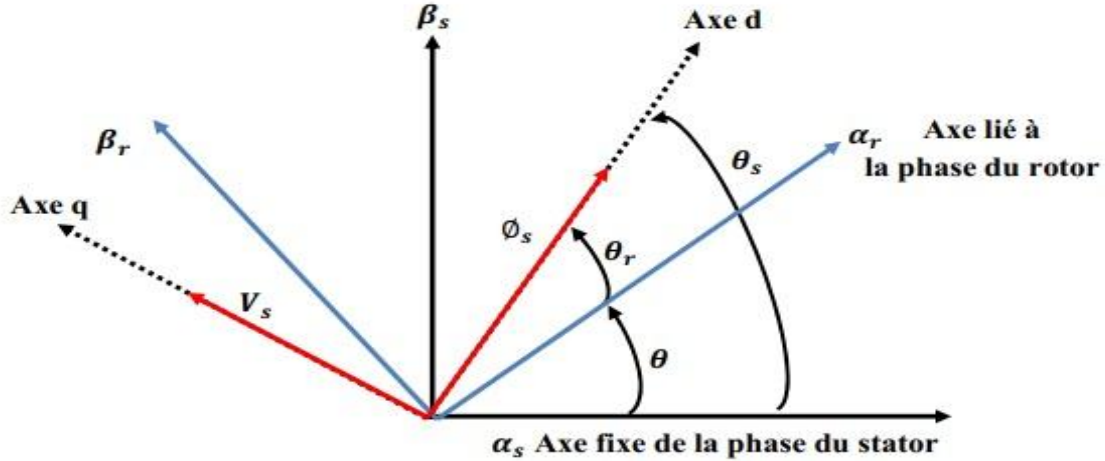


Figure. III.2 :Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

A travers les équations (III.1) et (III.2) on peut simplifier par le système d'équations comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot I_{ds} \\ V_{qs} = -R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{[III.2]}$$

Si on néglige la résistance  $s$ , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [AB07], [IM13]

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_{ds} = V_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{[III.3]}$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s \cdot I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_s \cdot I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{[III.4]}$$

### III.3.2. Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques

À partir de l'expression (III.5), nous sommes en mesure de formuler les équations reliant les courants statoriques aux courants rotoriques.

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{M}{L_s} I_{dr} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} &= \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{aligned} \quad \text{[III.5]}$$

### III.3.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un système de coordonnées biphasées, les composantes de puissance active et réactive du stator d'une machine asynchrone peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{[III.6]}$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{[III.7]}$$

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadratures par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{V_s}{L_s} I_{qr} \\ Q_s &= \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{aligned} \quad \text{[III.8]}$$

Il ressort de l'expression que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe  $d$  à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  imposée par le réseau [40].

### III.3.4. Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques

En substituant les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.9) dans l'équation (III.5) et en remplaçant le résultat obtenu dans l'équation (III.1), on peut exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques. Ainsi, on obtient :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r \cdot I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} \\ V_{qr} &= R_r \cdot I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{aligned} \quad \text{[III.9]}$$

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

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r \cdot I_{dr} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} &= R_r \cdot I_{qr} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{aligned} \quad \text{[III.10]}$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. En revanche le terme  $g \frac{M V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [41]

## III.4. La commande vectorielle directe

Cette méthode de contrôle a été proposée par BLASCHKE et nécessite la connaissance de l'amplitude et de la phase du flux pour obtenir un découplage entre le couple et le flux, quelles que soient les conditions transitoires. Le flux est régulé par rétroaction, il doit donc être mesuré ou estimé à partir des signaux de tension et de courant du stator. Pour obtenir des informations sur l'amplitude et la phase du flux, des capteurs tels que des capteurs à

effet Hall ou des bobines de mesure peuvent être utilisés, placés dans les dents du stator (entrefer de la machine).

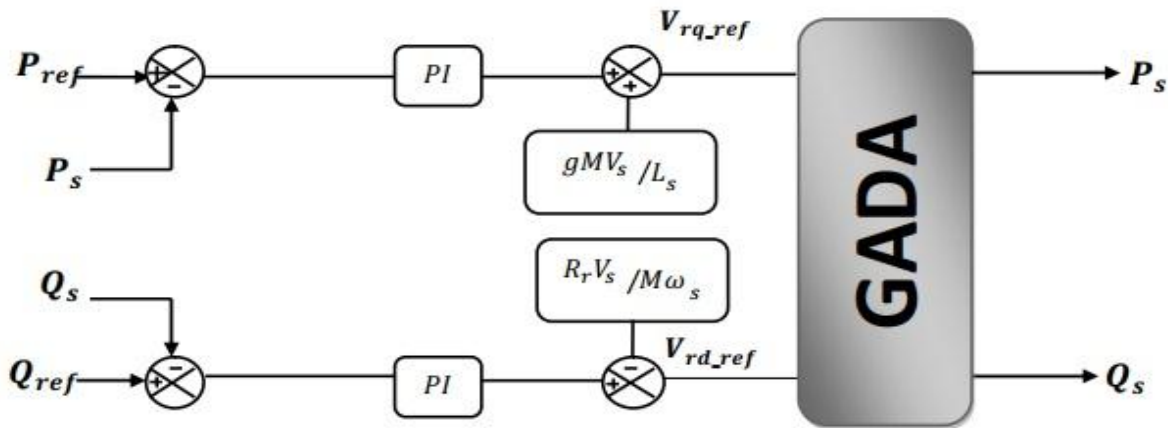


Figure.. III.3 Schéma bloc de la commande directe[42].

Cette approche présente l'avantage d'être moins sensible aux variations des paramètres. Cependant, elle présente l'inconvénient que les capteurs utilisés sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas fonctionner dans des conditions sévères telles que les vibrations et les températures élevées. De plus, les signaux captés sont affectés par des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse, ce qui nécessite l'utilisation de filtres ajustables automatiquement. [42]

### III.4.1. Commande directe en puissance active et réactive de la GADA

Dans cette partie, nous abordons la régulation indépendante des puissances active et réactive de la machine en se basant sur les observations faites dans le paragraphe précédent. Nous avons identifié une relation entre la puissance active et la tension d'une part, et la puissance réactive et la tension d'autre part (Figure III.4).

Analysons le schéma bloc du système de régulation représenté dans la figure III.3 pour identifier les éléments nécessaires à intégrer dans la boucle de régulation.

Lorsqu'on examine la relation entre les courants rotoriques et les puissances statoriques, on remarque l'apparition du terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ . Dans notre étude, nous avons supposé que l'éolienne était connectée à un réseau puissant et stable, ce qui rend ce terme constant. Par conséquent, nous n'incluons pas de régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la GADA, nous considérons que la tension du réseau est

stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de 1couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure III.3 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui nous donne le schéma simplifié représenté dans la figure III.4. [43]

### III.5. Commande indirecte

Cette méthode repose sur le principe de ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux, mais seulement sa position. Cette idée a été proposée par Hasse. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux et à ajuster son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants responsables de l'orientation du flux et du découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [44]

#### III.5.1. Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA

##### III.5.1.1. Commande en boucle fermée

Afin d'assurer une régulation optimale des puissances, nous allons mettre en œuvre deux boucles de régulation pour chaque axe, avec un régulateur proportionnel-intégral pour chacune d'entre elles. Une boucle sera dédiée à la régulation de la puissance, tandis que l'autre sera dédiée à la régulation du courant correspondant. Nous prendrons également en compte les termes de perturbations et de couplages qui apparaissent dans le schéma bloc du modèle de la GADA. Cette méthode de commande ne vise pas à réguler directement les puissances, contrairement à la méthode précédente. Elle repose plutôt sur la régulation indirecte des courants rotoriques mesurés, qui seront asservis aux courants de référence préalablement déterminés par les puissances statoriques de référence imposées à la machine.

$$\begin{aligned} I_{qr}^{ref} &= -\frac{L_s}{MV_s} \cdot P_s^{ref} \\ I_{dr}^{ref} &= \frac{V_s}{MV_s} - \frac{L_s}{MV_s} \cdot Q_s^{ref} \end{aligned} \quad \text{[III.11]}$$

Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

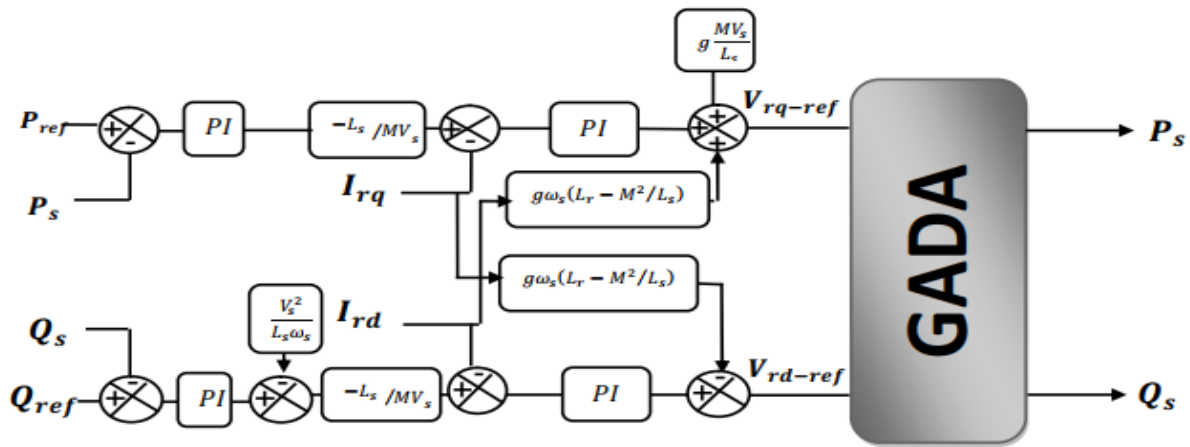


Figure. III.4 :Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée[44].

