

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

*En vue de l'obtention du diplôme de master  
en électrotechnique*

OPTION : Energie Renouvelable

THÈME :

**Modélisation et commande d'un générateur asynchrone à  
double alimentation pour production éolienne**



Réalisé par :

-Kheniche Achour  
-Boutaghane Fatsah

Encadré par :

M<sup>r</sup>: -Z. BOUDRIES  
- S.TAMALOUZT

*Promotion 2014-2015*

# **Remerciements**

*Nos remerciements vont, tout d'abord et, naturellement, au Dieu Tout puissant qui, tout au Long de notre cursus universitaire, nous a dotés, d'une bonne santé physique et morale, pour nous permettre d'arriver à « Bon Port ».*

*Nous ne remercierons jamais assez notre promoteur Mr Z. BOUDRIES qui, par son aide, son orientation, et il nous a donné toutes les chances de réussite. Ainsi nous remercierons Mr S. TAMALOUZT, pour son aide précieux.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager, en me prodiguant de précieux conseils, sensible à leur amour et leur gentillesse ; c'est avec émotion que je leur exprime toute mon affection, mon admiration et mon profond respect.*

*A Toute la famille kheniche.*

*A Mes très chers frères, Nasro et Lamine.*

*A mes chères sœurs, Amel et Wacila.*

*A tous mes amis(es), plus particulièrement, à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Et à tous la promotion d'énergie Renouvelable.*

**KHENICHE ACHOUR**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Un remerciement particulier à mes très chers parents, à mes chers frères et sœurs.*

*A toute ma famille,*

*A Tous ceux qui me sont chers.*

*A tous mes amis(es), plus particulièrement, à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Et à tous la promotion d'énergie Renouvelable.*

*BOUTAGHANE FATSAH*

Sommaire

Liste des figures

Liste des symboles

## *Sommaire*

**INTRODUCTION GENERALE**.....

### **Chapitre 1 : l'état de l'art de la conversion électromécanique**

<b>1. Introduction</b> .....	1
<b>2. Production éolienne</b> .....	1
<b>3. Définition de l'énergie éolienne</b> .....	1
<b>4. Principe de fonctionnement d'une éolienne</b> .....	2
<b>5. Taille des aérogénérateurs</b> .....	2
<b>6. Conception mécaniques des éoliennes</b> .....	3
6.1. Les différents types d'éoliennes.....	3
6.1.1. Eoliennes à axe vertical.....	3
6.1.2. Eoliennes à axe horizontal .....	3
6.2. Principaux composants d'une éolienne.....	5
6.2.1. Le mât .....	5
6.2.2. La nacelle.....	5
6.2.3. Le rotor .....	5
6.2.3.1. Les rotors à vitesse fixe .....	6
6.2.3.2. Les rotors à vitesse variable .....	6
6.3. Sécurité contre le grand vent.....	6
<b>7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</b> .....	6
7.1. Avantages.....	6
7.2. Inconvénients.....	7
<b>8. Les conversions électromécaniques</b> .....	7
8.1. Systèmes utilisant la machine synchrone .....	7

8.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	8
8.2.1. Machine asynchrone à cage d'écurueil.....	8
8.2.2. Machine asynchrone à double stator .....	9
8.2.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	10
8.2.3.1. Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens.....	10
a) Machine asynchrone à double alimentation « type brushless ».....	10
b) Machine Asynchrone à Double Alimentation Type « Rotor Bobiné ».....	11
b.1) MADA à énergie rotorique dissipée.....	11
b.2) Structure de kramer.....	12
b.3) Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	13
b.4) Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	13
8.2.3.2. Mode de fonctionnement de la MADA .....	14
a) Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	14
b) Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	15
c) Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	15
d) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	15
8.2.3.3. Intérêt de la MADA.....	16
<b>9. Conclusion .....</b>	<b>16</b>

## **Chapitre 2 : Modélisation du Système (Turbine éolienne + MADA)**

<b>1. Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>2. Modélisation de la turbine éolienne.....</b>	<b>17</b>
2.1. Modélisation de la turbine .....	17
2.2. Modèle du multiplicateur.....	19
2.3. Equation dynamique de l'arbre.....	20
<b>3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....</b>	<b>20</b>
3.1. Hypothèses simplificatrices.....	20
3.2. Modèle et identification des paramètres de la MADA.....	21

a) Equations électriques.....	22
b) Equations magnétiques .....	22
c) L'équation mécanique.....	23
3.3. Changement de repère.....	23
3.4. La transformation de Park.....	23
3.5. Application de la transformation de Park à la MADA .....	24
<b>4. Modélisation de l'onduleur de tensions MLI .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>28</b>

### **Chapitre 3 : Elaboration de la Stratégie de Commande + Simulation**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Commande indépendant des puissances actives et réactives.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1. Orientation du flux statorique .....</b>	<b>29</b>
2.1.1. Relations entre puissance statorique et courants rotoriques.....	30
2.1.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	31
<b>2.2. Commande directe .....</b>	<b>32</b>
2.2.1. Dimensionnement du Régulateur PI .....	33
<b>2.3. Commande indirecte.....</b>	<b>35</b>
2.3.1. Commande sans boucles des puissances.....	35
2.3.2. Commande avec boucles des puissances .....	36
<b>3. Résultats de simulation .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1. Commande Directe.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Commande indirecte.....</b>	<b>38</b>
3.2.1. Commande indirecte sans boucles des puissances .....	38

3.2.2. Commande indirecte avec boucles des puissances .....	41
<b>4. Robustesse de la régulation .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. Résultats de la simulation .....</b>	<b>42</b>
4.1.1. Variation de $R_s$ de 50% .....	42
4.1.2. Variation de $L_s$ de 50% .....	43
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>44</b>
<b><i>CONCLUSION GENERAL</i>.....</b>	

## **Table des Figures**

<b>Figure 1.1</b> : conversion de l'énergie cinétique du vent.....	1
<b>Figure 1.2</b> : taille des hélices en m et puissance en KW.....	2
<b>Figure 1.3</b> : éolienne à axe vertical.....	3
<b>Figure 1.4.1</b> : axe amant.....	4
<b>Figure 1.4.2</b> : axe aval.....	4
<b>Figure 1.4.3</b> : éolienne à axe horizontal.....	4
<b>Figure (1.5)</b> : constitution d'une éolienne.....	5
<b>Figure 1.6</b> : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur- onduleur MLI.....	6
<b>Figure 1.7</b> : connexion direct d'une machine asynchrone sur le réseau.....	7
<b>Figure 1.8</b> : Machine asynchrone à double stator.....	8
<b>Figure 1.9</b> : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	9
<b>Figure 1.10</b> : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.....	11
<b>Figure 1.11</b> : MADA à énergie rotorique dissipée.....	11
<b>Figure 1.12</b> : Effet de la variation de R rotorique sur le couple électromagnétique.....	12
<b>Figure 1.13</b> : MADA à structure de Kramer.....	12
<b>Figure 1.14</b> : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	13
<b>Figure 1.15</b> : Structure de scherbius avec cycloconvertisseur.....	13
<b>Figure 1.16</b> : Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.....	14
<b>Figure 1.17</b> : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	14
<b>Figure 1.18</b> : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	15
<b>Figure 1.19</b> : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	15
<b>Figure 1.20</b> : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	16
<b>Figure 2.1</b> : schéma de la turbine éolienne.....	17

<b>Figure 2.2 :</b> Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de $\lambda$ pour différents $\beta$ .....	18
<b>Figure 2.3 :</b> Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	19
<b>Figure 2.4 :</b> schéma bloc de modèle du la turbine éolienne. ....	20
<b>Figure 2.5 :</b> Représentation simplifié de la MADA.....	21
<b>Figure 2.6 :</b> Passage du triphasé au biphasé.....	24
<b>Figure 2.7:</b> Représentation schématique de l'onduleur.....	26
<b>Figure 3.1 :</b> Orientation du flux statorique.....	29
<b>Figure 3.2 :</b> schéma bloc de la MADA.....	32
<b>Figure 3.3 :</b> Schéma bloc de la commande directe .....	33
<b>Figure 3.4 :</b> Système régulé par PI .....	34
<b>Figure 3.5 :</b> Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance .....	34
<b>Figure 3.6 :</b> Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances.....	36
<b>Figure 3.7 :</b> Puissance active statorique de la commande directe.....	37
<b>Figure 3.8 :</b> Puissance réactive statorique de la commande directe.....	37
<b>Figure 3.9 :</b> Courants statoriques de la commande directe.....	37
<b>Figure 3.10 :</b> Courants statoriques de la commande directe avec Zoom.....	38
<b>Figure 3.11 :</b> Courants rotoriques de la commande directe.....	38
<b>Figure 3.12 :</b> Courants rotoriques de la commande directe avec Zoom.....	38
<b>Figure 3.13 :</b> Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles.....	38
<b>Figure 3.14 :</b> Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles.....	39
<b>Figure 3.15 :</b> Courants statoriques de la commande indirecte sans boucles.....	39
<b>Figure 3.16 :</b> Courants statoriques de la commande indirecte sans boucle avec zoom.....	39
<b>Figure 3.17 :</b> Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles.....	40
<b>Figure 3.18 :</b> Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles avec zoom.....	40

<b>Figure 3.19</b> : Puissance active statorique de la commande indirecte avec boucles.....	41
<b>Figure 3.20</b> : Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles.....	42
<b>Figure 3.21</b> : Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles.....	42
<b>Figure 3.22</b> : Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles avec zoom.....	42
<b>Figure 3.23</b> : Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles.....	43
<b>Figure 3.24</b> : Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles avec zoom.....	43

## Liste Des Symboles

$P_v$	Puissance du vent
$\rho$	La densité volumique de l'air ( $k_g/m^3$ )
$S$	La surface balayée par la turbine ( $m^2$ )
$V_v$	La vitesse moyenne de vent ( $m/s$ )
$P_t$	Puissance de la turbine.
$C_p$	Le coefficient de puissance de l'éolienne
$\lambda$	Rapport de vitesse en bout des pâles
$\beta$	L'angle de calage
$\Omega_t$	vitesse de rotation de la turbine (rad/s)
$R$	rayon de la turbine ( $m$ )
$C_t$	Le couple de la turbine éolienne
$\Omega_{méc}$	La vitesse mécanique de la génératrice
$G$	Le gain du multiplicateur
$C_{méc}$	Le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine
$J_t$	Inertie de la turbine éolienne ( $k_g.m^2$ )
$J_g$	Inertie du rotor de la génératrice
$J$	L'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ( $k_g.m^2$ ).
$f$	Coefficient de frottement dynamique ( $k_g.m^2.s^{-1}$ )
$C_{em}$	Couple électromagnétique (N.m)
$C_r$	Couple résistante.
$[V_s], [V_r]$	Vecteur tension statorique et rotorique.
$[i_s], [i_r]$	Vecteur courant statorique et rotorique.
$[\varphi_s], [\varphi_r]$	Vecteur flux statorique et rotorique.
$R_S$	Résistance de chaque enroulement du stator.

$R_r$	Résistance de chaque enroulement du rotor.
$M_{sr}, M_{rs}$	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.
$[L_{ss}], [L_{rr}]$	Matrices d'inductances statorique et rotorique.
$l_s, l_r$	Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine.
$M_s, M_r$	Inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement
$M_{max}$	La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor.
$p$	Le nombre de paires de pôles de la MADA.
$[p(\theta)]$	La matrice de Park
$[p(\theta)]^{-1}$	La matrice inverse de Park
$\theta$	Angle d'observation de la matrice de Park
$\theta_s, \theta_r$	Angle du stator et du rotor.
$V_{ds}, V_{qs}$	Tensions statorique dans le repère (d q).
$V_{dr}, V_{qr}$	Tensions rotorique dans le repère (d q).
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique dans le repère (d q).
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique dans le repère (d q).
$\omega$	Pulsation de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ )
$\omega_s, \omega_r$	Pulsation électrique des grandeurs statorique et rotorique respectivement.
$M$	Inductance magnétisante de la machine.
$i_{sd}, i_{sq}$	Courants statorique dans le repère (d q).
$i_{dr}, i_{qr}$	Courants rotoriques dans le repère (d q).
$P_s$	Puissance active statorique.
$Q_s$	Puissance réactive statorique.
$U_{dc}$	Tension redressée.
$K_p, K_i$	Coefficients de proportionnalité et d'intégration.

### **Abréviation**

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsions.
PI	Action Proportionnelle et Intégrale.

***Introduction  
Générale***

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies. **[CAM03], [TEL 12].**

En raison du problème de manque d'énergies, et de façon limiter l'emploi des énergies fossile, les centrales à énergies renouvelables connaissant une croissance de plus en plus forte, conséquence directe de l'application des mesures de lutte contre le réchauffement climatique. Parmi les unités de production d'énergie renouvelable, on trouve : l'éolienne, la pile à combustible, les panneaux photovoltaïques, la biomasse et la turbine hydraulique.

L'énergie éolienne avec une croissance exponentielle depuis les années 2000 se présente aujourd'hui comme la première source d'énergie renouvelable après l'hydraulique. La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Ainsi plusieurs commencèrent à investir de l'argent pour améliorer notamment la technologie des aérogénérateurs. **[MEK 04], [SOW 12]**

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, elles fonctionnent à vitesse fixe et sont directement reliées au réseau (pas d'interface électronique). Les systèmes les plus récents se dirigent vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion de dispositifs électroniques entre la génératrice et le réseau. **[MEK 04]**

Dans le premier chapitre, on va donner un aperçu sur les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique, on va aussi présentée les deux grandes familles des machines utilisées dans les systèmes de conversion électromécanique, et on finira par la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

Dans le seconde chapitre, on va s'intéressera à la modélisation du système turbine éolienne ainsi que la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans le dernier chapitre, on va élaborer une stratégie de commande, en basant sur le contrôle indépendant des puissances actives et réactives, et on finira ce chapitre avec une simulation pour les différentes méthodes de commande étudiée.

Finalement, nous concluons ce travail par une conclusion générale en proposant quelques perspectives pour l'amélioration de ce travail.