### II.5.1.2. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte repose principalement sur l'hypothèse d'un réseau électrique stable en termes de tension et de fréquence. Elle vise à asservir les courants rotoriques plutôt que les puissances, en utilisant les courants rotoriques de l'axe d et q

En utilisant les équations de puissance active et réactive statoriques du système (3.13), on peut déduire les références des courants rotoriques directs et en quadrature selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} I_{qr-r} = -\frac{L_s}{MV_s} \cdot P_s^{ref} \\ I_{dr-r} = \frac{V_s}{MV_s} - \frac{L_s}{MV_s} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad [III.12]$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous. Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive [45]

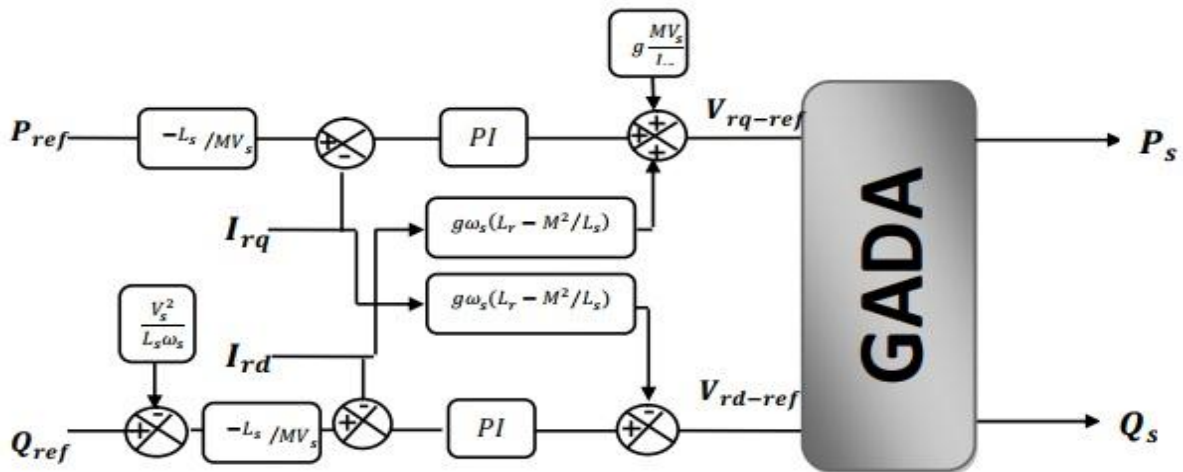


Figure. III.5 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert[45]..

### III.6. Type des régulateurs utilisés

Les régulateurs PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants Idr et Iqr Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en ouvre ,ainsi qu'il offre des performance acceptables à la régulation du système considéré [46]. Les régulateurs sur chaque axe ont pour fonction de réduire l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées.[47]

### III.7. Simulation de la commande vectorielle

En utilisant le logiciel MATLAB, les résultats de simulation ont été obtenus en utilisant le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation, avec une application de puissance active de 2 kW et une puissance réactive de 0. Dans le but d'analyser les performances des stratégies de commande vectorielle directe et indirecte, nous allons effectuer un essai à vitesse constante.

➤ **Essai à vitesse fixe**

Pour évaluer la capacité de suivi de la GADA, cette première expérience implique l'application de références d'entrée sous forme d'échelons de puissance active et réactive avec des amplitudes variables, tandis que la machine est entraînée à une vitesse fixe de 150 rad/s.

- La commande directe

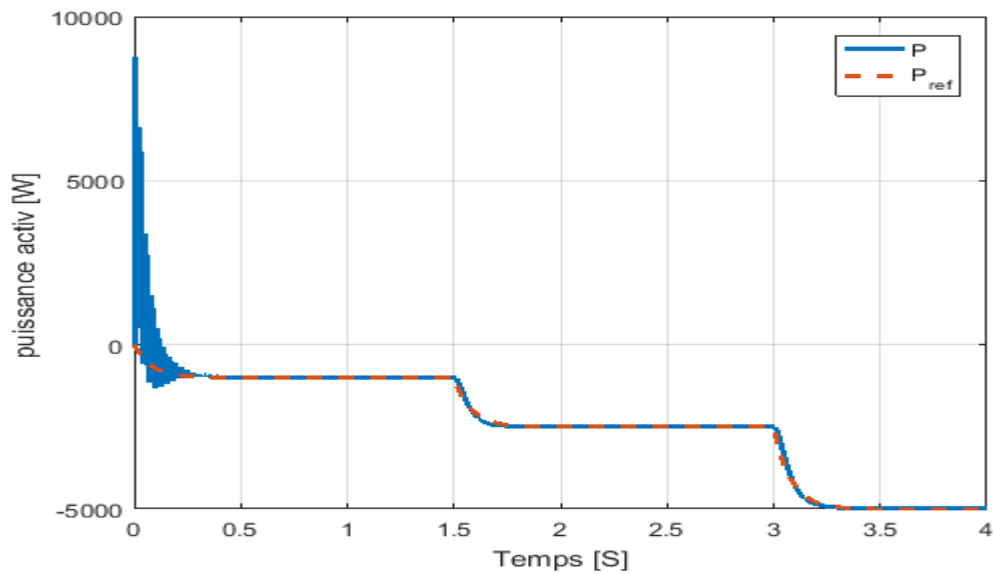


Figure III.6: la puissance active

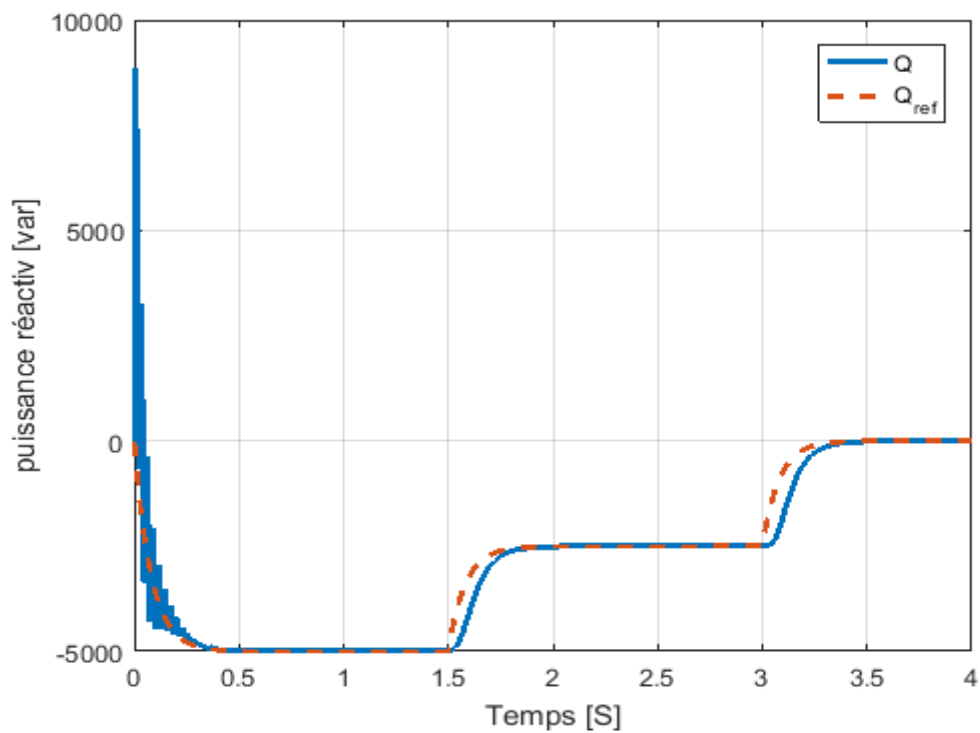


Figure III.7: La puissance réactive

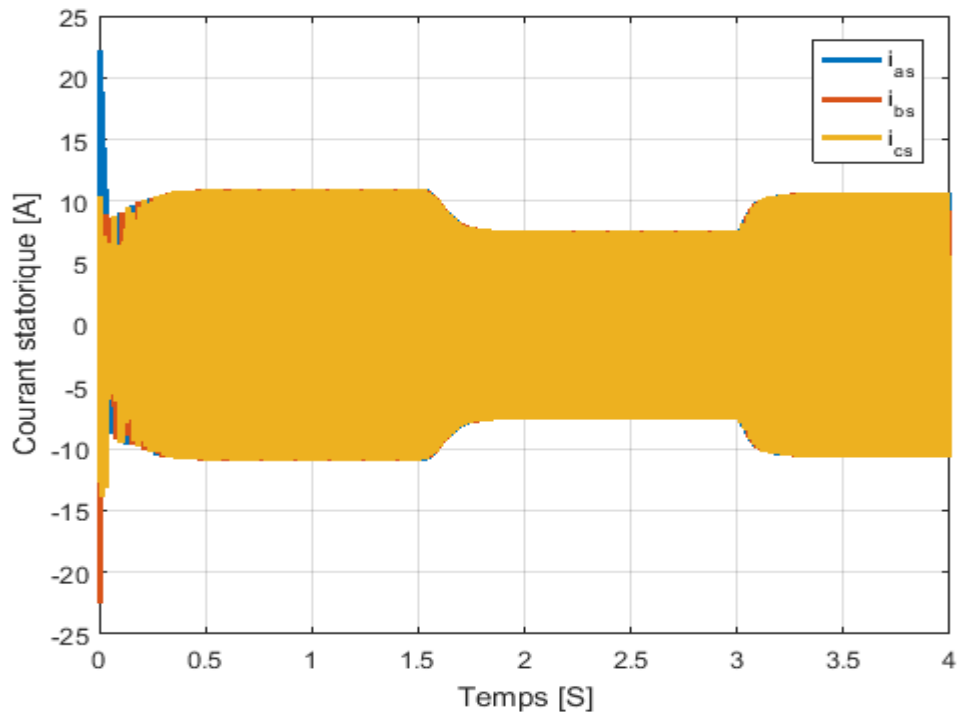


Figure III.8: Les courants statorique

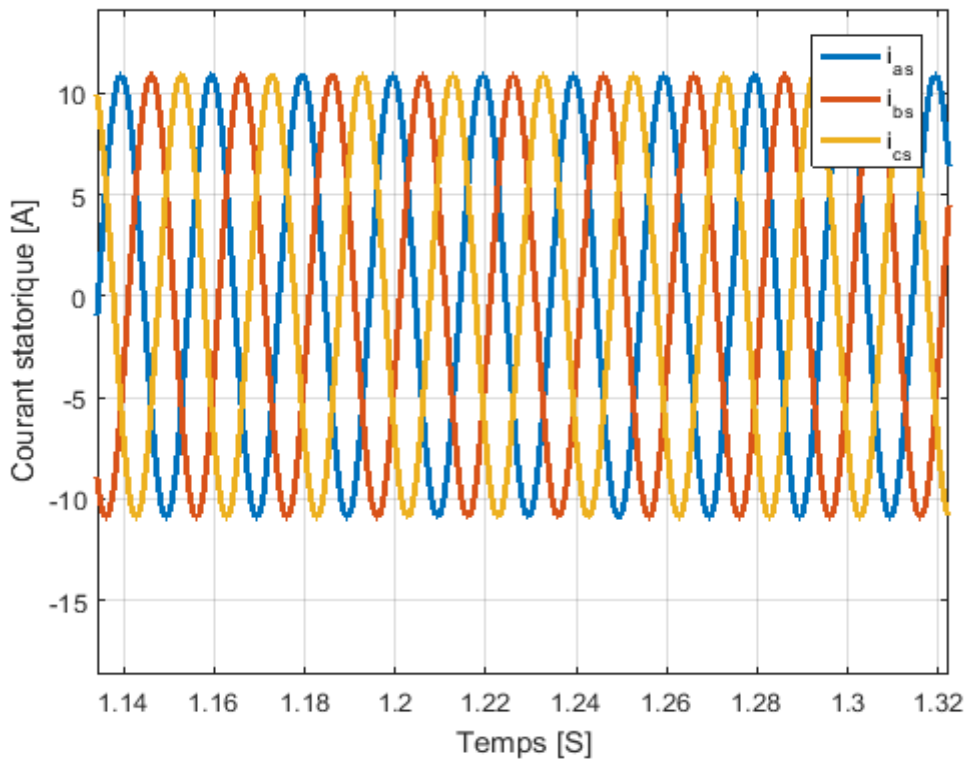


Figure III.9: Les courants statorique zoom

- **Commande directe avec onduleur**

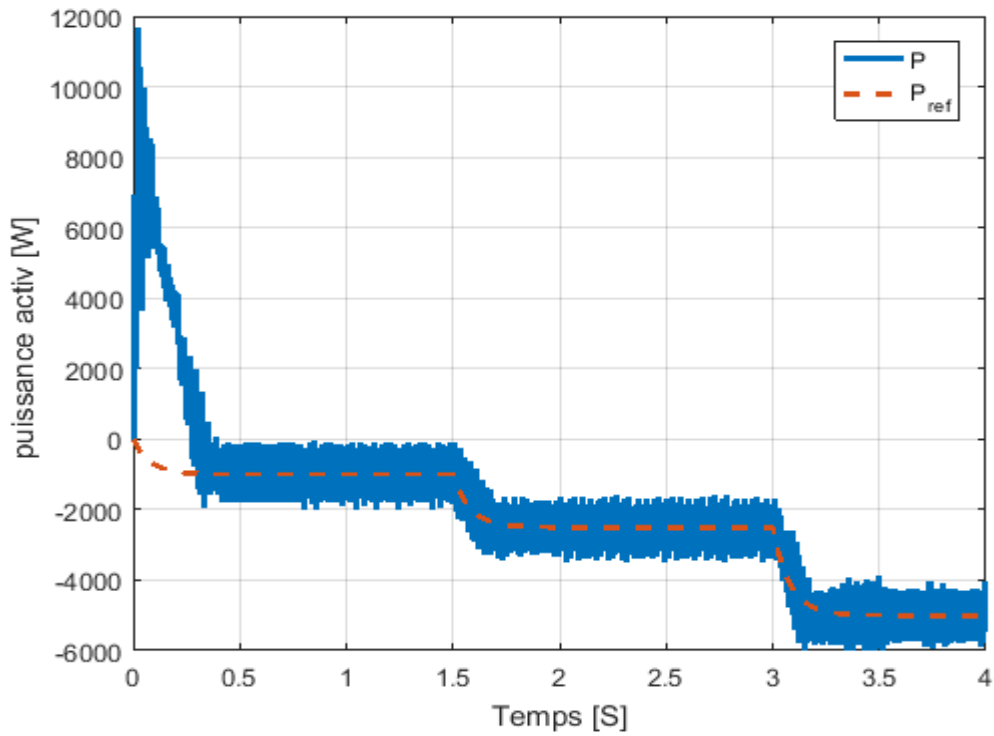


Figure III.10: La puissance active

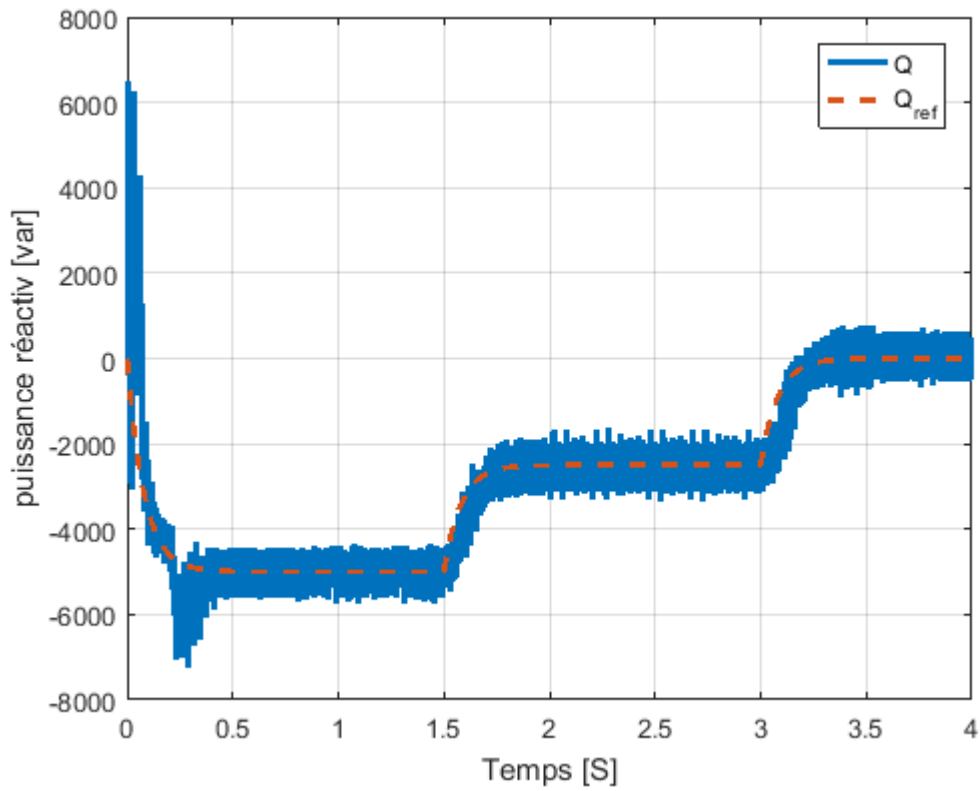


Figure III.11: La puissance réactive

- **Commande indirecte :**

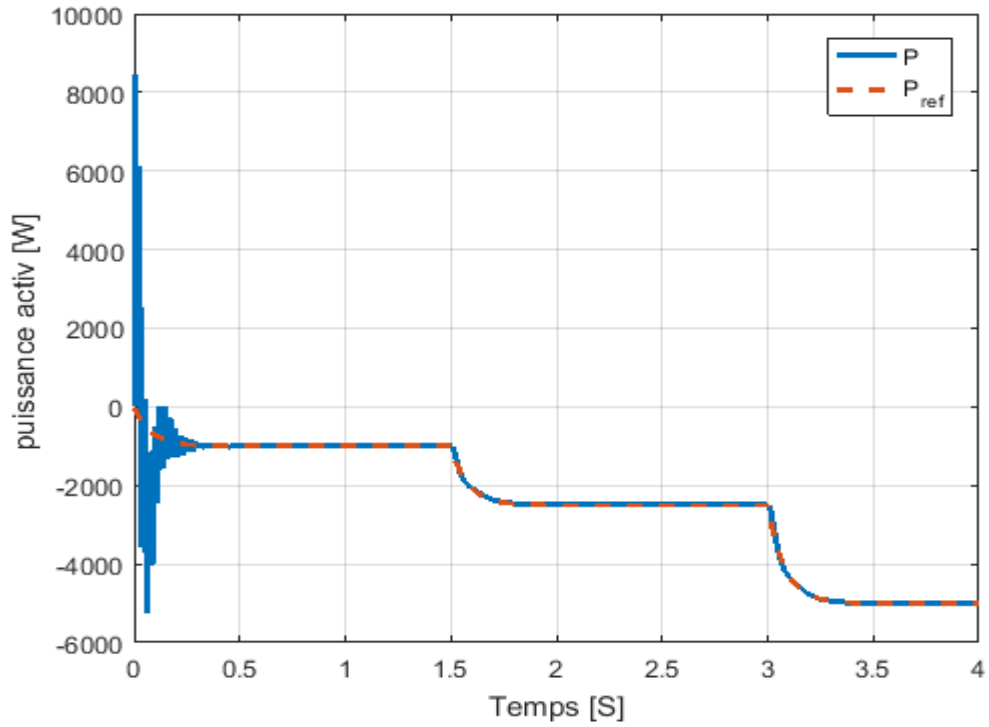


Figure III.12: La puissance active

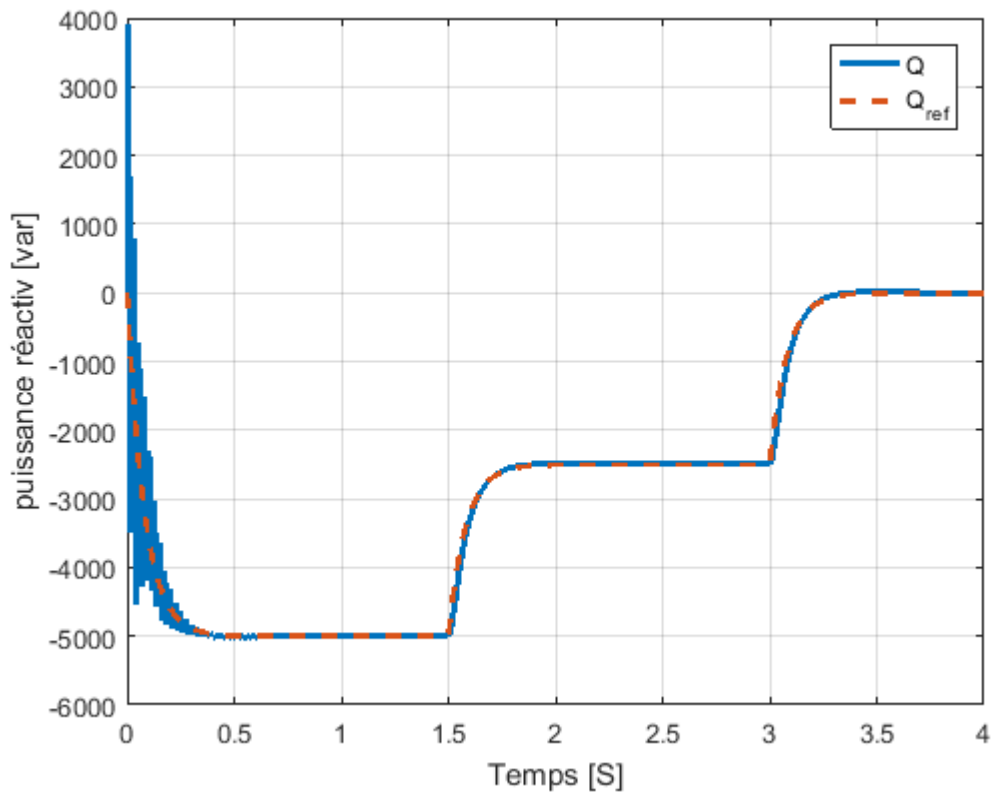


Figure III.13: La puissance ré active

- **Commande indirecte avec on :**

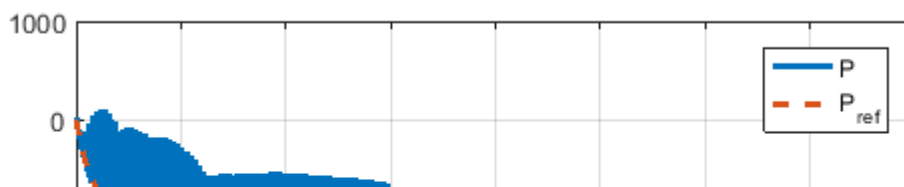


Figure III.14: La puissance active

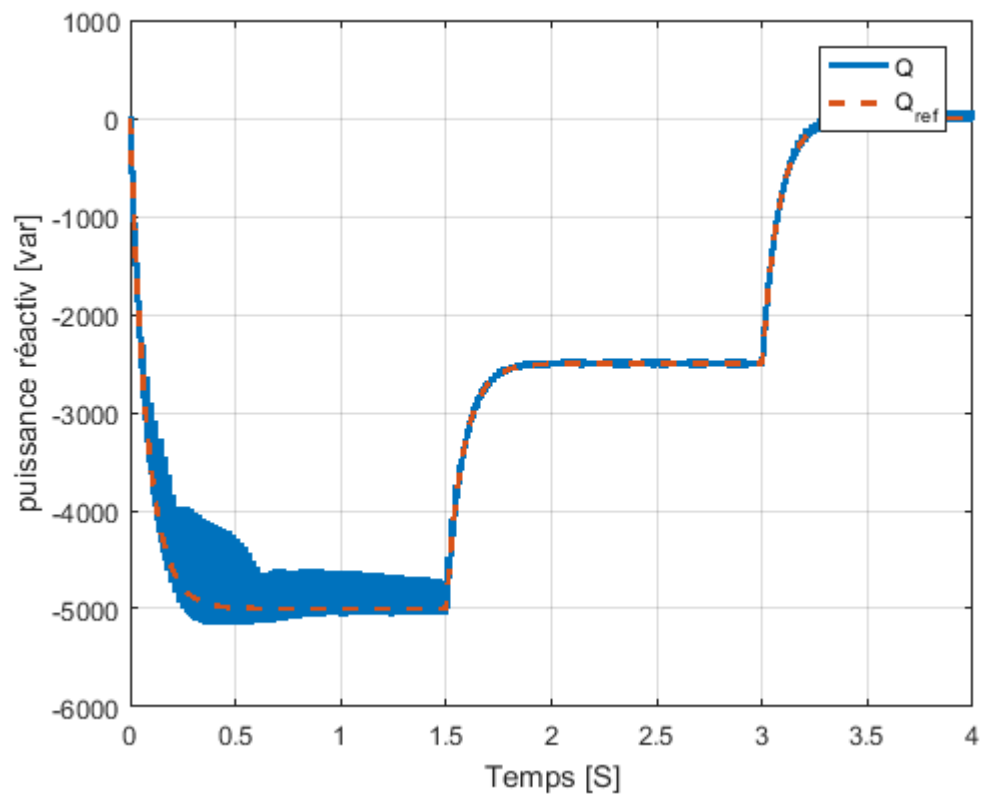


Figure III.15: La puissance réactive

### III.8. Interprétation des résultats

Pour évaluer les performances de la commande vectorielle directe et indirecte de la GADA, nous avons réalisé des simulations numériques selon les conditions suivantes :

- Application d'un échelon de puissance active statorique de référence égal à, -5000, -2500 et 0W aux instants  $t=0s$ ,  $t=0.25s$ ,  $t=1.5s$  et  $t=3s$  respectivement.
- Application d'un échelon de puissance réactive statorique de référence égal à , -5000, -2500 et 0 W aux instants  $t=0s$ ,  $t=0.25s$ ,  $t=1.5s$  et  $t=3s$  respectivement.