# *Chapitre 1*

*Etat de l'art de la  
conversion  
électromécanique*

## 1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

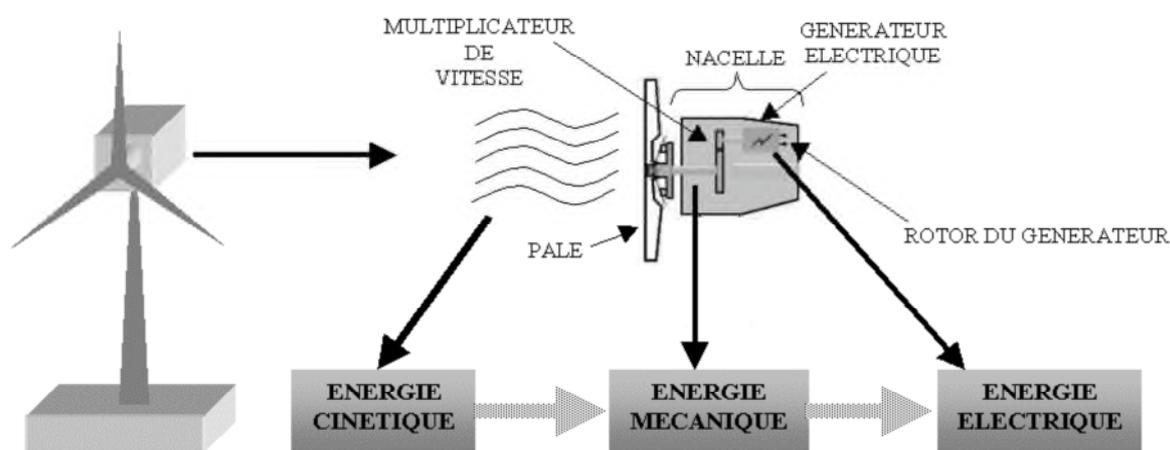
Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Une éolienne doit comporter un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande) et un système qui permet de d'assurer un contrôle mécanique (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

## 2. Production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement des certaines zones de la planète est le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oubliée, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 37ans, un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. [HAM 08]

## 3. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure (1.1)). [BEN 12]



**Figure 1.1 :** conversion de l'énergie cinétique du vent.

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

#### 4. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamique. Le flux d'air crée autour de profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [HAM 08]

#### 5. Taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point les éoliennes de plus en plus puissantes donc plus grandes, figure (1.2). Pour utiliser au maximum la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface ou le vent est maximum, pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.[BOY 06]

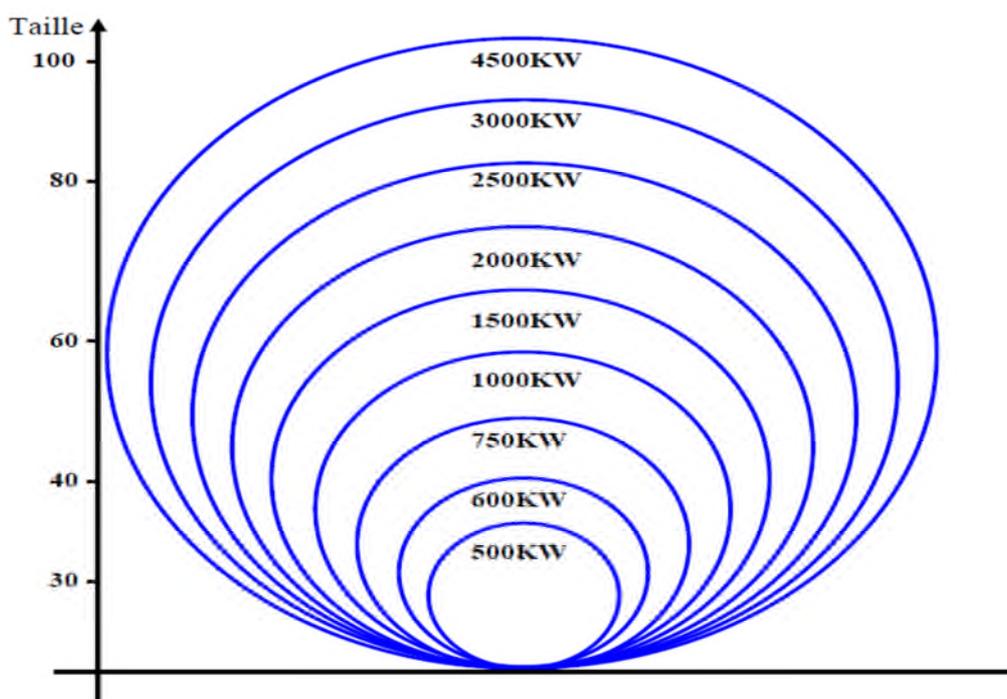


Figure1.2 : taille des hélices en m et puissance en KW

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice plus de 100m de diamètre et 100m de hauteur pour produire une puissance qui va jusqu'à 4.5 MW.[BOY06]

## 6. Conception mécaniques des éoliennes :

### 6.1. Les différents types d'éoliennes :

#### 6.1.1. Eoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne (figure1.3) a fait l'objet de nombreuses recherches.il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pâles et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd ,subit de fortes contraintes mécanique poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éolienne à axe horizontal. [LEC]



Figure 1.3 : éolienne à axe vertical

#### 6.1.2. Eoliennes à axe horizontal :

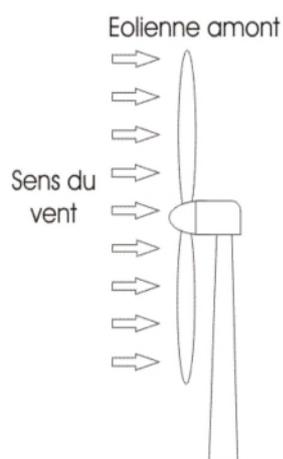
Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elle comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipâles. [HAS 12]

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

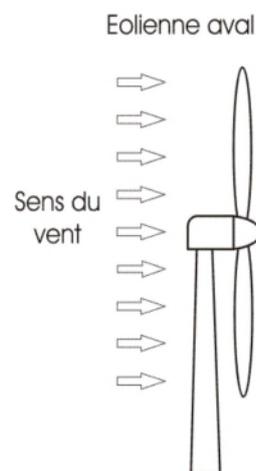
Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

**-Amant** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif (Figure 1.4.1).

**-Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable (Figure 1.4.2).



**Figure 1.4.1** : axe amant.



**Figure 1.4.2** : axe aval.



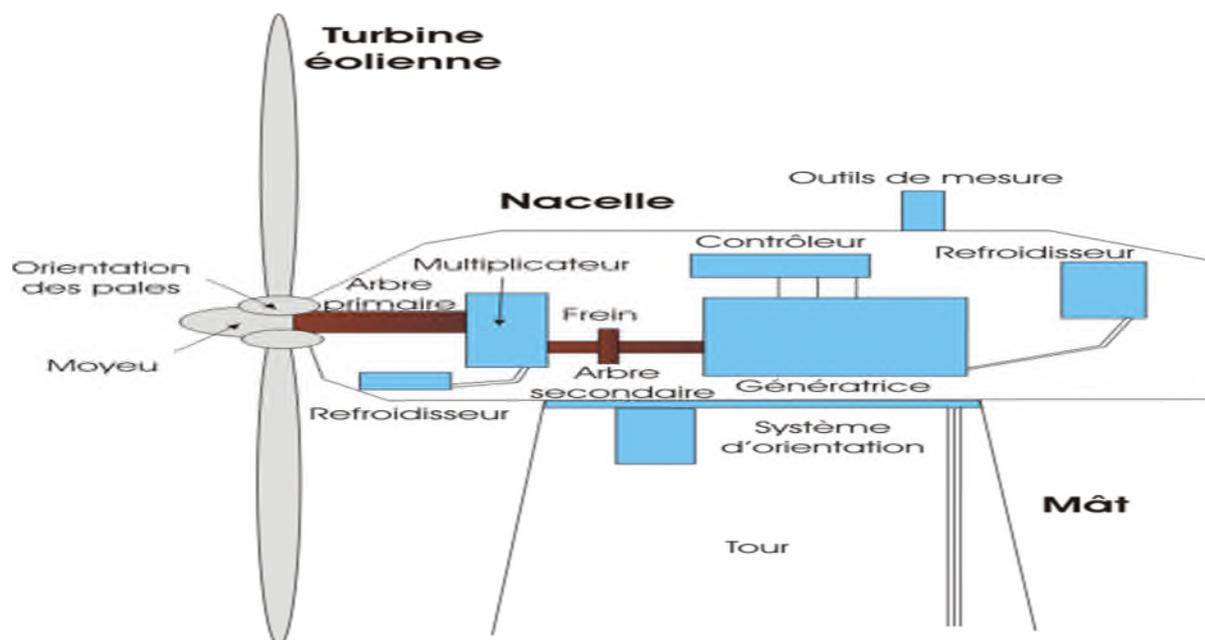
**Figure 1.4.3** : éolienne à axe horizontal

Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle. [HAS 12]

## 6.2. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure 5)



**Figure (1.5) :** constitution d'une éolienne [COU 14]

### 6.2.1. Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. [POI 03]

### 6.2.2. La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre primaire et secondaire, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pâles (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface effacée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A ce la viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

### 6.2.3. Le rotor :

Le rotor, formé par les pâles assemblées dans leur moyeu.

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

#### 6.2.3.1. Les rotors à vitesse fixe :

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût. [POI 03]

#### 6.2.3.2. Les rotors à vitesse variable :

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pâles est simplifié. Les pâles se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les 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). [POI 03]

### 6.3. Sécurité contre le grand vent :

Pour éviter l'emballlement du rotor par fort vent, les pâles sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique. Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pale et font diminuer sa portance, réduisant ainsi le couple produit.

Toutes les éoliennes possèdent un frein mécanique de sécurité pour ralentir ou maintenir à l'arrêt du rotor. Le plus généralement, ce sont des freins à disques à commande hydraulique, placés sur l'arbre de la génératrice. [BOY 06]

## 7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

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

### 7.1. Avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui sauvegarde l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

## **7.2. Inconvénients :**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

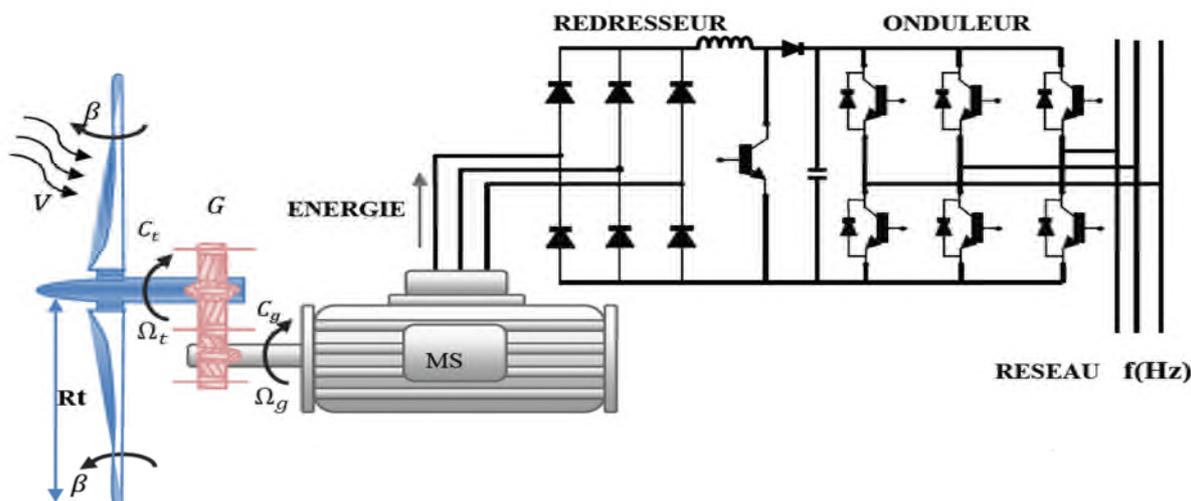
## **8. Les conversions électromécaniques :**

### **8.1. Systèmes utilisant la machine synchrone :**

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotoriques et statoriques, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée.

Dans la plupart des cas, le rotor de l'alternateur est à base aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. Donc il nous faut des composants de puissance plus performants voire spéciaux. En conséquence, les alternateurs sont abandonnés à cause du coût et des problèmes de l'intégration à un système de production d'énergie éolienne.



**Figure 1.6 :** Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur- onduleur MLI

## 8.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

### 8.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil :

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil, équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, l'utilisation de cette machine comme moteur, est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point  $g=0$ )). Le nombre de paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée. [POI 03]

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau. De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau. [POI 03]

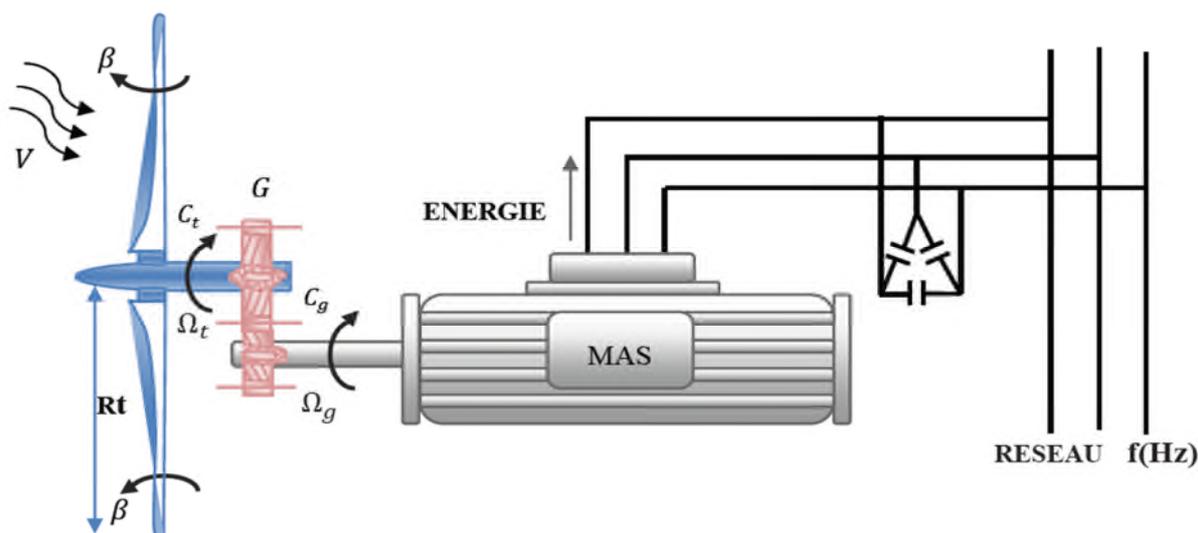


Figure 1.7 : connexion direct d'une machine asynchrone sur le réseau

### 8.2.2. Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure 8).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [ZAD 12]

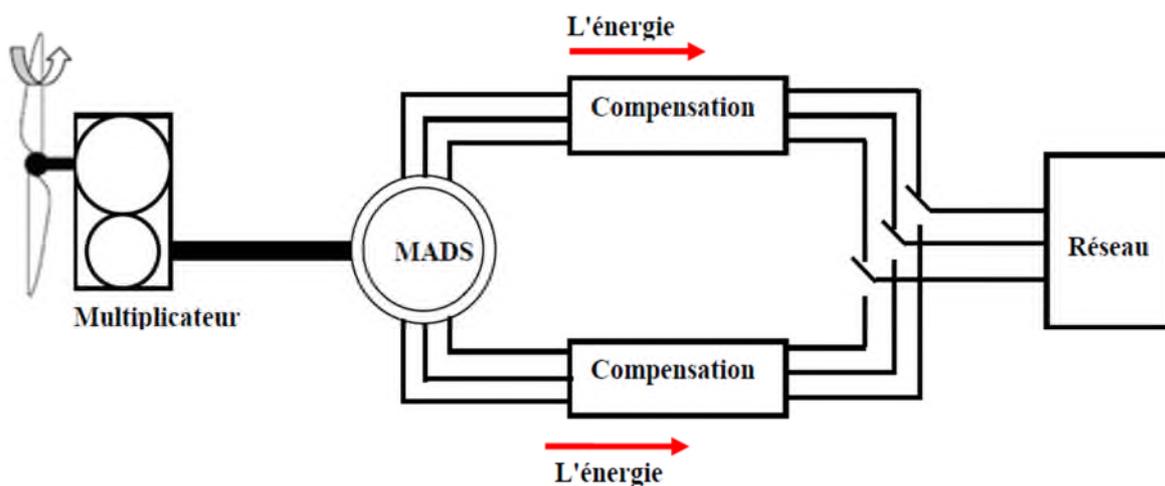


Figure 1.8 : Machine asynchrone à double stator

### 8.2.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.

Contrairement à certaines machines synchrones qui ont des convertisseurs traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hyper synchrone, selon la topologie ces convertisseurs on peut réaliser plusieurs structures de ces machines.