Les figures présentent une comparaison de la régulation de la puissance active et réactive statorique par la méthode vectorielle directe et indirecte. En observant les résultats de la simulation, on constate que les figures III.13 et III.15 montrent que la régulation effectuée par un régulateur PI dans les commandes vectorielles directe et indirecte donne des résultats satisfaisants : la puissance active et réactive statorique suit précisément les valeurs de référence souhaitées. Le courant reste bien limité à sa valeur admissible (figures III.8 et III.9). On remarque que la réaction du régulateur PI de la commande indirecte dans le régime transitoire est plus performante que la commande directe (présence d'oscillations).

### III.9.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons introduit le contrôle vectoriel par la vectorisation du flux statorique de GADA. Cela nous a permis de simplifier le modèle mathématique.

Le contrôle des forces effectives et réactives fournies au réseau a été introduit de deux manières direct et indirect. Nous avons également fourni un schéma fonctionnel de chaque commande et une approche pour optimiser le débogueur PI.

Enfin, nous présentons quelques résultats de simulation réalisés sur une éolienne sous MATLAB/SIMULINK. Ces résultats indiquent que le contrôle indirect produit une meilleure dynamique, tandis que le contrôle indirect organise mieux les autorités.

*COMMANDE*  
*DIRECT DE*  
*PUISSANCE*

## IV.1.Introduction

Le contrôle direct a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures.

La première application développée était le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle était connue sous le nom de Contrôle Direct de Couple (Direct Torque Control, DTC en anglais). Dans ce cas, on contrôle le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sans aucun bloc de modulation [48].

Ensuite, une technique similaire appelée Contrôle Direct de Puissance (en anglais Direct Power Control, DPC) était développée après par [49] pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau (génératrice dans notre cas). Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées.

Deux différentes tendances sont identifiées par les chercheurs qui travaillent sur le Contrôle Direct de Puissance. D'un côté, une définition générale décrit le DPC comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Cette définition inclut les deux types des correcteurs DPC principaux, le DPC classique et le DPC avec Modulation vectorielle. D'un autre côté, une définition plus restrictive analyse le DPC comme le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation sont choisis directement par un tableau de commutation. Cette définition n'inclut que le DPC classique [50]

## IV.3.Principe générale de la technique DPC-C

La structure globale de la DPC-C, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM », est illustrée à la figure (IV.1). Elle est similaire à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction. Au lieu du couple et du flux rotorique, ce sont les puissances instantanées actives et réactives statoriques qui sont les grandeurs contrôlées. Le principe de la technique DPC-C consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation  $(S_a, S_b, S_c)$  des semi-conducteurs constituant le convertisseur coté machine, à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs numérisées entre les références des puissances active et réactive et les valeurs réelles, fournies par deux comparateurs à hystérésis de

sorties numérisées et respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur du flux rotorique se trouve [51], [52][53]

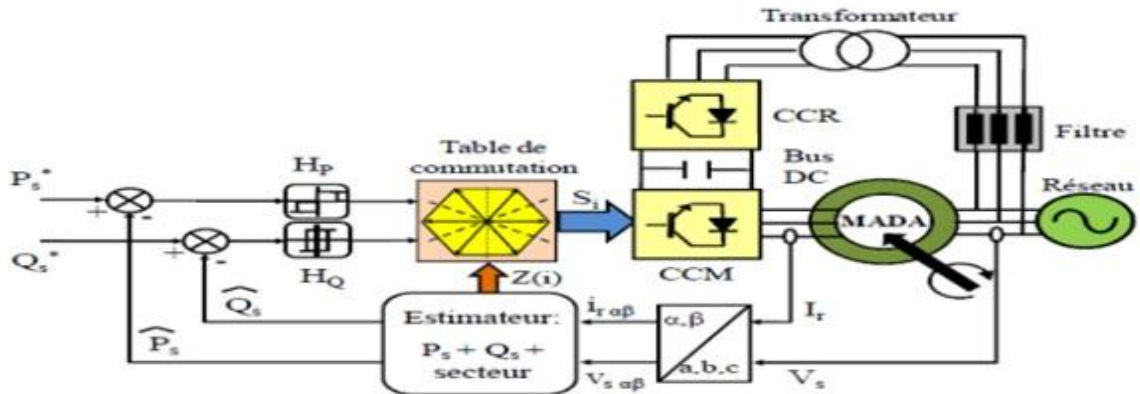


Figure IV 1 Configuration de la DPC-C de la MADA[53].

#### IV.4.DPC classique :

Le contrôle direct de puissance (DPC) est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un redresseur MLI. Les erreurs entre les valeurs de référence des puissances active et réactive instantanées et leurs mesures sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis qui déterminent l'état de commutation des semi-conducteurs, avec l'aide d'un tableau de commutation et la valeur du secteur où se trouve la tension de la génératrice [54]. La boucle de tension du bus continu est réglée avec un correcteur PI. L'idée principale du DPC classique est illustrée par la figure (IV.2).

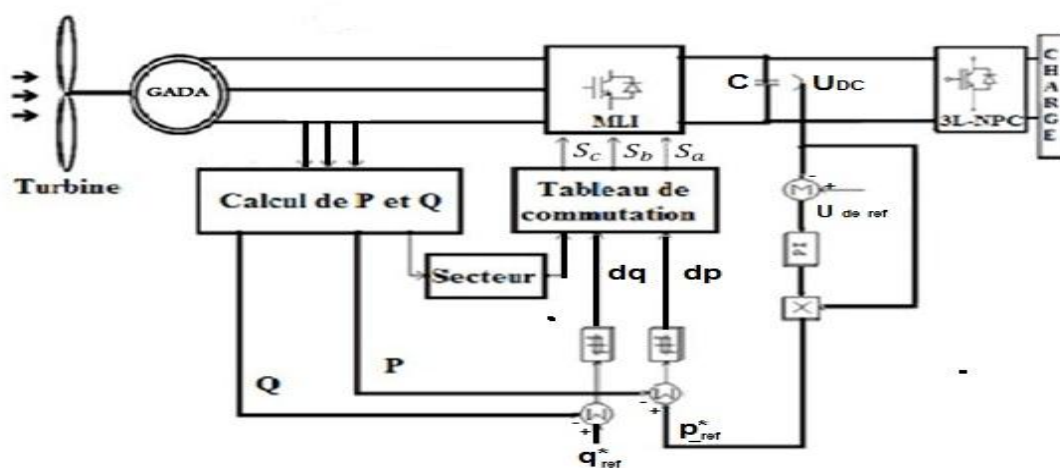


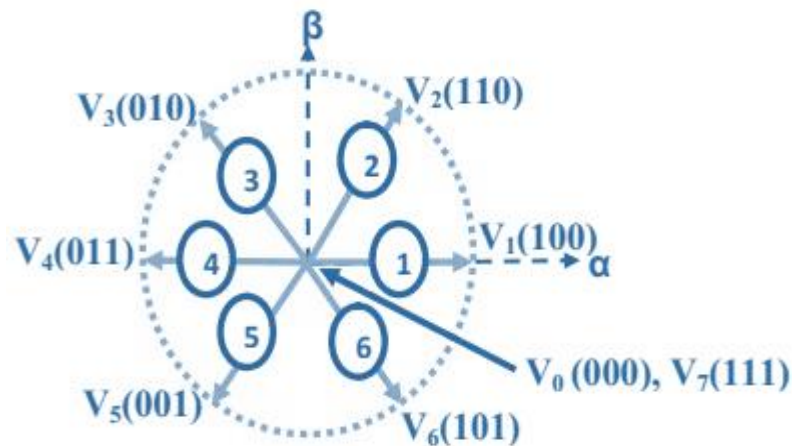
Figure IV 2 : principe de DPC classique[54].

### IV.5. Tableau de commutation:

Le tableau de commutation présenté dans cette partie a été développé dans qui utilisent une technique relativement simple et divise le plan en six secteurs [55].

(y(1)-y(6)). D'autres auteurs divisent le plan en douze secteurs afin d'améliorer la précision. Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature.

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes lesquelles engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la GADA. Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la figure (IV.3).



**$V_3 [010]$  signifie :**

- 0 : interrupteur en haut du 1<sup>er</sup> bras ouvert;
- 1 : interrupteur en haut du 2<sup>ème</sup> bras fermé;
- 0 : interrupteur en haut du 3<sup>ème</sup> bras ouvert;

**Figure IV 3:** Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux [56]

Il en découle que le tableau (IV.4) des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur celui de la puissance réactive. Les signaux de  $H_p$  et  $H_q$  ainsi la position de vecteur flux rotorique  $\delta$ , représentent les entrées de cette table de vérité, alors que les états de commutation ( $S_a, S_b, S_c$ ) sont les sortie

		3 niveaux			2 niveaux			
		2 niveaux			3 niveaux			
Comparateur								
Puissance réactive : $H_Q$		1			-1			
Puissance active : $H_P$		1	0	-1	1	0	-1	
Secteur Z(i) vis-à-vis de l'angle $\delta$	1	330°, 30°	$V_5$	$V_7$	$V_3$	$V_6$	$V_0$	$V_2$
	2	30°, 90°	$V_6$	$V_0$	$V_4$	$V_1$	$V_7$	$V_3$
	3	90°, 150°	$V_1$	$V_7$	$V_5$	$V_2$	$V_0$	$V_4$
	4	150°, 210°	$V_2$	$V_0$	$V_6$	$V_3$	$V_7$	$V_5$
	5	210°, 270°	$V_3$	$V_7$	$V_1$	$V_4$	$V_0$	$V_6$
	6	270°, 330°	$V_4$	$V_0$	$V_2$	$V_5$	$V_7$	$V_1$
$V_0 = [0, 0, 0]; V_1 = [1, 0, 0]; V_2 = [1, 1, 0]; V_3 = [0, 1, 0]; V_4 = [0, 1, 1]; V_5 = [0, 0, 1];$ $V_6 = [1, 0, 1]; V_7 = [1, 1, 1]$								

Tableau IV-4 : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive)

En réalité, il existe plusieurs tables de commutation utilisées par la DPC, en plus de la table de commutation mentionnée dans le tableau IV.4. Ces différentes tables ont été proposées dans la littérature [57], [58], [59]. Cependant, le fondement essentiel de la technique DPC repose sur le fait que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps, et il semblera traverser chaque secteur un par un s'il est échantillonné suffisamment. L'analyse du tableau IV.4 indique que si le flux rotorique se trouve, par exemple, dans le secteur 2 et que le vecteur vient d'être appliqué, la variation de la puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative, car le vecteur entraîne une diminution de la puissance réactive au stator. Si tel n'était pas le cas, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus précise et que le

flux se trouverait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Étant donné qu'il était précédemment dans le secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, car il aurait "sauté" par-dessus deux autres secteurs.