#### 8.2.3.1. Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens :

##### a) Machine asynchrone à double alimentation « type brushless » :

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure 9).

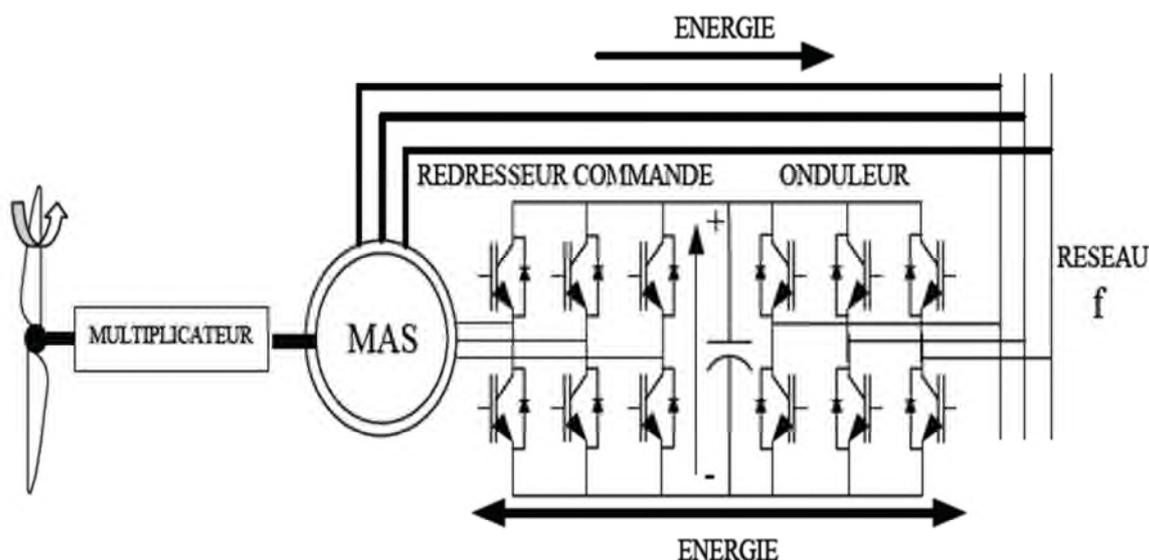


Figure 1.9 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

**b) Machine Asynchrone à Double Alimentation Type « Rotor Bobiné » :**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau (Figure 10) et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. [POI 03]

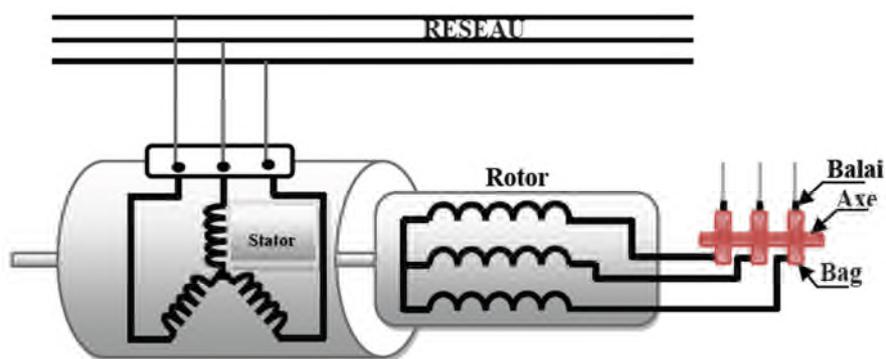


Figure 1.10 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

**b.1) MADA à énergie rotorique dissipée :**

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [ROU 12]

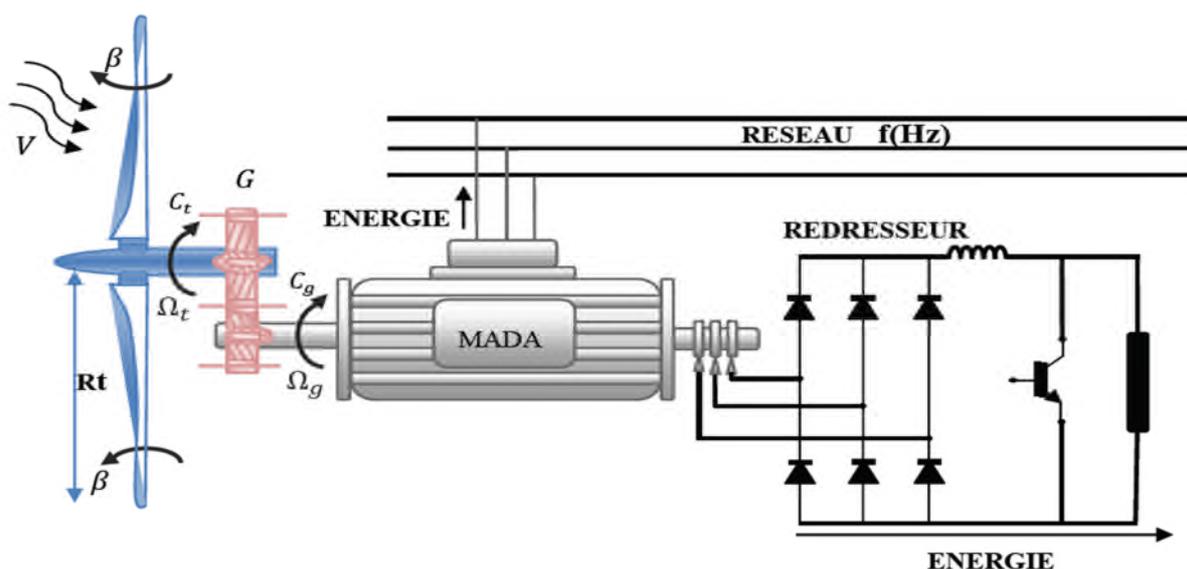


Figure 1.11 : MADA à énergie rotorique dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système.

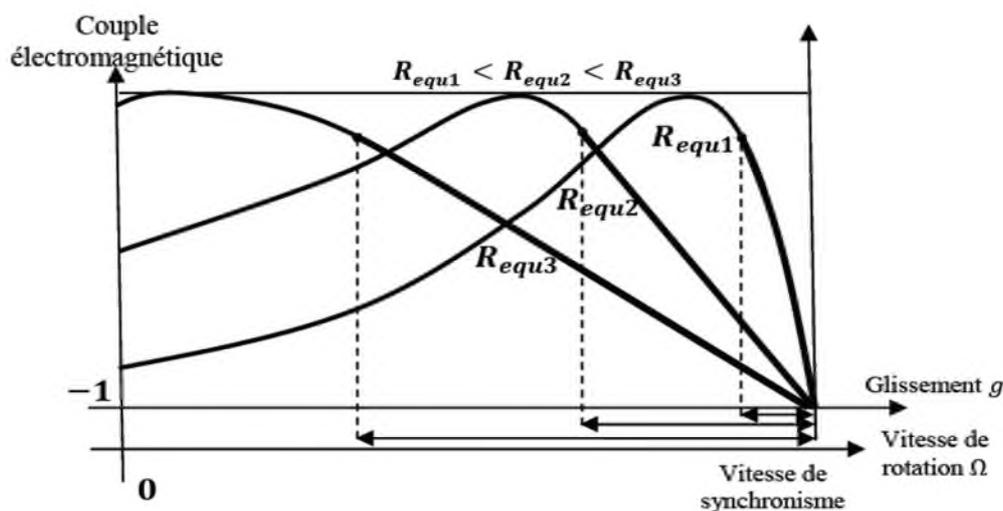


Figure 1.12 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.

**b.2) Structure de kramer :**

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. L'utilisation de thyristor pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau). Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).

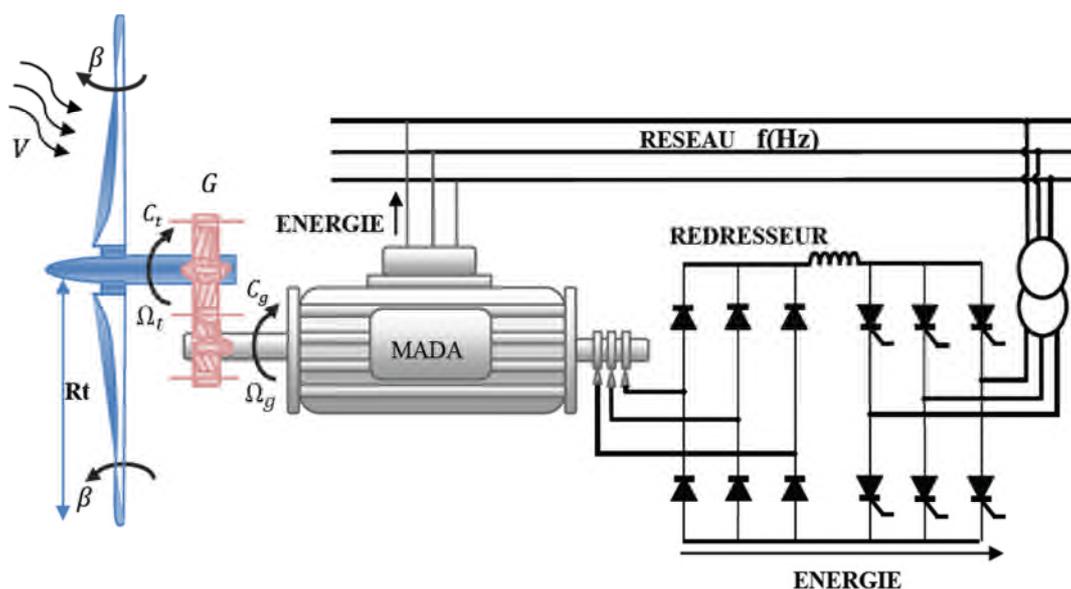
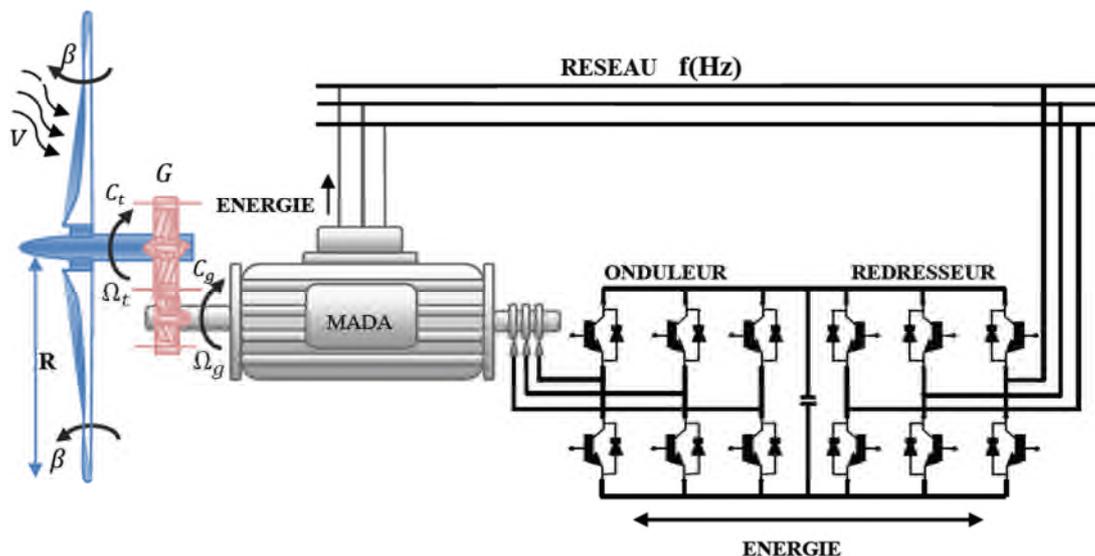


Figure 1.13 : MADA à structure de Kramer.

**b.3) Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :**

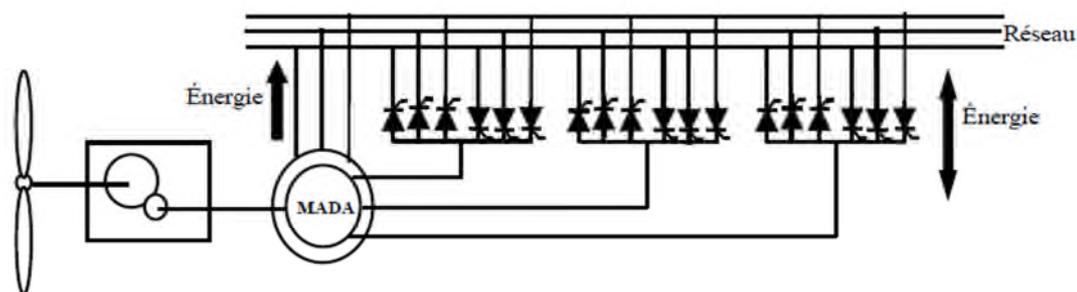
Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [POI 03, SEG 06].



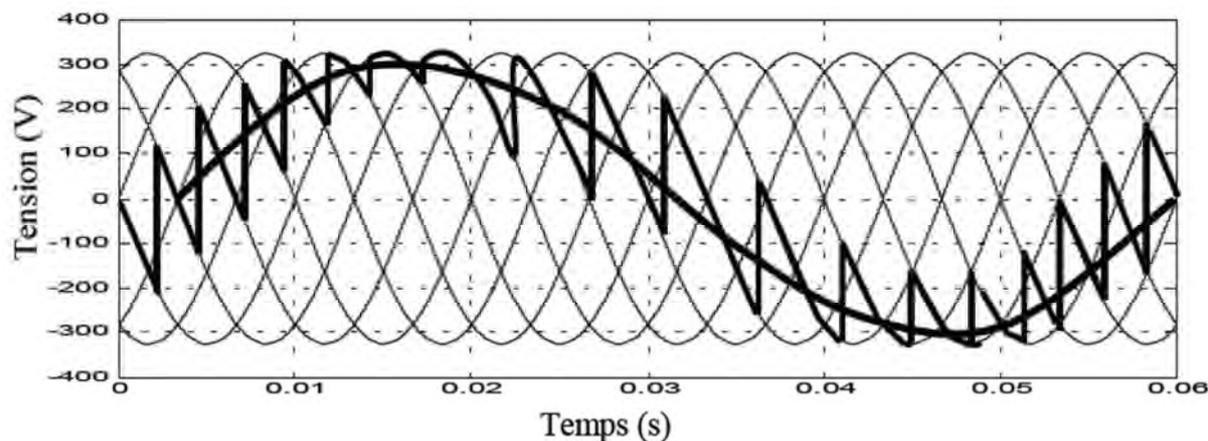
**Figure 1.14 :** Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

**b.4) Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur :**

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur (figure 15), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI. [DEN 10]



**Figure 1.15 :** Structure de scherbius avec cycloconvertisseur



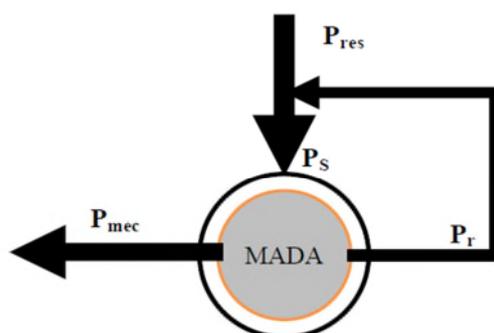
**Figure 1.16** : Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.