### IV.6 Régulateurs à hystérésis

Pour obtenir d'excellentes performances dynamiques, le choix d'un régulateur à hystérésis à trois niveaux pour la puissance active ( $P_s$ ) et à deux niveaux pour la puissance réactive ( $Q_s$ ) semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée. Ces comparateurs (Figure IV.5) doivent permettre de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens, et ce, pour les modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone de la MADA. La DPC pour la MADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de manière à réduire et maintenir les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence dans les limites des bandes d'hystérésis.

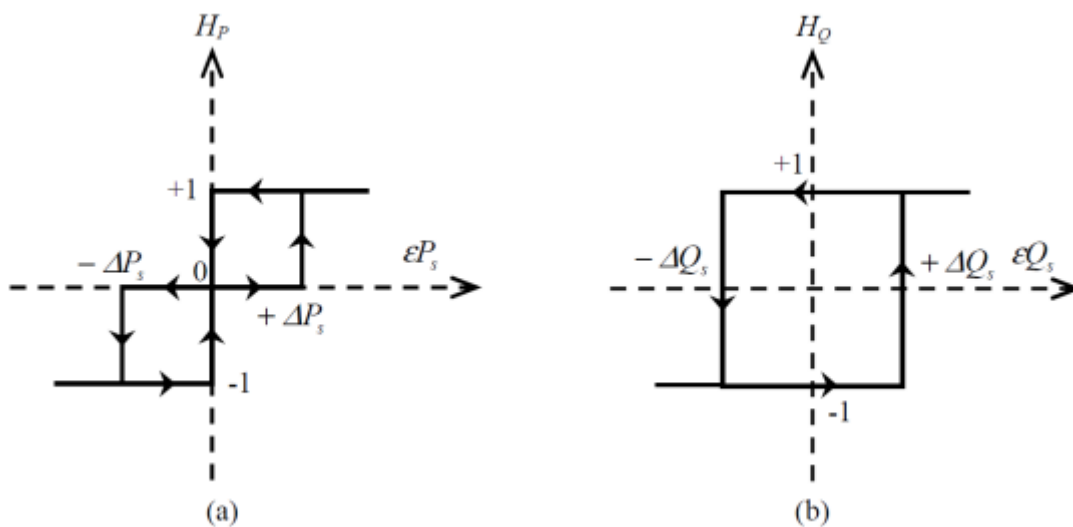


Figure [IV.5] : Comparateurs à hystérésis , (a) puissance active , (b) puissance réactive [58].

Ces comparateurs à hystérésis, lorsqu'ils sont utilisés pour les puissances active et réactive, sont capables de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de maintenir les valeurs à l'intérieur de cette zone :

$$\text{Si } \epsilon Q_s \geq \Delta Q_s \quad \rightarrow H_Q = 1$$

$$\text{Si } \epsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \quad \rightarrow H_Q = -1$$

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s & \rightarrow H_p = 1 \\
 \text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s & \rightarrow H_p = 0 \\
 \text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s & \rightarrow H_p = -1
 \end{aligned}
 \tag{IV. 1}$$

Un inconvénient majeur des comparateurs analogiques est la variation de la fréquence d'échantillonnage. Cependant, ce problème peut être résolu en utilisant des comparateurs discrets. Cela signifie que les variations des puissances ne sont pas maintenues de manière précise dans la bande d'hystérésis, mais fonctionnent avec un temps d'échantillonnage fixe.

C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude du système. La (Fig.IV.6) montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{p}$

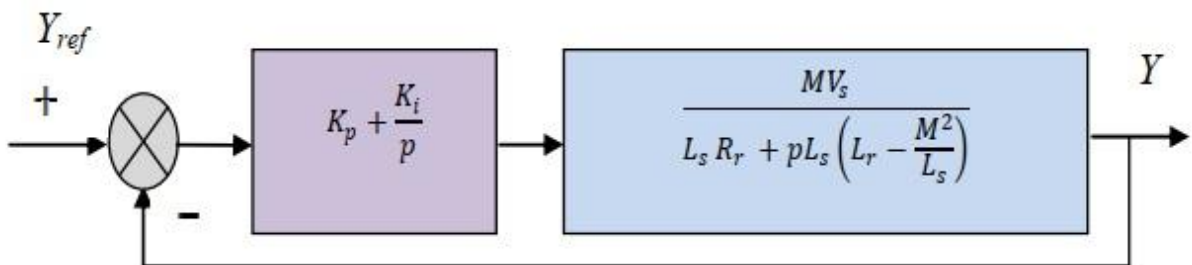


Figure IV 5 : Système régulé par un PI

## IV.2. Théorie de la commande directe de puissance

L'étude de la littérature est parfois surprenante. Généralement, les systèmes évoluent sur des bases qui sont à l'origine très simples et qui se complexifient avec le temps. Le passage de la commande vectorielle vers la commande directe de couple et de flux (DTC) est marqué par une simplification majeure de l'algorithme de commande. Seulement, on pourrait vraiment se demander pourquoi le développement de la commande directe des puissances active et réactive (DPC) n'est pas survenu avant la commande DTC [59]. En effet, si la simplification de l'algorithme de commande a été majeure dans le premier cas, elle l'est tout autant lorsque l'on regarde le passage de la commande DPC vers la commande DTC.

Le développement de cette nouvelle technique (vis-à-vis la DTC) de commande est basé exactement sur les mêmes relations vectorielles qui gouvernent la commande DTC. Seulement, plutôt que de s'attarder à contrôler des composantes estimées à partir des paramètres de la machine, la commande s'intéresse uniquement à l'échange des puissances

active et réactive entre la machine et sa source d'alimentation. De plus, puisque l'on peut calculer les puissances instantanées sans avoir recours à des transformations de référentiels en rotation, l'angle de la position des phases rotoriques ne sera alors plus nécessaire. Aussi, la puissance étant directement calculée à partir des courants et de la tension, la connaissance des paramètres de la machine ne sera plus requise, une caractéristique aussi étonnante que les performances qui en découlent, à rendre jaloux n'importe quel manufacturier d'entraînements électriques [58].

Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement, reprenons les schémas vectoriels de la commande directe du couple et de flux mais en discutant plutôt de la puissance active et réactive. Il est entendu que l'augmentation du couple (angle  $\delta$ ) à vitesse constante implique une augmentation de la puissance consommée par la machine. On rappelle ici que la puissance positive est absorbée par la machine en mode moteur alors qu'elle est négative en mode générateur. Cette relation est aussi vraie en mode générateur où une augmentation du couple réduit la puissance générée par la machine (augmente la puissance positive). Il suffit essentiellement d'échanger le terme couple par puissance active et flux par puissance réactive dans la commande DTC afin d'obtenir un entraînement à commande directe des puissances active et réactive. Malheureusement, une grande difficulté persiste dans le calcul de l'angle du flux rotorique. À cet égard, la commande directe des puissances active et réactive offre un moyen robuste de connaître le secteur actuel du flux rotorique [58]

#### IV.7 Calcule des puissances instantanées :

Les puissances instantanées sont déterminées par les formules suivantes :

$$\begin{cases} p = R_e(\bar{e} \cdot \bar{i}^*) \\ q = I_m(\bar{e} \cdot \bar{i}^*) \end{cases} \quad [IV.2]$$

$p$  : la puissance active instantanée.

$q$  : la puissance réactive instantanée.

$e$ : vecteur de tension.

$i$  : vecteur de courant et le symbole \* dénote le conjugué.

Ainsi, les puissances actives et réactives instantanées totales sont calculées comme suite:

$$\begin{cases} p = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \\ q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) \cdot i_a + (e_c - e_a) \cdot i_b + (e_a - e_b) \cdot i_c] \end{cases} \quad [IV.3]$$

Dans la littérature, deux techniques sont suggérées pour calculer les puissances instantanées sans utiliser de capteurs :

- Estimation de la tension.
- Estimation du flux.

#### IV.7.1 Calcule des puissances instantanées par estimation de la tension :

Le contrôle direct de la puissance (DPC) est fondamentalement basé sur l'estimation de la tension, obtenue à partir de l'équation (IV.4) :

$$\hat{e}_{a,b,c} = U_{dc} \cdot S_{a,b,c} + L \frac{di_{a,b,c}}{dt} \quad [IV.4]$$

$$\begin{cases} p = U_{dc}(S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c) + L \left( \frac{di_a}{dt} \cdot i_a + \frac{di_b}{dt} \cdot i_b + \frac{di_c}{dt} \cdot i_c \right) \\ q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ -U_{dc}[S_a(i_b - i_c) + S_b(i_c - i_a) + S_c(i_c - i_b)] + 3L \left( \frac{di_a}{dt} \cdot i_c - \frac{di_c}{dt} i_b \right) \right\} \end{cases} \quad [IV.5]$$

Malgré sa simplicité, cette méthode présente plusieurs inconvénients, tels que :

- L'évaluation de la puissance dépend de l'état de commutation. Par conséquent, il est recommandé d'éviter le calcul de la puissance au moment de la commutation en raison de l'erreur élevée de l'estimation.

#### IV.7.2 Calcul des puissances instantanées par estimation du flux :

En plus de son rôle dans la synchronisation, le flux est également utilisé pour le calcul des puissances instantanées. Ainsi, en intégrant la tension de la génératrice, un vecteur de flux est généré dans les coordonnées ( $\alpha\beta$ ), comme indiqué dans l'équation (IV.6). La chute de tension dans la résistance a été négligée.