### 8.2.3.2. Mode de fonctionnement de la MADA :

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut l'être en générateur qu'au dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

#### a) Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

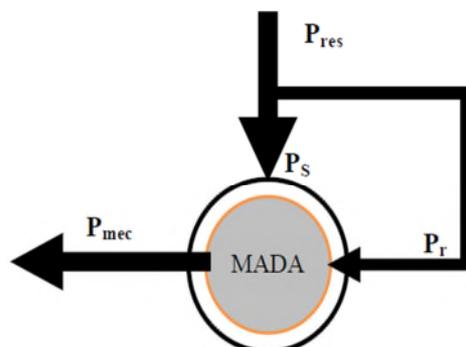
Dans ce mode de fonctionnement, le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau (Figure 1.17). Cette puissance est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage [BOY 06]. Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques fonctionnement en mode moteur hypo synchrone est dans le même sens que le champ statorique [SEG 06, HAM 08].



**Figure 1.17**: Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone. [MAL 14]

**b) Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

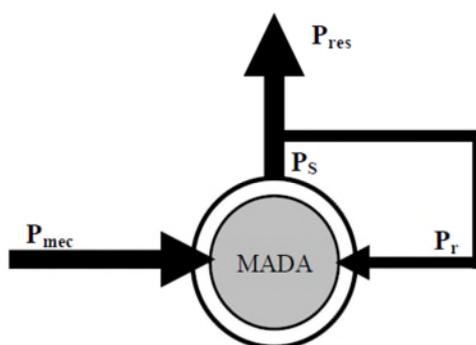
La figure 1.18, montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement. [BEN 12]



**Figure 1.18 :** Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone. [MAL 14]

**c) Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :**

La figure 1.19, montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement. [BEN 12]

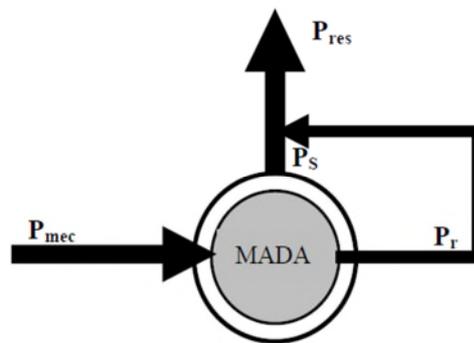


**Figure 1.19 :** Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone. [MAL 14]

**d) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :**

La figure 1.20, montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à

cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor. [BEN 12]



**Figure 1.20:** Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone. [MAL 14]

### 8.2.3.3. Intérêt de la MADA :

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. [HAM 08]

## 9. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique, dans le but d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement de ces dernières. Dans la deuxième partie on a cité les deux grandes familles des machines utilisées dans les systèmes de conversion électromécanique (machines synchrones et machines asynchrones).

Par ailleurs, dans la dernière partie on a illustré les différentes structures de la machine asynchrones à double alimentation, son mode de fonctionnement, ainsi que son intérêt.

# *Chapitre 2*

## *Modélisation du Système (Turbine éolienne + MADA)*

## 1. Introduction :

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne consiste à donner une représentation de l'ensemble de ses éléments, Cette représentation constitue un instrument fondamental pour l'observation et l'analyse de l'évolution des grandeurs électromagnétique de la machine, d'une part et d'autre part pour prévoir les lois nécessaires au fonctionnement souhaité.

Dans la première partie de ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation de la turbine éolienne, qui consiste en une modélisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontale et à vitesse variable.

Le modèle de la MADA est présenté dans la deuxième partie.

## 2. Modélisation de la turbine éolienne :

Le système éolien classique est composé d'une turbine qui transforme l'énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse  $G$  qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et comprenant des pâles entraînées par le vent (figure 2.1).

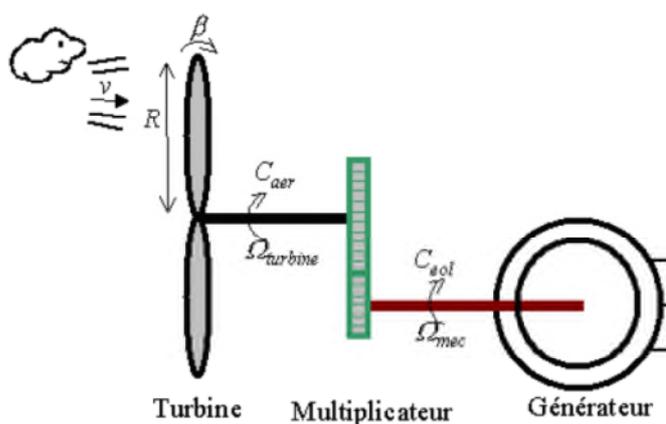


Figure 2.1 : schéma de la turbine éolienne.

### 2.1. Modélisation de la turbine:

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

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2.1)$$

Avec :

$\rho$  : La densité volumique de l'air ( $kg/m^3$ )

$S$  : La surface balayée par la turbine ( $m^2$ )

$V_V$  : La vitesse moyenne de vent ( $m/s$ )

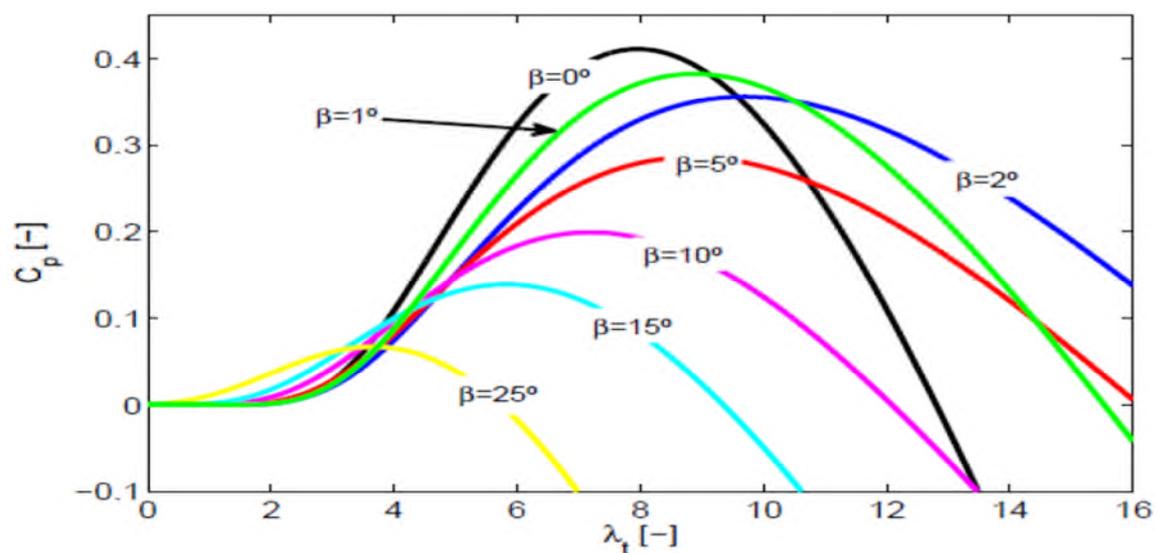
La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'écrit par :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v \quad (2.2)$$

Avec :

$C_p(\lambda, \beta)$  : Le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0.593).

La figure 2.2, donne la variation de coefficient de puissance de l'éolienne ( $C_p$ ) en fonction de rapport de vitesse ( $\lambda$ ) pour l'angle de calage  $\beta$ .



**Figure 2.2** : Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ .

Le rapport de vitesse en bout des pâles est donné par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_V} \quad (2.3)$$

Avec :

$\beta$  : L'angle de calage

$\lambda$  : Rapport de vitesse en bout des pâles

$R$  : rayon de la turbine ( $m$ )

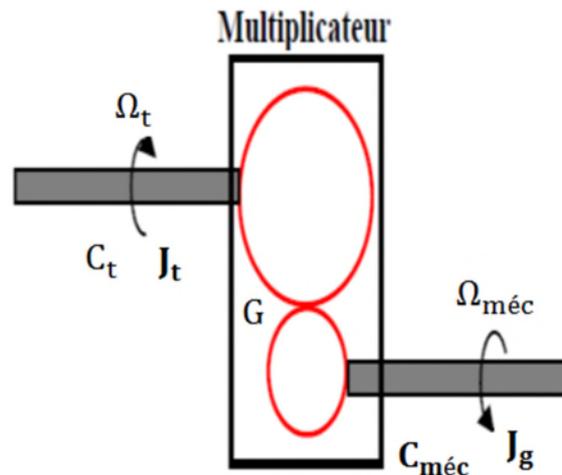
$\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine ( $rad/s$ )

Le couple de la turbine éolienne est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (2.4)$$

## 2.2. Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est l'adapter la vitesse lente de la turbine ( $\Omega_t$ ), à celle de la génératrice ( $\Omega_{méc}$ ).



**Figure 2.3 :** Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_{méc} = G \cdot \Omega_t \quad (2.5)$$

$$G = \frac{C_t}{C_{méc}} \quad (2.6)$$

Avec :

$G$  : le gain du multiplicateur

$C_t$  : le couple de la turbine éolienne.

$C_{méc}$  : le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine.

$\Omega_{méc}$  : la vitesse mécanique de la génératrice.



compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, en vue d'établir un modèle simple. Ainsi nous supposons :

- La machine est de constitution symétrique.
- le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques [ELK 12].

### 3.2. Modèle et identification des paramètres de la MADA :

La figure 2.5 rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre ( $p$ ) de paires de pôles par phase).

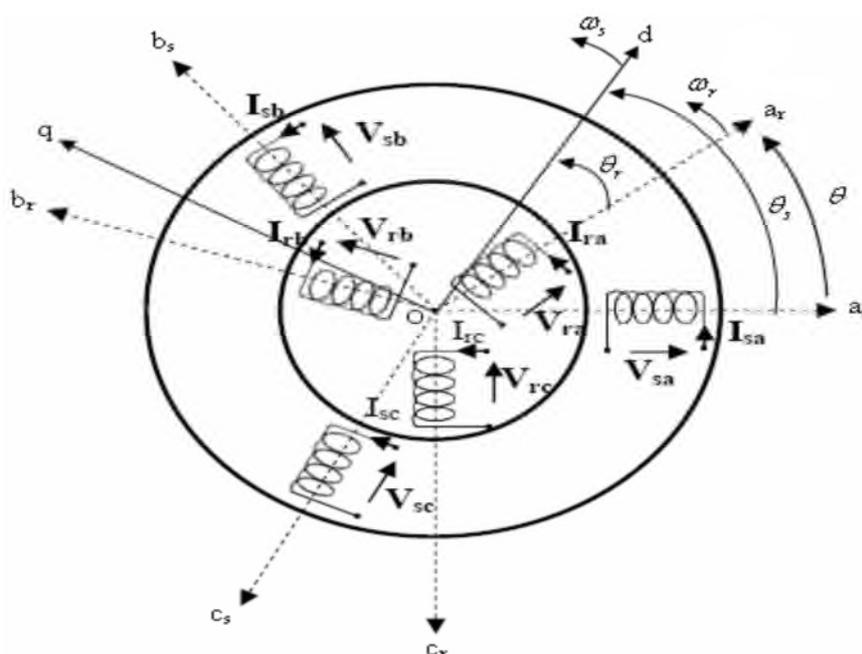


Figure 2.5 : Représentation simplifiée de la MADA

**a) Equations électriques :**

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statorique et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (2.8)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (2.9)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

**b) Equations magnétiques :**

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (2.10)$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (2.11)$$

En remplaçant (2.12) dans (2.8) et (2.13) dans (2.9), on obtient le système d'équations électrique de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine de Laplace.

$$[V_s] = [R_s][i_s] + p ([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \quad (2.12)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + p ([L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s]) \quad (2.13)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s$  : représente l'inductance propre d'une phase statorique.

$l_r$  : représente l'inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : représente l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$M_r$  : représente l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$$[M_{rs}] = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Où  $M_{\max}$  représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque leurs axes magnétiques sont confondus.

### c) L'équation mécanique :

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.15)$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p [i_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [i_r]] \quad (2.16)$$

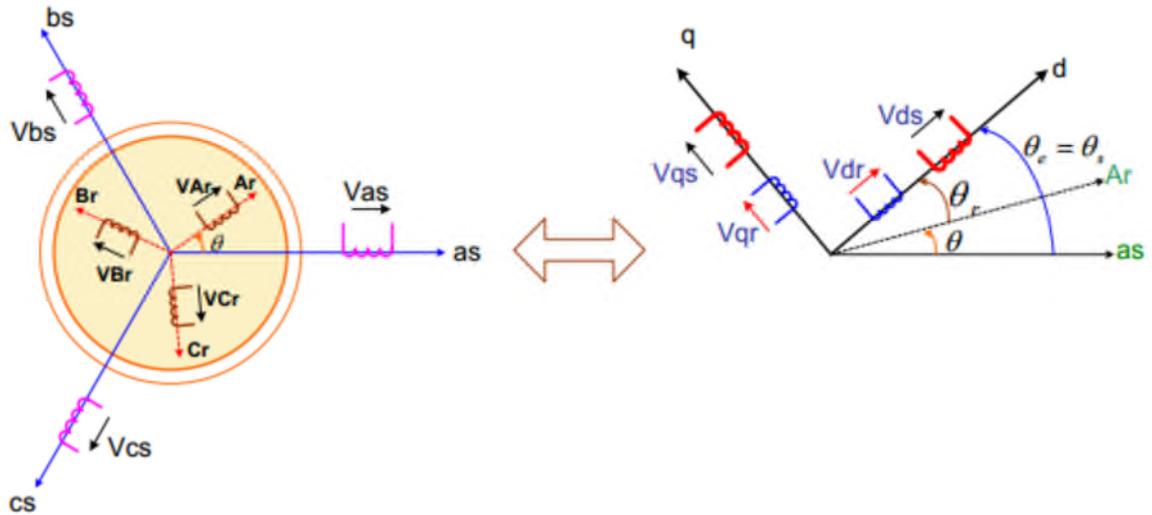
Avec :  $p$  le nombre de paires de pôles de la MADA.

### 3.3. Changement de repère :

Le but du changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

### 3.4. La transformation de Park :

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[p(\theta)]$  permet de ramener les variable du repère triphasé  $(a,b,c)$  sur les axes d'un repère biphasé tournant  $(d,q,o)$ , les grandeurs statoriques et rotorique sont alors exprimées dans un même repère (axe direct  $d$  et axe en quadrature  $q$ ), figure 2.6.



**Figure 2.6 :** Passage du triphasé au biphasé

En faisant coïncider les axes directs et quadratures du stator et du rotor, les calculs seront simplifiés.

La matrice de Park est donnée sous forme suivante :

$$[x_{dq0}] = [p(\theta)][x_{abc}]$$

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice  $[p(\theta)]^{-1}$  :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

### 3.5. Application de la transformation de Park à la MADA :

Pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), on va faire un changement de repère de Park aussi bien au stator qu'au rotor, en remplaçant dans la matrice de Park  $\theta$  par  $(\theta_s = \theta_e)$  pour les équations du stator, et par  $\theta_r$  pour celle du rotor, on obtient :

❖ Pour le stator :

$$[i_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [i_s] \quad ; \quad [i_s] = [p(\theta_s)]^{-1} \cdot [i_{dq0}]_s \quad (2.19)$$

$$[V_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [V_s] \quad ; \quad [V_s] = [p(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{dq0}]_s \quad (2.20)$$

$$[\varphi_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [\varphi_s] \quad ; \quad [\varphi_s] = [p(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{dq0}]_s \quad (2.21)$$

❖ Pour le rotor :

$$[i_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [i_r] \quad ; \quad [i_r] = [p(\theta_r)]^{-1} \cdot [i_{dq0}]_r \quad (2.22)$$

$$[V_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [V_r] \quad ; \quad [V_r] = [p(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{dq0}]_r \quad (2.23)$$

$$[\varphi_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [\varphi_r] \quad ; \quad [\varphi_r] = [p(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{dq0}]_r \quad (2.24)$$

En appliquant cette transformation on obtient :

➤ Les expressions des tensions :

• Pour stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (2.25)$$

• Pour rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.26)$$

Car on a:  $(\omega_r = \omega_s - \omega)$  , avec:  $\omega_s = (d\theta_s/dt)$  ,  $\omega = (d\theta/dt)$

Avec respectivement :

$V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ,  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé ;

$\omega_s$  Et  $\omega_r$  sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

➤ Les expressions des flux totalisées sont :

• pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (2.27)$$

- pour rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.28)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique propre du stator.

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique propre du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_{\max}$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

- L'équation du couple électromagnétique :

Pour le couple électromagnétique, son expression générale est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (2.29)$$

- Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (2.30)$$

#### 4. Modélisation de l'onduleur de tensions MLI :

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure 2.7, on considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu), supposée d'être constituée de deux générateurs de f.e.m égale à  $U_{dc}/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

La machine à été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux).

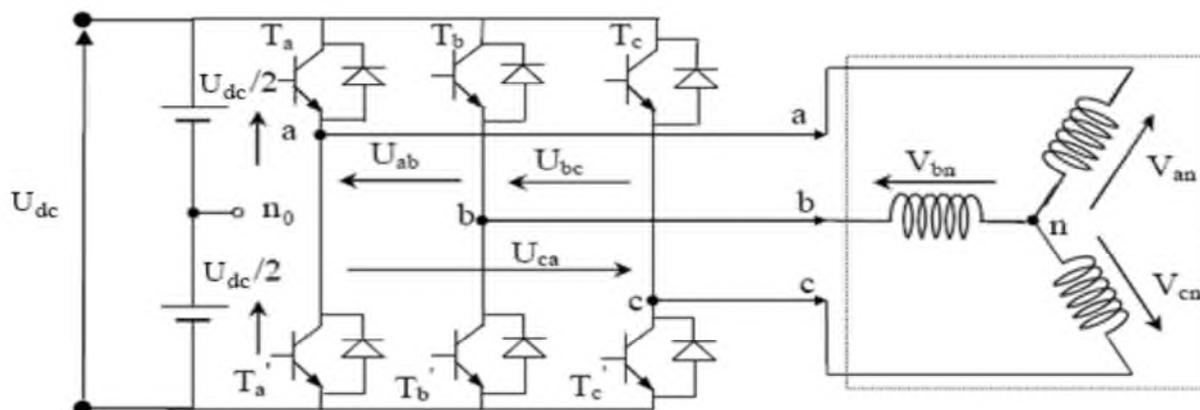


Figure 2.7: Représentation schématique de l'onduleur

On a :

- si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert.
- si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ano} - V_{bno} \\ U_{bc} = V_{bno} - V_{cno} \\ U_{ca} = V_{cno} - V_{ano} \end{cases} \quad (2.31)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (2.32)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{ano} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bno} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cno} \end{cases} \quad (2.33)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{ano} + V_{bno} + V_{cno}] \quad (2.34)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow S_i$  ( $i = a, b, c$ ), on a :

$$V_{ino} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (2.35)$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{ano} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bno} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cno} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (2.36)$$

En remplaçant l'équation (2.34) dans l'équation (2.33), on obtient :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{an_o} - \frac{1}{3}V_{bn_o} - \frac{1}{3}V_{cn_o} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{an_o} + \frac{2}{3}V_{bn_o} - \frac{1}{3}V_{cn_o} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{an_o} - \frac{1}{3}V_{bn_o} + \frac{2}{3}V_{cn_o} \end{aligned} \quad (2.37)$$

En remplaçant l'équation (2.36) dans l'équation (2.37), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

## 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a modélisé les différentes parties d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants facile à exploiter et résoudre. On fini ce chapitre avec la modélisation de l'onduleur (MLI).

# *Chapitre 3*

## *Elaboration de la Stratégie de Commande + Simulation*

## 1. Introduction :

Les génératrices asynchrones sont largement répondues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne. Afin de permettre une production d'électricité optimale pour différentes vitesses de vent et des vitesses de l'éolienne, nous avons choisit la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui présente plusieurs avantages en comparaison avec des autres machines. Elle permet d'avoir une large plage de vitesse variant de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme,

Dans ce chapitre on va élaborer une stratégie de commande basée sur le contrôle indépendant des puissances actives et réactives, cette commande est basée sur l'orientation du flux, utilisé pour fonctionnement en génératrice, Il consiste à orienter le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu. L'orientation du flux statorique sera l'objet de notre commande, afin d'avoir un système plus simplifié pour permettre une réalisation simple pour les différentes méthodes de notre commande. On va finir ce chapitre avec une simulation, afin de faire une comparaison entre les différentes commandes.

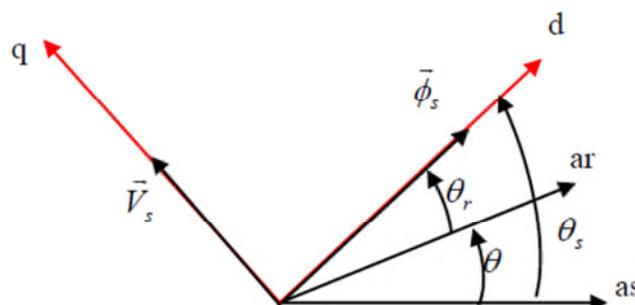
## 2. Commande indépendante des puissances actives et réactives :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives.

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. Ainsi nous utilisons l'orientation du flux statorique.

### 2.1. Orientation du flux statorique :

Le principe consiste à orienter le repère  $(d,q)$  afin que l'axe  $d$  soit aligné sur le flux statorique  $\phi_s$  (figure 3.1).[BOY06]



**Figure 3.1 :** Orientation du flux statorique.

Avec l'orientation du flux statorique,  $\varphi_s = \varphi_{ds}$ ,  $\varphi_{qs} = 0$ . Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.2)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (3.6)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \quad (3.7)$$

### 2.1.1. Relations entre puissance statorique et courants rotoriques :

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (3.8)$$

Les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  sont donc respectivement en fonction des courants statoriques  $I_{qs}$  et  $I_{ds}$ , sur les quels nous n'avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques (3.5), nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (3.9)$$

En remplaçant les courants statoriques (3.9) dans (3.8) on trouve pour les équations des puissance active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (3.10)$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante  $M$  constante, on remarque que l'équation (3.10) fait apparaître que la puissance active  $P_s$  statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $i_{qr}$ . De plus, la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $i_{dr}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  [BOY 06].

### 2.1.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

En remplaçant dans l'équation des flux (3.11) les courants statoriques par l'expression (3.14) on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.11)$$

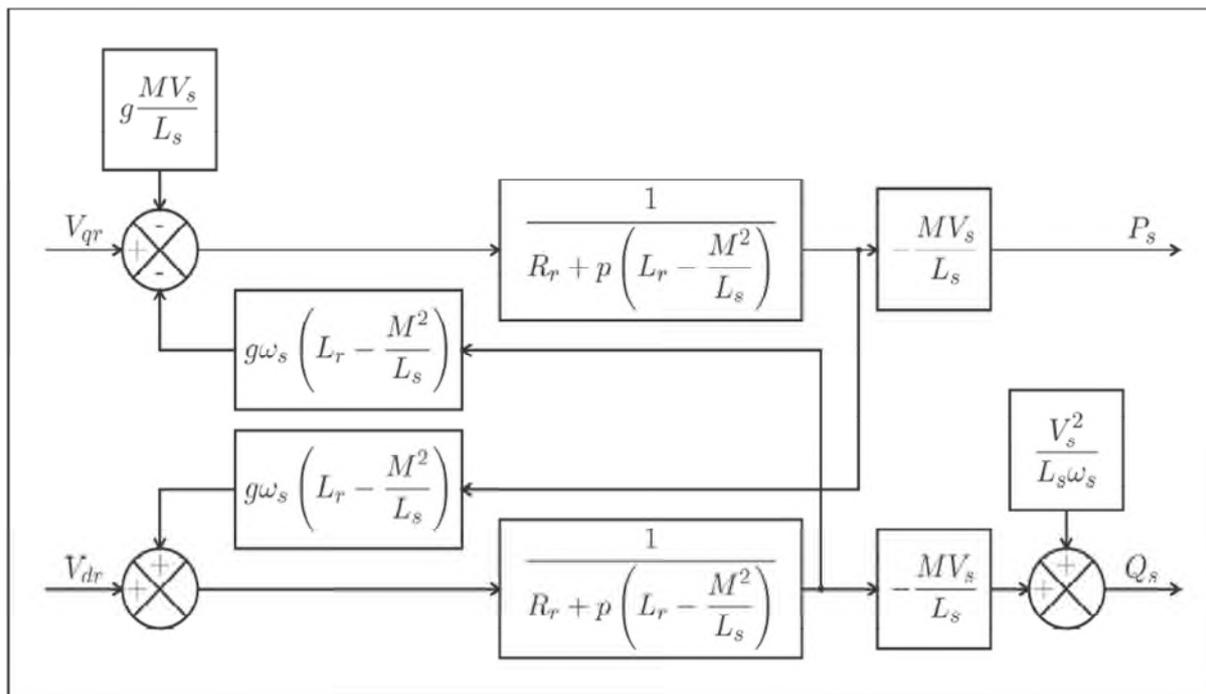
En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (3.4), on trouve :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.12)$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des systèmes d'équations (3.10) et (3.12), nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de présenter le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. Nous présentons le schéma en figure 3.2

qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactive statoriques. [BOY 06]



**Figure 3.2** : schéma bloc de la MADA

L'expression  $g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$  représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

Ainsi il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine, qui vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre.

## 2.2. Commande directe :

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactives, car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. [BOY 06]

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (3.3).

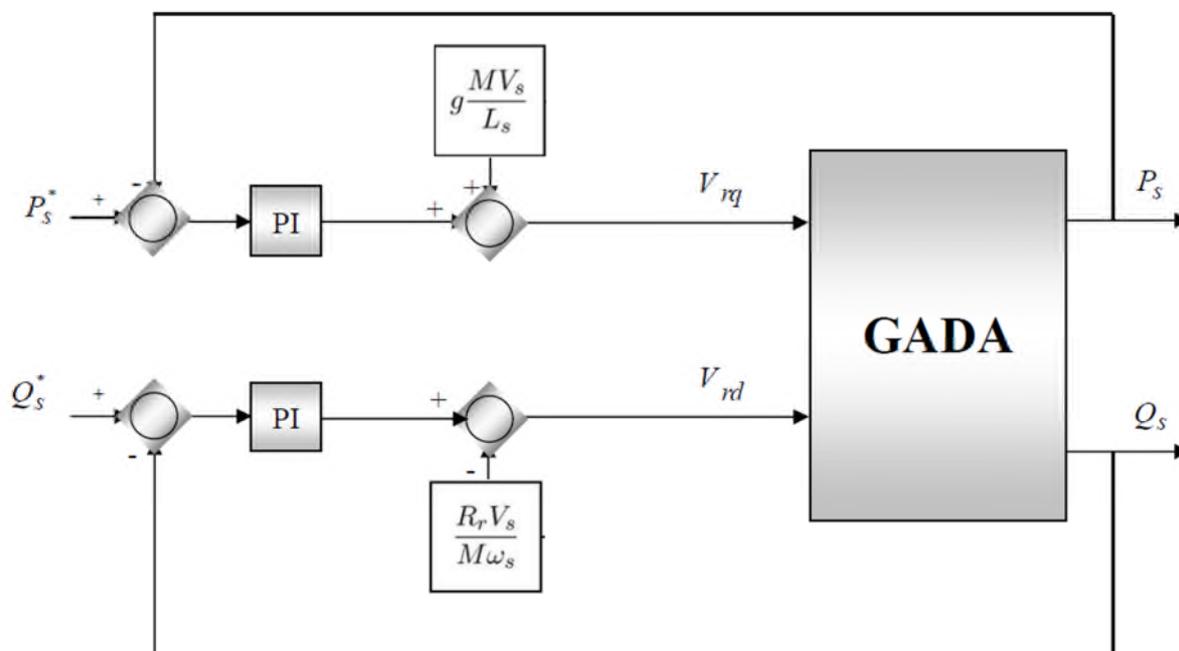


Figure 3.3 : schéma bloc de la commande directe

### 2.2.1. Dimensionnement du Régulateur PI :

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. Cela a retenu notre attention pour une étude du système de génératrice éolien.

La figure 3.4 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{p}$ , correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure 3.3.