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int e_\alpha dt = \int \left( v_\alpha - L \frac{di_\alpha}{dt} \right) dt \\ \psi_\beta = \int e_\beta dt = \int \left( v_\beta - L \frac{di_\beta}{dt} \right) dt \end{cases} \quad [IV.6]$$

Ou :

$\Psi$  : est le flux estimé et  $v$  la tension du convertisseur.

En considérant la tension de l'onduleur en coordonnées  $\alpha/\beta$ , l'expression du flux devient la suivante :

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int \left( \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)) \right) dt - Li_\alpha \\ \psi_\beta = \int \left( \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_b + S_c) \right) dt - Li_\beta \end{cases} \quad [IV.7]$$

On obtient la tension à partir du flux estimé :

$$\bar{e} = \frac{d}{dt} \bar{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \Psi e^{j\omega t} = \frac{d\Psi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \bar{\Psi} \quad [IV.8]$$

Où :

$\bar{\Psi}$ : est le vecteur du flux estimé.

$\Psi$  : l'amplitude du flux estimé.

Dans cette méthode, les calculs des puissances instantanées sont effectués dans les coordonnées  $\alpha/\beta$  selon la formule suivante.

$$\begin{cases} p = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \\ q = e_\beta i_\alpha + e_\alpha i_\beta \end{cases} \quad [IV.9]$$

Étant donné que les tensions sont presque sinusoïdales et équilibrées, les dérivées de l'amplitude du flux sont négligeables. Par conséquent, les puissances actives et réactives instantanées peuvent être calculées à l'aide de l'équation suivante.

$$\begin{cases} p = \omega \cdot (\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \\ q = \omega (\Psi_\alpha i_\alpha - \Psi_\beta i_\beta) \end{cases} \quad [IV.10]$$

Comparée à la méthode d'estimation de la tension, cette approche présente plusieurs avantages, notamment une fréquence d'échantillonnage plus faible. Les discontinuités de l'estimation de la tension du convertisseur sont filtrées par l'intégrateur, qui agit comme un filtre passe-bas. Cela permet d'améliorer la qualité du signal et de réduire les artefacts indésirables [48].

## IV.8 Avantages et les inconvénients de la structure de contrôle DPC classique :

### IV.8.1 Les avantages :

1. Réponse dynamique rapide : La structure de contrôle DPC classique permet une réponse rapide aux variations de charge, ce qui lui permet de maintenir une régulation précise de la puissance active et réactive.

2. Contrôle direct de la puissance active et réactive : La DPC classique permet de réguler directement la puissance active et réactive, ce qui offre un contrôle plus précis et efficace de ces paramètres.
3. Indépendance vis-à-vis des paramètres du système : La DPC classique est relativement insensible aux variations des paramètres du système, ce qui la rend robuste et adaptable à différentes configurations

**IV.8.2 Les inconvénients :**

1. Sensibilité aux perturbations : La DPC classique peut être sensible aux perturbations externes, telles que les variations de tension ou les interférences électromagnétiques, ce qui peut affecter sa performance.
2. Calibration précise requise : Pour assurer un fonctionnement optimal, la DPC classique nécessite une calibration précise des paramètres du contrôleur, ce qui peut être complexe et chronophage.
3. Complexité de mise en œuvre : La mise en œuvre de la DPC classique peut être relativement complexe, nécessitant une connaissance approfondie du système et des algorithmes de contrôle avancés

**III.7 Résultats de simulation :**

Dans cette section la commande DPC de la MADA de 5kW (annexe A) a été testée en simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Toutefois, dans le cadre de la simulation représente une partie du profil de la figure (IV.7 ) et (IV.8). Afin de ne pas dépasser la puissance nominale de la machine.

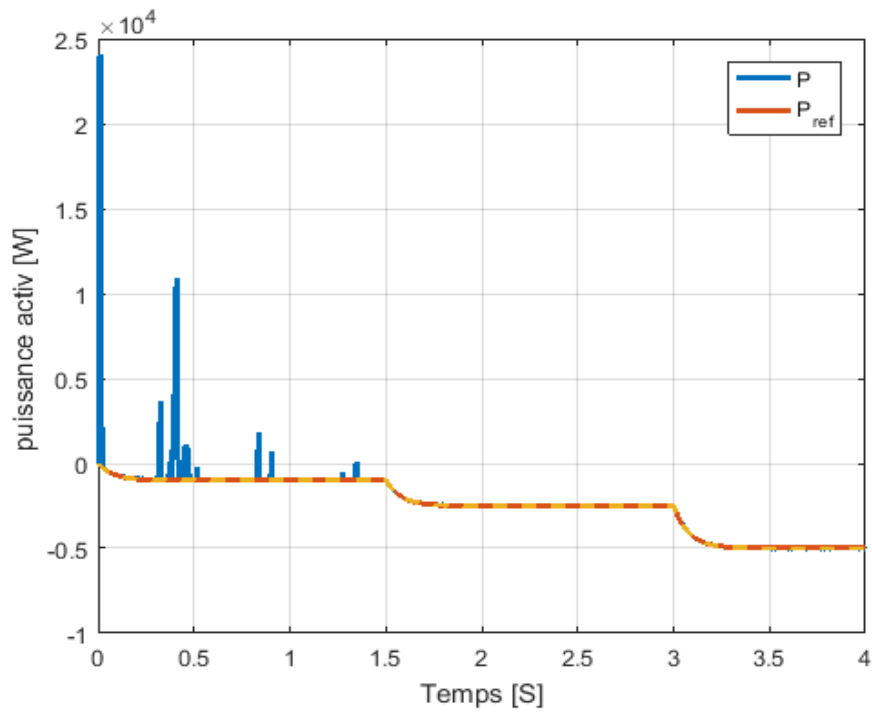


Figure IV 7 - La puissance active

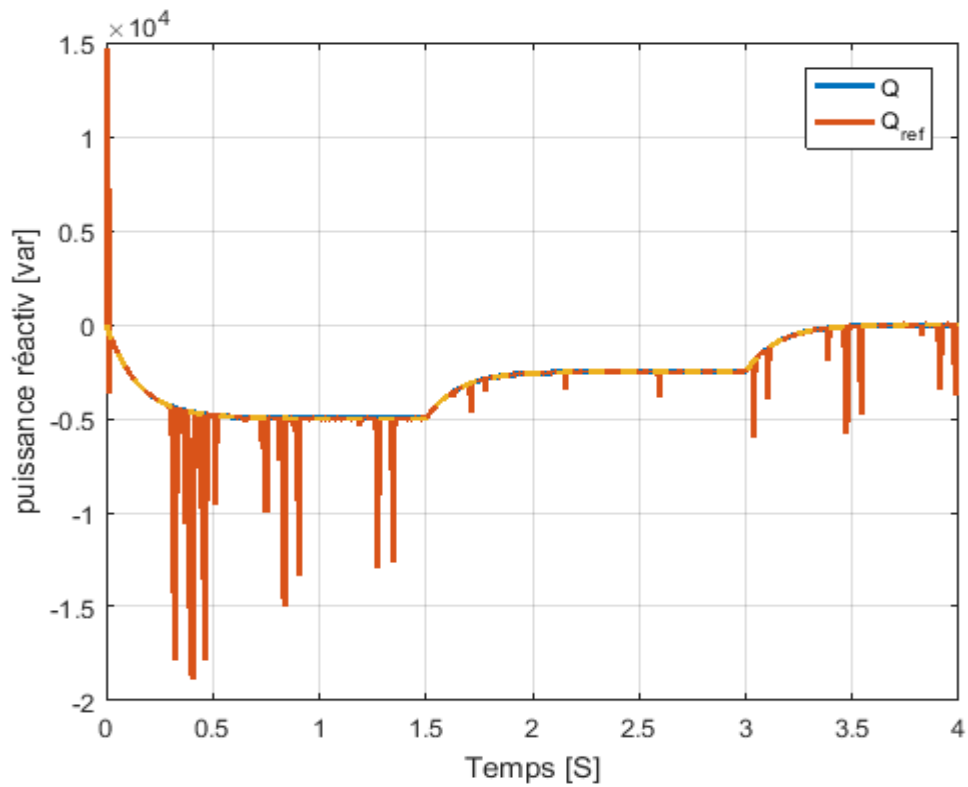


Figure IV 8 -La Puissance réactive

## **II.8 Interprétation des résultats**

On voit que la puissance statorique active (et réactive) suit strictement les valeurs de référence requises comme le montrent les figures (IV-7) (IV-8). Ainsi, nous avons remarqué que la réaction du régulateur Pi est capable de maintenir la puissance active (et réactive) du stator conformément aux valeurs de référence requises.

## **III.9 Conclusion**

Ce chapitre a traité de l'apport de la loi de régulation DPC à la séparation des puissances active et réactive. Le DPC classique (DPC-C) offre des performances dynamiques élevées avec une structure simple. GADA produit de grandes fluctuations de courant et des harmoniques. Selon les résultats de simulation obtenus. Les courants sinusoïdaux sont échantillonnés, les harmoniques sont réduits et le facteur de puissance est constant avec un contrôle séparé de la puissance active et réactive.