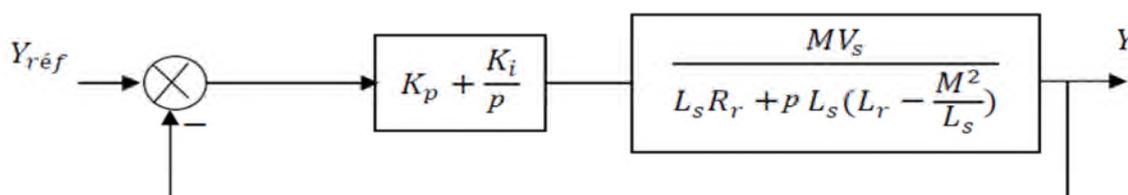


Figure 3.4 : Système régulé par PI

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

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (3.13)$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.14)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (3.15)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (3.16)$$

Avec  $\tau_r$  le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables. [BOY06]

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (3.17)$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

Cette même méthode de synthèse du correcteur à été appliquée pour déterminer les gains des correcteurs pour les types de commandes étudiées dans ce chapitre.

### 2.3. Commande indirecte :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

#### 2.3.1. Commande sans boucles des puissances :

La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe  $d$  et  $q$ .

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} i_{qr\_ref} = -\frac{L_s}{MV_s} \cdot P_{s\_ref} \\ i_{dr\_ref} = -\frac{L_s}{MV_s} \cdot Q_{s\_ref} + \frac{V_s}{M\omega_s} \end{cases}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc figure 3.5.

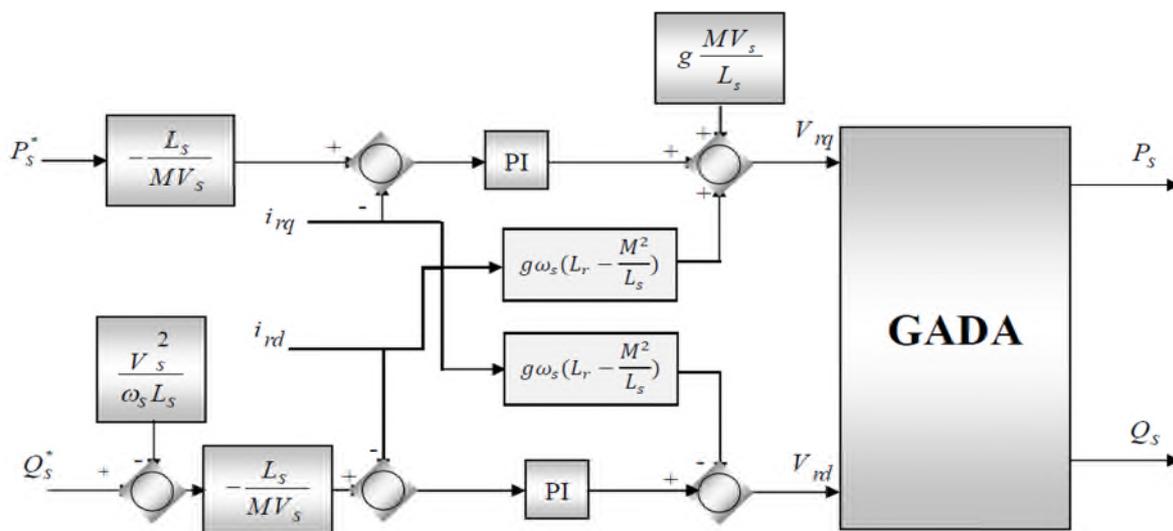


Figure 3.5 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

### 2.3.2. Commande avec boucles des puissances :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure 3.6 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. [BEK 14]

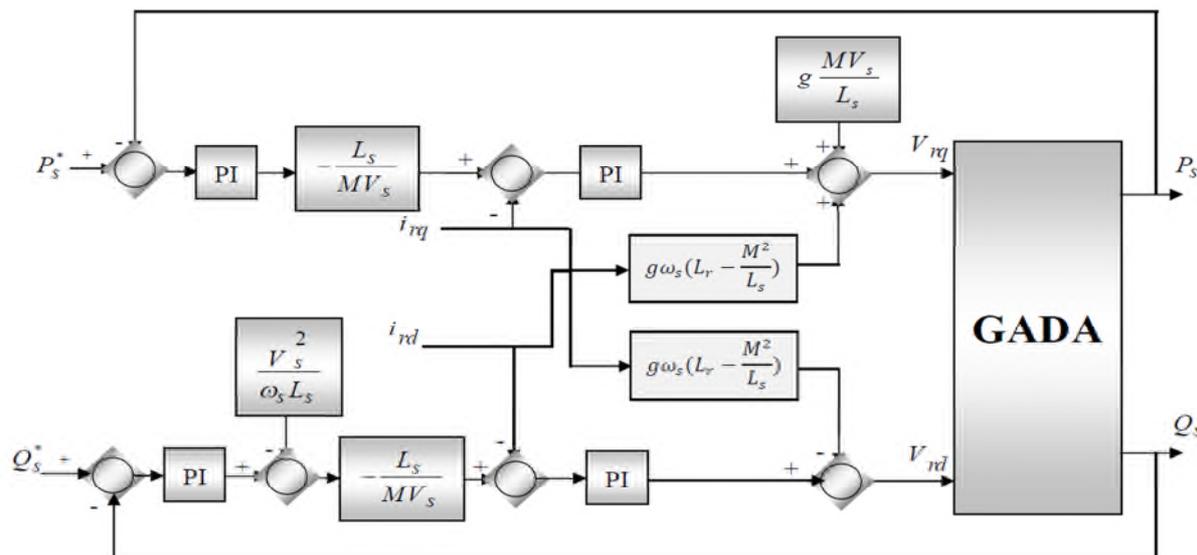


Figure 3.6 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances.

### 3. Résultats de simulation :

Nous avons soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive, statoriques.

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans la simulation sont donnés en annexe.

Les échelons des puissances active et réactive, qui sont appliqués à chaque type de commande de la GADA, sont représentés dans le tableau suivant :

Temps (s)	$P_s^*$ (W)	Temps (s)	$Q_s^*$ (Var)
0 à 0.5	0	0 à 0.5	0
0.5 à 1	-5000	0.5 à 1.25	-1000
1 à 2	-10000	1.25 à 1.75	-4000
2 à 2.5	-5000	1.75 à 2.5	-1000
2.5 à 3	-5000	2.5 à 3	1000

Tableau 3.1 : Echelons des puissances active et réactive.

### 3.1. Commande Directe :

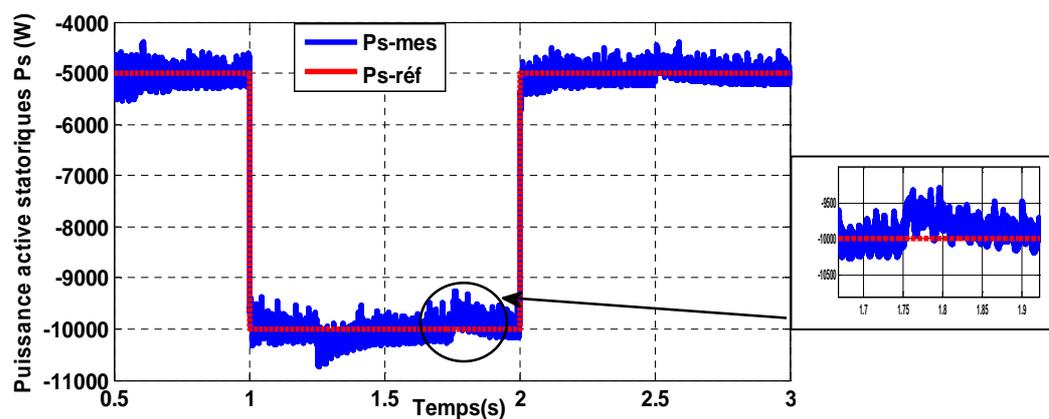


Figure 3.7 : Puissance active statorique de la commande directe.

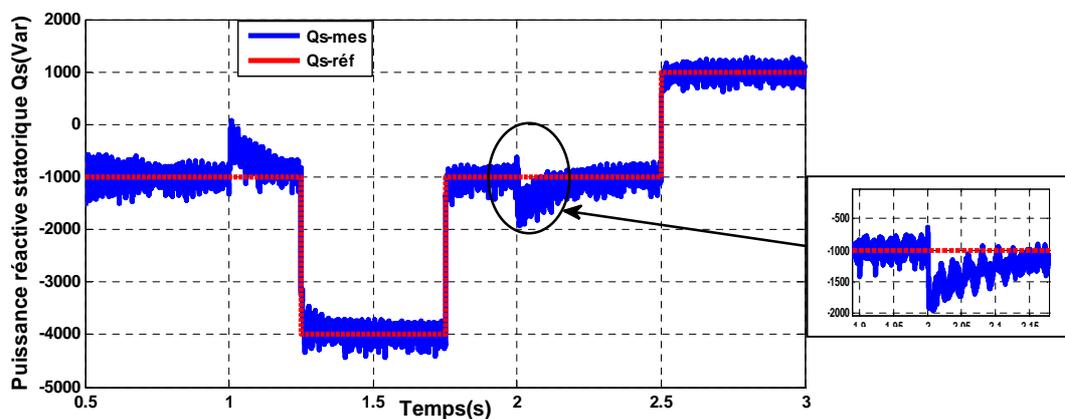


Figure 3.8 : Puissance réactive statorique de la commande directe.

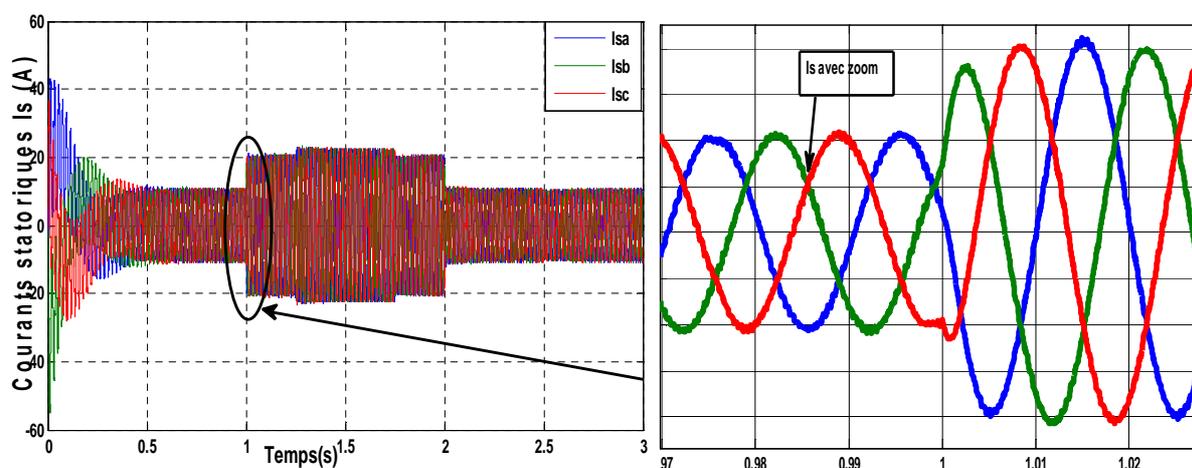


Figure 3.9 : Courants statoriques de la commande directe.

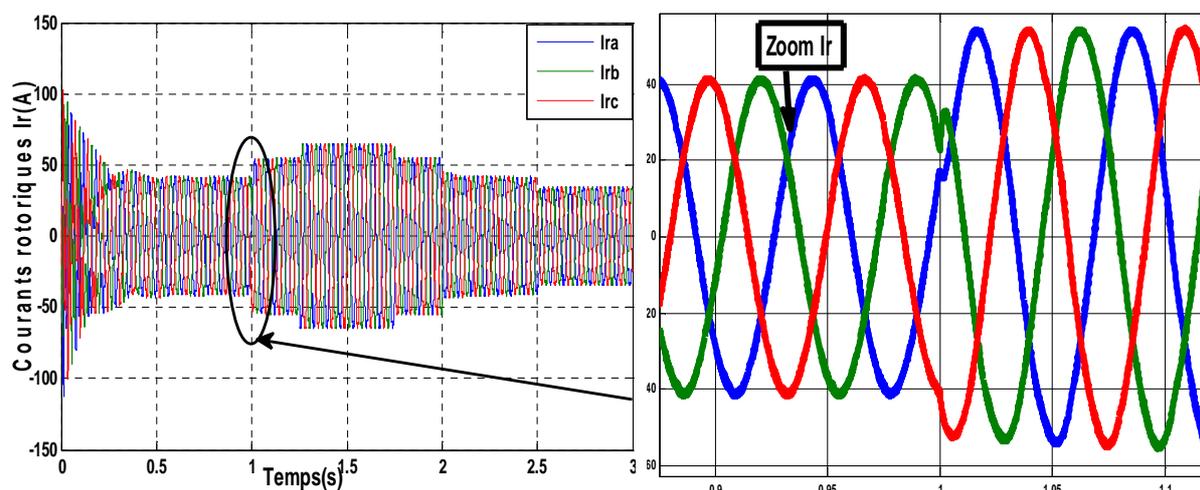


Figure 3.10 : Courants rotoriques de la commande directe.

On peut remarque, que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande ( $d$  et  $q$ ) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde (figure 3.7et 3.8). Enfin, le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

On voit que la variation de la puissance active et réactive influe directement sur l'amplitude du courant statorique figure (3.9), les courants rotoriques suivent la variation de la consigne de puissance (figure (3.10)) sous forme sinusoïdale, avec des légères perturbations (oscillations).

### 3.2. Commande indirecte sans boucles des puissances :

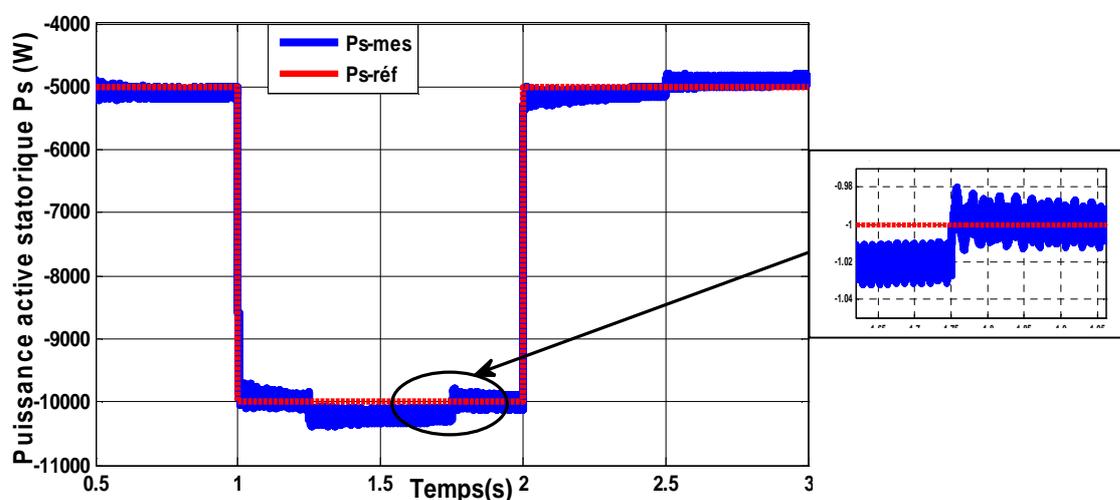


Figure 3.11 : Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles.

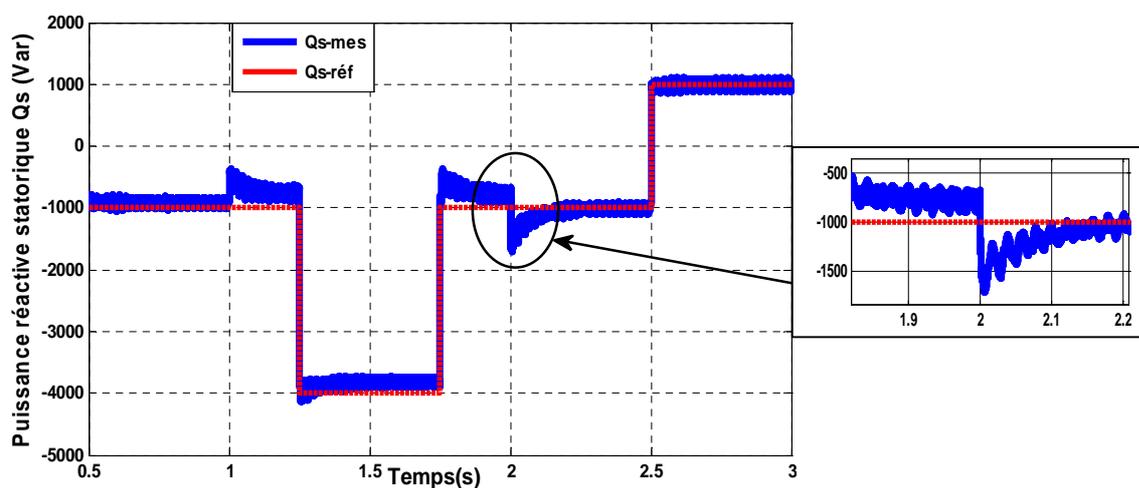


Figure 3.12 : Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles.

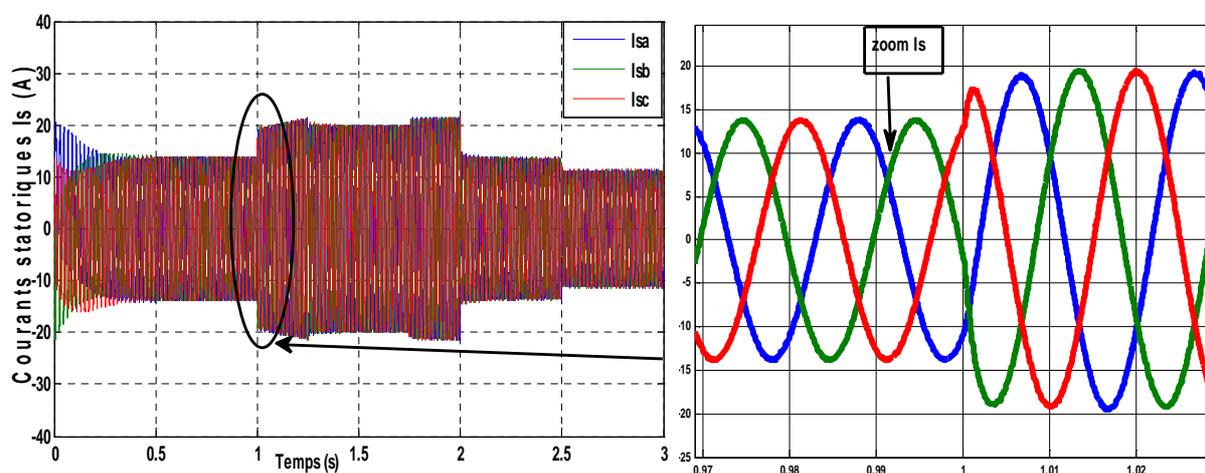


Figure 3.13 : Courants statoriques de la commande indirecte sans boucles.

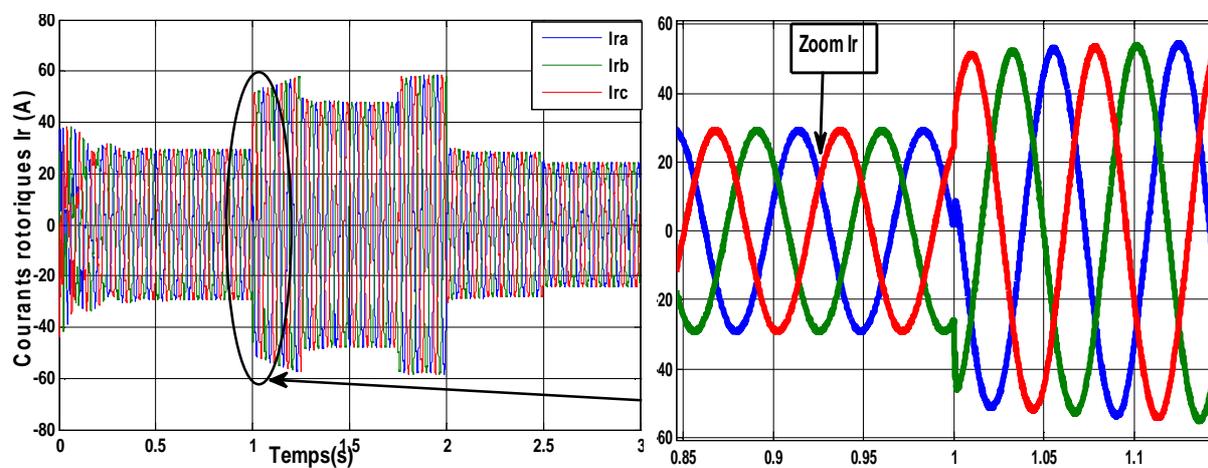


Figure 3.14 : Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles.

La simulation de cette régulation sous MATLAB a donné de bons résultats en termes de dynamique de réponse aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur la figure (3.12). On peut cependant observer une erreur de la puissance réactive lorsque la puissance active est faible.

Par contre, elle fait apparaître une erreur statique au niveau de la puissance active et réactive qui est due au fait que dans cette régulation on ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucle ouvert.

Une des hypothèses de notre modèle était que la tension  $V_s$  soit constante, mais lorsque la puissance active produite varie, cela entraîne nécessairement une légère variation de tension  $V_s$  du fait des impédances de liaison entre le réseau et l'éolienne. Cette petite variation est aussi à l'origine de l'écart des puissances. De plus, la résistance statorique, qui a été négligée dans notre modélisation, a une influence sur les puissances.

L'erreur est nettement plus importante sur la puissance réactive que sur la puissance active car sur la puissance réactive le terme de correction  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ , de la figure 3.5, vient s'ajouter avant le régulateur de courant.

On voit aussi l'effet de couplage entre les axes qui tout de même moins perceptible que pour la commande directe.

On remarque que les courants statorique et rotorique suivent la variation de la consigne de puissance, on voit une amélioration au niveau de leur forme sinusoïdale.

### 3.3. Commande indirecte avec boucles des puissances :

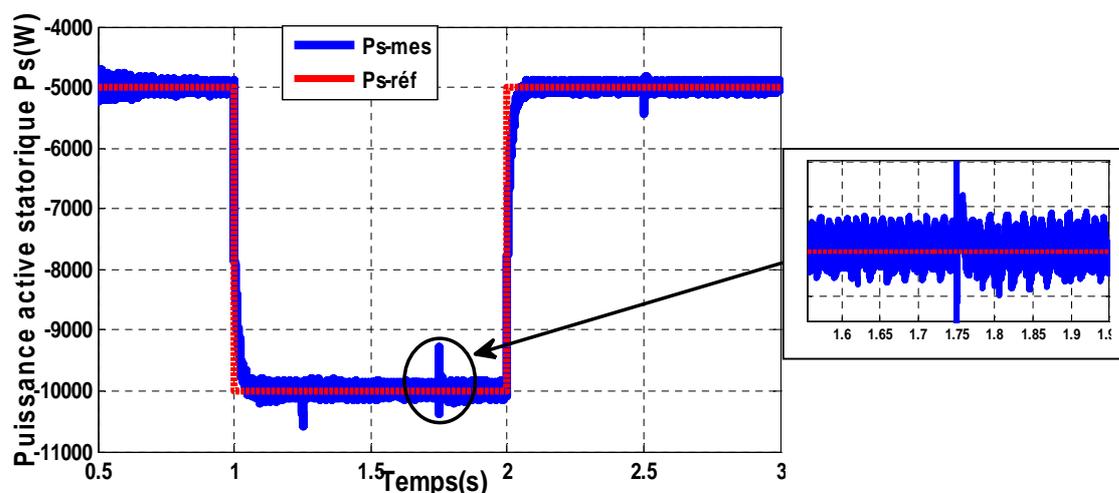


Figure 3.15 : Puissance active statorique de la commande indirecte avec boucles.

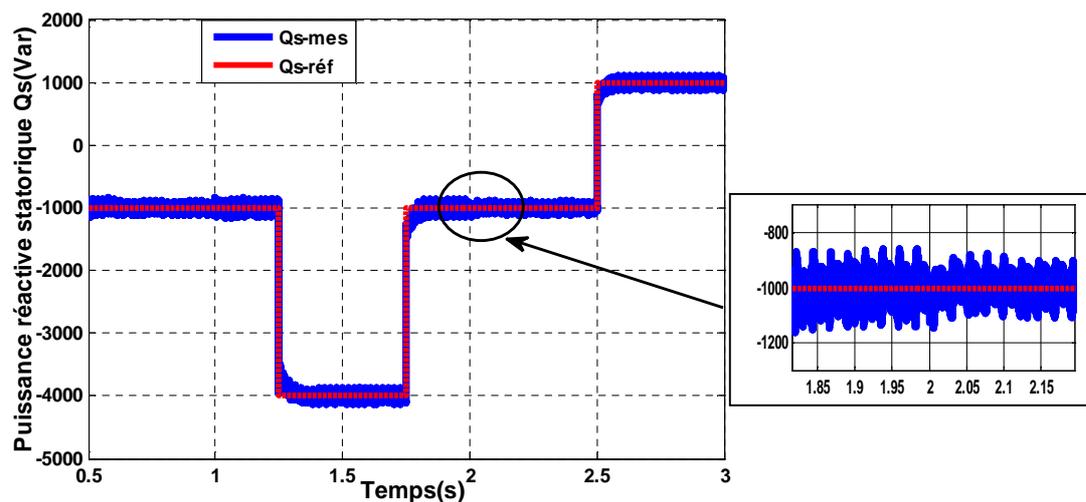


Figure 3.16 : Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles.

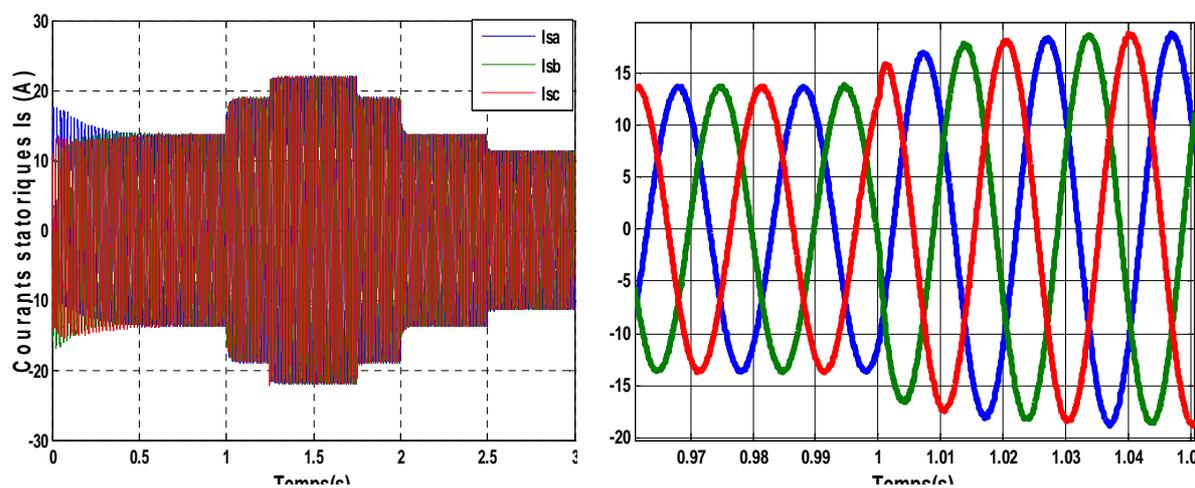


Figure 3.17: Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles.

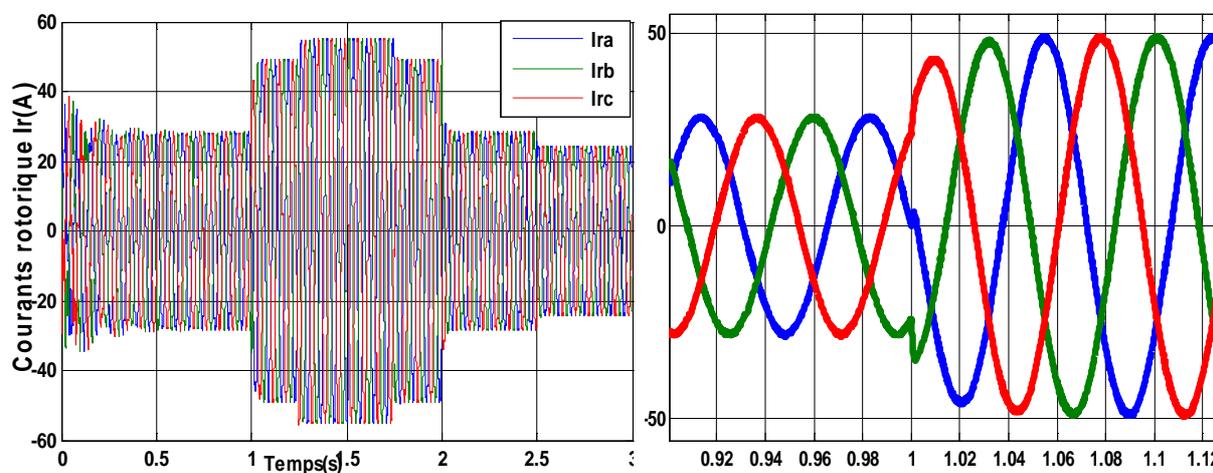


Figure 3.18 : Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles.

La figure (3.15, 3.16) démontre que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances.

Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle machine.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbation entre les deux puissances.

On remarque une amélioration au niveau des courants statorique et rotorique, avec l'absence des perturbations remarqué dans la commande directe, qui donne une bonne forme sinusoïdale (figure 3.17, 3.18).

#### 4. Robustesse de la régulation :

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres.

Le fait d'avoir une commande indirecte avec deux boucles imbriquées permet justement d'accroître la robustesse du système.

Si l'on avait changé un paramètre de la machine ou de réseau comme  $L_s$ ,  $M$  ou  $V_s$ , cette erreur aurait été encore plus grande, alors que pour le système bouclé ces perturbations sont automatiquement corrigée par le régulateur supplémentaire.