*CONCLUSION*

*GENERALE*

L'objectif principal du travail présenté ici était d'étudier, de modéliser et de mettre en œuvre par simulation numérique la commande directe de puissance (DPC) d'une travée intégrée à un système éolien, afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à la collecte d'informations générales sur les systèmes éoliens, et nous avons présenté quelques concepts sur l'énergie éolienne en plus des concepts de base de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et des différents types d'éoliennes avec des machines électriques utilisées en conversion d'énergie ce.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons abordé les méthodes d'exploitation des systèmes éoliens ainsi que les types de machines électriques utilisées dans le système éolien et mentionné les avantages et les inconvénients de GADA

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué une modélisation globale de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. Au début, nous avons fait une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa description, ses classifications, son principe de fonctionnement et tout ce qu'il faut savoir de la base à ses domaines d'application, en particulier dans notre domaine. Pour la partie générateur, les résultats de la simulation ont montré la variation des grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques, ce qui nous permet de bien comprendre son comportement, puis d'appliquer la commande pour augmenter l'efficacité et le rendement.

Dans le chapitre 3, nous avons présenté une étude comparative du contrôle direct et indirect des transporteurs GADA intégrés dans le système éolien. Dans un premier temps, une modélisation des éoliennes et des génératrices est effectuée afin d'appliquer la technique de direction d'écoulement (FOC). Ensuite, la synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI) est effectuée. Ce type de régulateur reste le plus couramment utilisé pour le contrôle, ainsi que dans de nombreux systèmes d'organisation industrielle.

Nous avons déjà vu que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus efficace. Par contre, la méthode indirecte nous permet, avec des itérations

successives, d'avoir un système très peu efficace. Il est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport au contrôle direct, mais il permettra un fonctionnement optimal du système de production d'électricité en réduisant les soucis liés aux changements paramétriques de GADA.

Dans le dernier chapitre, l'objectif de notre travail était d'étudier la commande directe de puissance (DPC), appliquée à un générateur à deux flux relié à une éolienne, pour en améliorer les performances, et ainsi pouvoir extraire le maximum d'énergie.

**Bibliographiques**

- [11] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [12] A. Harrouz, Harrouz Omar, "Application of Solar Energies to Reinforce the Flow Water of Foggara in the Adrar Region", International Journal of Smart Grids, ijSmartGrid, Vol.2, N. 4, March, p. 203-208, Dec. 2018. ISSN 2602-439X.
- [13] W. Lawrence Neuman, Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches, 7ème édition, Pearson, 2011
- [14] Tolfree, David; Mark J. Jackson (2007). Commercializing MicroNanotechnology Products. CRC Press. p. 33. ISBN: 0849383153.
- [10] Arab, A. H. (2011). L'énergie Solaire Photovoltaïque'. Bulletin des Energies Renouvelables, CDER, Algérie, (19).
- [9] j. Martin, « Energies éoliennes » Technique de l'ingénieur, traité de Génie énergétique, pp, B85851-B58521
- [49] C. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude et Expérimentation –» Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [36] Bouaddou Oualid "commande vectorielle en puissance d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation" TIZ-OUZOU 2012
- [6] : M. K. TOUATI, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 15/01/2015.
- [1] Moussa sidou abdoulaziz « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production d'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur en électrotechnique ENP, 10, AV. Hassan Badi, El-harrach, Algeria. 2007.

[2] Adam MIRECKI « Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à un éolienne de petite puissance » these doctorale, préparée au Labortoire

d'Electroechneque et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH. Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828, soutenue le 5 avril 2005.

[4] Haritza CAMBLONG « Minmisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'electricité par des aérogénérateurs à vitesse variables » Thèse doctorale, Ecole nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bibliographie Bordeaux, soutenue le 18 décembre 2003.

[3] AGGON GHANIA « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraiment électrique d'un système de génération éolienne » Thèse magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou,

[22] A.TELLIA «Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT » Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2012.

[5] : A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy . 11/12/2006.

[23] F. MERRAHI. « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) ». Mémoire de Magister ENP 2007

[24] A. BOYETTE. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne ».Thèse de doctorat, Nancy I 2006.

[31] : R. AZAIZIA, "Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux", mémoire de magister, université m'Hamed Bougara. 2008.

[32] : H. BENNANI, "Machine asynchrone a double alimentation : Les lois de commande en régime permanent", Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et post doctorales de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.), UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC. 2011

[45] : S. METATLA, " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à Base d'une MADA " , mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique.2009.

[40] Imad MEZERZI , « Contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation», Mémoire de Master, Université de M'sila, Algérie, 2013.

[39] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11, France, 2006.

[8] Multon, B. (1999, January). L'énergie électrique: analyse des ressources et de la production. In Journées de la section électrotechnique du club EEA 1999 (p. 22p).

[7] N.A. Hidayatullah "Impacts of Distributed Generation on Smart Grid" Master of Engineering (Electrical Engineering), Victoria University February 2011

[15]: [http://ademe.typepad.fr/files/guide\\_ademe\\_energie\\_eolienne-1.pdf](http://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne-1.pdf)

[25] M. GARCÍA, M. PAZ COMECH. « Voltage dip generator for wind energy systems up to 5 MW ». Applied Energy, Volume 86, Issue 4, pp 565-574, Elsevier 2009.

[26] F. IOV, A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. BLAABJERG. « Wind turbine block set in matlab/Simulink, general overview and description of the models ». Institute of Energy Technology, Aalborg University. Denmark, March 2004.

[27] BEN AMAR. ASMA, « ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA ». Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université El-Oued, soutenue le 24.

[28] H. Tamrabet «robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une MAS » mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna soutenu le 20/05/2006 /04/2016.

[29] : G. ALLOUM, "contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation", these doctorat, institut national polytechnique de toulouse. 13 mars 2007.

[30] : F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El- oued. 2013.

[16] Y. BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014

- [18] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade",  
Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [19] S. ARDJOUN, « Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [21 ] MIMOUNI Walid «Commande par mode glissant d'une éolienne à base de GADA»  
Centre Universitaire Salhi Ahmed – NAAMA 2020 / 2021
- [58] R. Datta, V.T. Ranganathan, « Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors »; In: IEEE Trans. Power Electron., Vol.16, No.3, May 2001, pp.390-399.
- [20] A. CHAIBA, «Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle »mémoire de magister, Université de Batna, 2010
- [17] F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [33] F. IOV, A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. BLAABJERG. « Wind turbine block set in matlab/Simulink, general overview and description of the models ».Institute of Energy Technology, Aalborg University. Danemark, March 2004.
- [34] YDJERIRI, « Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien»  
Thèse de Magister en Électrotechnique, UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BELABBÈS, 2009.

- [37] F. Akel, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire De Magister En, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2009.
- [41] D . redha. A Farouq<< Commande par mode glissant et flou d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) « Application à l'énergie éolienne>> Mémoire Master universite mohamed boudiaf - m'sila,2017.
- [42] B. AKIN « State Estimation Techniques For Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motors »; In Partial Fullfi lment of the Requirements for the Degree of Master of Science, the Middle East Technical University, August, 2003.
- [43] AM.SIDDO, I.S.NOUHOU, « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, EI-Harrach, 2007.
- [44] A.L.Nemmour, "Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002 .
- [51] YAICHI I, SEMMAH A, and WIRA P., « Control of doubly fed induction generator with maximum power point tracking for variable speed wind energy conversion systems », Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 64, No.1, p. 87-96, 2020.

[50] GHOUIZILI A, ACHOUR D, and BENBOUHENNI H, « Etude comparative entre la commande DPC, DPC-HYN et DPC-RNA de la GSAP », Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No.2, p. 735-752, 2018.

[52] Yaichi Ibrahim, Abdelhafid Semmah, and P. Wira, « Direct power control of a wind turbine based on doubly fed induction generator », European Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, No.5, p. 457-464, October 2019.

[46] : A. DENDOUGA , "Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG) ", mémoire de magister , Université de Batna. 2010 .

[56] R. Datta, and V.T. Ranganathan, « Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors », In: IEEE Trans. Power Electron., Vol.16, No.3, p.390-399, May 2001.

[47] BEN AMAR ASMA «ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA»Université Hadj Lakhdar – Batna 24/04/2016

[55] Y. DJERIRI, A. MEROUFEL and Z. BOUDJEMA, « Direct power control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit », Journal of Electrical Engineering, Vol.14, No.2, p. 1-8, 2014.

[57] L. Xu, P. Cartwright, « Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation »; IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.2, No.3, p.750-758, September 2006.

[48] HASSAD Mohamed Amine : « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux «électriques » Thèse de Magister, Sétif 2012.[53] Abdelmalek Boulahia « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de

l'Energie Electrique » Magister en Electrotechnique, Université de Constantine,  
Soutenu.28/04/2009.

[54] : L. BENALIA, "Commande en tension des moteurs a induction double alimentes",  
thèse doctorat, Université de Batna. 02 /06/2010.

[35] : F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de  
l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à  
cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.

[59] E. Tremblay, « Contribution à la commande de l'éolienne a MADA en permettant  
l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique »; M. ING, ETS (QC),  
Montréal, Canada, Janvier 2009.

# ANNEXES

## ANNEXES

rs= 4.850;  
rr= 3.8;  
ls= 0.274;  
lr= 0.274;  
M= 0.258;  
p= 2;  
g= 0.0451;  
ws=  $2 \cdot \pi \cdot 50$ ;  
wr= 150;  
wsl= ws-wr;  
seg=  $1 - (M \cdot M / (ls \cdot lr))$ ;  
vs= 220;  
kpp= 0.00001  
kip= kpp\*1  
kpi= 0.00001  
kii= kpp\*1  
fp= 8000  
a=  $220 \cdot \sqrt{2} \cdot 1$   
eps= 0.025