#### 4.1. Résultats de la simulation :

##### 4.1.1. Variation de $R_s$ de 50% :

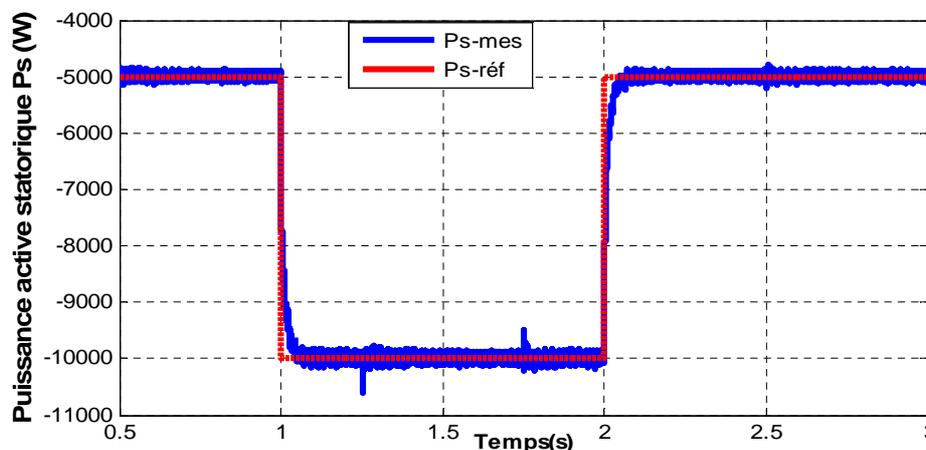
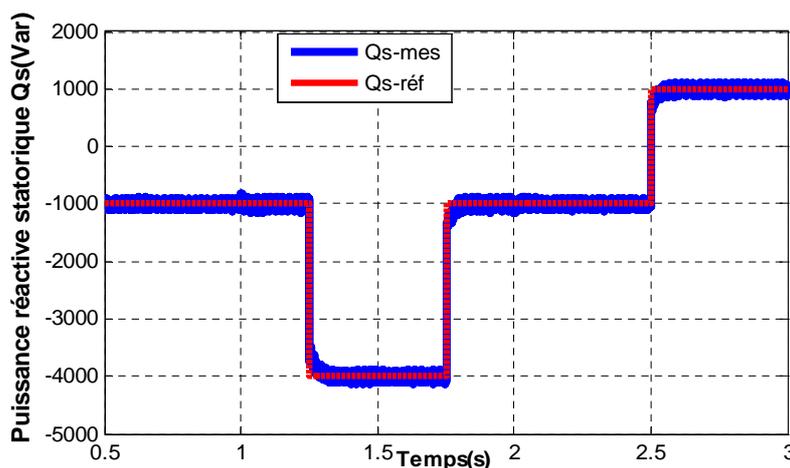


Figure 3.19 : puissance active (commande indirecte avec boucles) et variation de  $R_s$  de 50%.

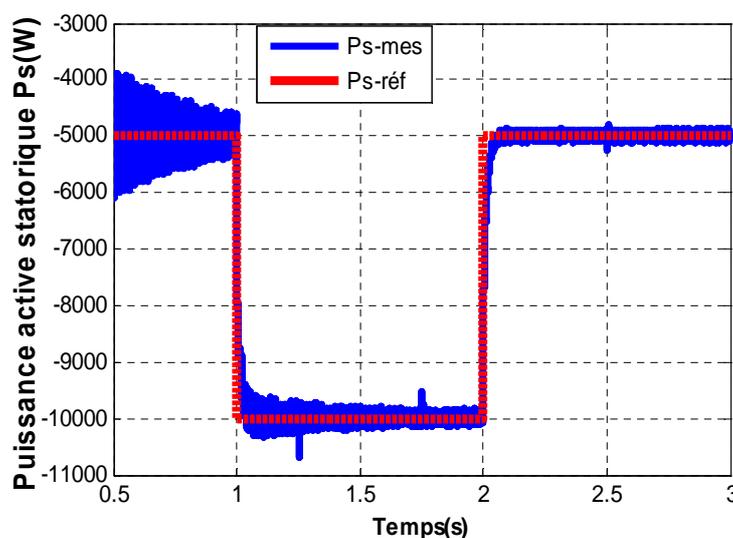


**Figure 3.20:** puissance réactive (commande indirecte avec boucles) et variation de  $R_s$  de 50%.

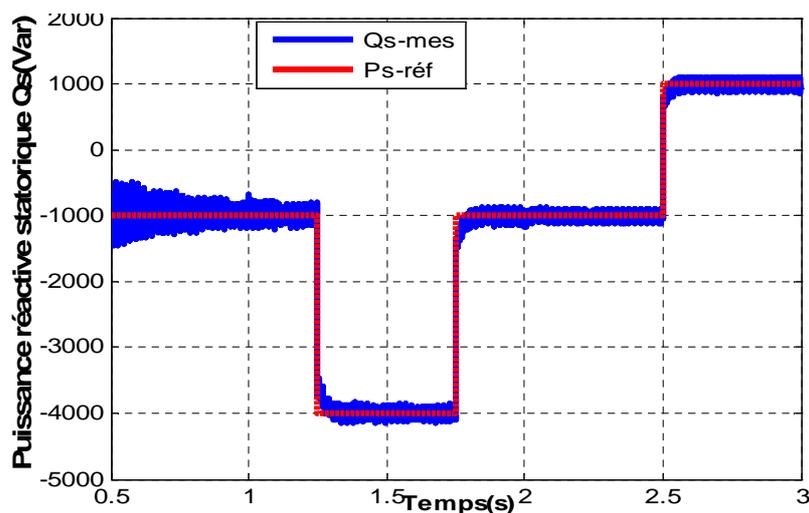
Les figures (3.19, 3.20) présentes l'évolution des puissances lors d'une variation de 50% de la valeur de la résistance statorique  $R_s$ . On remarque que cette variation affecte peu le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle des puissances.

Cette variation de la résistance statorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance.

#### 4.1.2. Variation de $M$ de 50% :



**Figure 3.21 :** puissance active (commande indirecte avec boucles) et variation de  $M$  de 50%.



**Figure 3.22:** puissance réactive (commande indirecte avec boucles) et variation de  $M$  de 50%.

Les figures (3.21, 3.22) donnent l'évolution des puissances lors d'une variation de 50 % de la valeur de mutuelle  $M$ . On remarque que cette variation affecte peu le système et le contrôle des puissances reste efficace.

Le suivi des puissances est toujours assuré et la stabilité ne pas affectée par ces variations de paramètres.

La commande indirecte avec bouclages des puissances nous permet d'avoir un système avec une robustesse suffisante. Nous fonctionnons avec des régulateur PI qui ne sont pas des garants d'une grande robustesse. Cependant, le bouclage des puissances nous garantit un niveau de robustesse acceptable.

## 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a représenté trois méthodes de contrôle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui ont été implantées sous Matlab/Simulink afin de visualiser les résultats de simulation et faire une comparaison. Une méthode directe dans laquelle les puissances active et réactive sont mesurées et comparées à leurs références. Une autre indirecte sans boucles des puissances où les courants rotoriques sont utilisés pour contrôler les puissances. Une troisième avec boucles des puissances dans le but d'améliorer le suivi de consigne de la commande indirecte sans boucles des puissances en y ajoutant deux boucles des puissances.

On peut conclure, que la commande indirecte avec boucles est plus performante, et donne des bons résultats par rapport à la commande directe.

# *Conclusion*

## *Générale*

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans le cadre de la réalisation de notre mémoire de master, nous traitons la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice. Le but étant la mise en place d'une stratégie de commande nécessaire au bon fonctionnement de l'éolienne.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système de conversion d'énergie éolienne en faisant un aperçu sur les différents types d'éoliennes existantes avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Ce chapitre a traité également les différents types de conversion électromécanique en l'accent sur la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le système turbine éolienne associé à la MADA, on a pu voir l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants facile à exploiter et résoudre.

Dans le dernier chapitre, on a élaboré une stratégie de commande en nous basant sur la commande indépendante des puissances actives et réactive, et cela à base de l'orientation de flux statoriques qui sert à simplifier le modèle de la MADA, ceci nous a permis d'aboutir à des schémas bloc qui sont exploités pour la simulation des différentes méthodes de commande prévues (commande directe et indirecte), en utilisant des régulateurs PI.

Les résultats de simulation obtenus nous ont permis de conclure que la commande directe, la plus simple à mettre en œuvre, présente des résultats convenables.

En revanche, la méthode indirecte sans boucles des puissances où les courants rotoriques sont utilisés pour contrôler les puissances, nous montre un découplage parfait avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, par conséquent une minimisation des harmoniques par rapport à ceux obtenus par la commande directe.

Par contre, la méthode indirecte, en association avec le bouclage des puissances, nous permet d'obtenir un système performant. Cette commande est certes, plus complexe à mettre en œuvre parce qu'elle comporte quatre (04) boucles, deux (02) de puissances et deux (02) de courant rotorique.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à compléter le travail réalisé ici ou d'ouvrir de nouveaux axes de travail sont envisageables :

- Etudier et synthétiser la commande de la MADA en utilisant le régulateur LQG (Linéaire Quadratique Gaussien) et faire la comparaison avec le régulateur PI.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande de la MADA
- L'adaptation d'autres techniques de commande pour la MADA.

# *Annexe*

Paramètres de la turbine :

Vitesse du vent :  $V_{vent} = 9 \text{ m/s}$

Gain de multiplicateur :  $G = 90$

Moment d'inertie :  $J = 0.005$

Rayon :  $R = 36 \text{ m}$

Coefficient de puissance maximal :  $C_p = 0.46$

Paramètres de la MADA :

Puissance nominale :  $27 \text{ Kw}$

Nombre de pair de pôles  $p$  : 2 paires de pôles.

Résistance d'enroulement statorique  $R_s$  :  $0.445 \Omega$

Résistance d'enroulement rotorique  $R_r$  :  $0.19 \Omega$

Inductance cyclique statorique  $L_s$  :  $0.07 \text{ H}$

Inductance cyclique rotorique  $L_r$  :  $0.0213 \text{ H}$

Inductance magnétisante  $M$  :  $0.034 \text{ H}$

## **BIBLIOGRAPHIE**

**[HAM 08] N.HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », diplôme de magister, université de mentouri de constantine, janvier 2008.

**[BEN 12] C.BENNOUR** « simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation »,diplôme magister, université mohamed khider –Biskra, novembre 2012 .

**[ALI 11] B.ALI**, « contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne », mémoire de magister, université mouloud mammeri ,tizi-ouzou, septembre 2011.

**[BOU 12] M.BOUARAKI** , « étude d'un entraînement à double alimentation pour une turbine éolienne a vitesse variable »,mémoire de magister, université M'hamed boumerdes,juin 2012.

**[HAS 12] M.HASSAD** , « influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques »,mémoire de magister ,université setif 2012.

**[ABD 07] M.S.Abdoulaziz**, Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Mémoire d'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,2007.

**[WIN]** Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne,  
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.

**[POI 03] F.POITIERS**, Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de L'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome –Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

**[BOY 06] A.BOYETTE** « contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »thèse de doctorat de l'université henri poincaré,nancy 2006

**[IDJ 10] K.IDJDARENE** «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » docteur en sciences de l'Université Abderrahmane MIRA – Bejaia (Algérie), l'Université Lille 1 (France), le 23 Mai 2010.

**[DAV 07] A. DAVIGNY** « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.

**[MAL 14] M. MALKI** « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret » MEMOIRE Pour l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen 2014.

**[COU 14] COURS** « 2<sup>e</sup> année master –Energie renouvelable par Mr : K.IDJADARNE », université de Bejaia 2014/2015.

**[FED 13]O.FEDDAOUI** « Contribution à l'Etude des Systèmes Contribution à l'Etude des Systèmes Aux Energies Renouvelables »mémoire magister (commande des machines électriques). Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras,2013/20014.

**[RIH 12] L.RIHANI** , « modélisation et commande de la génératrice à induction double alimentée couplé sur un réseau électriques » mémoire magister ,université batna , janvier 2012.

**[MEK 04] N.MEKKAOUI**, « contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentation », mémoire de magister université de batna ,juin 2004.

**[THI 12] THIerno LAMARANA SOW**, «commande non linéaire de l'éolienne à mada pour une participation au réglage de la fréquence du réseau», université du québec 2012.

**[MOL 11] A.MOLLOUL**« Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne »mémoire Magister en Electrotechnique, universite ferhat abbas — setif 2011.

**[BRI 10] BRICE BELTRAN**, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », thèse de doctorat, université de Bretagne Occidentale, 2010.

**[VIN 04] VINCENT ROGEZ**, « modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », thèse de doctorat, université de Lille, 2004.

**[ABO 08] H.ABOUD et R.TAMENDJARI** « introduction d'une commande non linéaire a une machine asynchrone à double alimentation dédiée a une éolienne », mémoire d'ingénieure, bejaia 2008.

**[MOD 13]**, « Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Unité de Recherche en Technologies Industrielles URTI/CSC, BP1037, Annaba, Algérie, 2013.

**[SOE 03] JORIS SOENS. DRIESEN, RBELMANS**, (A Comprehensive Model of a Doubly Fed Induction Generator for Dynamic Simulations and Power System Studies li , ESAT/ELECTA. KT. Leuven. Belgium. ICn.EP'03, 2003

**[LIA 03], LIANWEI JIAO** Banakar, H.; BAIKE SHEN; CHANGLING LUO; Joos, G.; Boon-Teck Ooi, 11Fundamental and Applied Hesearch on Doubly-Fed Induction Generator", Electrical Machines and Systems, 2005. ICEYIS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on, Volume 1, 27-29 Sept.2005.)

**[CAM 03] H. CAMBLONG**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003

**[TEL 12] TELLI Abderrahim** « étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau mt », Mémoire en vue l'obtention du Diplôme de Magister en Electrotechnique ,2012.

**[SOW 12] T.L SOW**, « commande non linéaire de l'éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence du réseau ».comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en génie électrique m.ing, école de technologie supérieure université du Québec, Montréal, janvier 2012.

**[MAR] J. MARTIN**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

**[LEC] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI**, « Eoliennes», techniques de l'ingénieur, traité deGénie mécanique, pp. BM 4 640 21.

**[ROU 12] ROUABHI RIYADH**, Magister en Electrotechnique, « Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne », universite ferhat abbas —setif, 2012.

**[SEG 06] GUY SEGUIER, Francis NOTELET, « Electrotechnique industrielle ». Edition Lavoisier, 2006.**

**[DEN 10] DENDOUGA ABDELHAKIM, « contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.**

**[HAM 08] I. HAMZAOU, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.**

**[ELK 12] EL KABIRA, EL MJABBER, « Modélisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », mémoire master, 2012/2013.**

**[BEK 14] YUCEF BEKAKRA, «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», Doctorat en sciences, Réseaux Electriques, 21/10/2014. Université Mohamed Khider – Biskra.**

**[TEL] TELLI ABDERRAHIM, « étude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT », Mémoire en vue l'obtention du Diplôme de Magister en Electrotechnique, Réseaux Electriques, université des sciences et de la technologie d'Oran, soutenu le 2012.**