

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**Département d'Electrotechnique**

## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Electromécanique

Option : **Electromécanique**  
Présenté par

**Tahtah Abdelatif**

**Amrane Mohamed El Amine**

**THEME**

***Application industrielle de la génératrice  
asynchrone dans la production d'énergie  
électrique***

**Soutenu devant le jury composé de :**

	Prof	UAT-Laghouat	Président
	MC	UAT-Laghouat	Examineur
Nouar Allal	MA	UAT-Laghouat	Encadreur

*Promotion : sept 2020.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*En premier lieu à ma mère et à mon père  
(Rabî yarhmo) qui ont Consenté beaucoup  
de sacrifices pour me permettre de réaliser  
mes objectifs et Qu'ils trouvent ici toute ma  
reconnaissance et ma gratitude.*

*A mes frères et mes sœurs*

*A mon binôme Amine*

*A tous mes camarades et mes amis*

*A tous mes enseignants depuis le primaire  
jusqu'à maintenant.*

*Abdellatif*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*En premier lieu à ma mère et à mon père  
(Rabî yarhmo) qui ont Consenté beaucoup  
de sacrifices pour me permettre de réaliser  
mes objectifs et Qu'ils trouvent ici toute ma  
reconnaissance et ma gratitude.*

*A mes frères et mes sœurs*

*A mon binôme Abdellatif*

*A tous mes camarades et mes amis*

*A tous mes enseignants depuis le primaire  
jusqu'à maintenant.*

*Amine*

## *Remerciement*

*Louange à Allah Le Tout Puissant Qui nous a accordé la foi, le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur, Monsieur NOUAR Allal pour sa patience et ses conseils précieux qui nous ont été très utiles.*

*Nous avons été nommés Monsieur de vous exprimer nos reconnaissances et nos reconnaissances les plus sincères.*

*Nous remercions également Monsieur AMEUR Aissa professeur à l'université de Laghouat, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*Nous remercions également Monsieur GUIBADJ Mossadek, Maître de conférences à l'université de Laghouat, , d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Merci aussi à tous nos collègues et amis, nous leur exprimons notre profonde sympathie et leur souhaitons beaucoup de chance pour leurs travaux.*

*Finalement, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'université de Laghouat représentée par les enseignants du département d'électrotechnique ainsi que le personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide et leurs conseils précieux*

## ملخص

يقدم هذا العمل النمذجة والتحكم في الآلة اللائزمانية ذات التغذية المزدوجة (م.ذ.ت.م MADA) في إنتاج الطاقة الكهربائية المحولة من طاقة الرياح. من أجل تحقيق هذا الهدف، تم إنشاء نموذج للمكونات المختلفة لمولد الرياح (التوربينات، (م.ذ.ت.م) و تركيبة المقوم-الموج). تم بعد ذلك إجراء التحكم في تتبع نقطة الطاقة القصوى بواسطة التحكم الشعاعي في القدرة الفاعلة و القدرة المفاعلة.

تم تطوير هذا التحكم عن طريق وحدة تحكم خطية نسبي تكاملي (ن.ت.ب. PI). يتم تحليل أداء النظام ومقارنته من حيث تتبع التعليمات المرجعية والصلابة وإزالة الاضطرابات.

يتحكم في الآلة اللائزمانية ذات التغذية المزدوجة عن طريق الدوار باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة (ت.ع.ن. MLI). و من أجل الحد من تلف الشبكة، قمنا بالتحكم في التيار بواسطة مقوم التيار باستخدام تقنية (ت.ع.ن) العاملة بالتخلفية.

اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة مولد الرياح، و من خلال النتائج لاحظنا أن الآلة اللائزمانية ذات التغذية المزدوجة قابلة تؤدي بفعالية عملية توليد الطاقة الكهربائية بواسطة طاقة الرياح.

## الكلمات المفتاحية :

آلة غير متزامنة ذات التغذية المزدوجة ، توربينات الرياح ، النمذجة ، موج ، مقوم ، التحكم الشعاعي.

## Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composition de l'éolienne (Turbine, MADA et cascade redresseur – onduleur). Afin d'atteindre le point de fonctionnement à puissance produite maximale (MPPT), une commande vectorielle de la puissance active et réactive statorique a été élaborée.

Le réglage de cette commande a été effectué par un régulateur linéaire PI. Les performances du dispositif ont été analysées et comparées en termes de suivi de consignation, robustesse et l'élimination des perturbations.

La MADA est pilotée par le rotor en appliquant la technique de commande MLI triangulosinusoidale à l'onduleur. Pour éviter la dégradation du réseau nous ont commandé le redresseur en courant par la technique MLI à hystérésis.

Cette étude a été conclue par la modélisation et la simulation de l'éolienne. Les résultats nous ont révélé que de la MADA peu assumé pleinement son application dans la production d'énergie éolienne.

## Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, Eolienne, Modélisation, Onduleur, redresseur, Commande vectorielle.

## Abstract

This work presents the modelling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production. With this intention, a model of the different components of the wind generator (Turbine, DFIM and cascaded converter- inverter) was established. The maximum power point tracking control was done by a vector control of the generator with active and reactive stator powers as control variables.

This control is elaborated by synthesizing a linear controller PI. The performances of the system are analyzed and compared in terms of references tracking, robustness and disturbance rejection.

The converter is used for drive the DFIM. For this reason we used the PWM technique to control this device. In order to limit the damage of the network we controlled by the current the inverter by using the PWM hysteresis technique.

This study was concluded by a simulation of the wind generator. We observed at a result, that the DFIM is able to be used in the wind generation application.

### Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, inverter, converter, vector control.

# Liste des figures

## CHAPITRE I :

### Etude bibliographique

Figure I.1 : structure de Savonius .....	07
Figure I.2 : Structure de Darrieus. ....	08
Figure. I.3 Aérogénérateur à axe horizontal .....	09
Figure I.4 : représente les différents composants d'une éolienne.....	11
Figure I.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne .....	12
Figure I.6 : Variations du coefficient de puissance.....	13
Figure I.7 Caractéristique puissance en fonction des vitesses .....	14
Figure I.8 : Aérogénérateur à vitesse fixe .....	15
Figure I.9 : Aérogénérateur à vitesse variable .....	16
Figure I.10 : alternateur dans au chaine de conversion éolienne .....	17
Figure I.11 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne .....	18
Figure I.12 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne .....	19

## CHAPITRE II

### Modélisation de la turbine (partie mécanique)

Figure II.1 : Schéma de la turbine éolienne .....	23
Figure II. 2 : Profil du vent appliqué à la turbine.....	24
Figure II. 3 : Modélisation du rotor éolien par un disque actif .....	25
Figure II. 4 : Éléments caractéristiques d'une pale .....	27
Figure II. 5 : direction du vent sur un tronçon de pale.....	28
Figure II. 6 : Forces appliquées sur un élément de pale.....	29
Figure II.7 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine	31
Figure II.8 : Modèle de la turbine .....	32
Figure II.9 : Vitesse Schéma bloc du modèle de la turbine .....	34
Figure II.10 : Coefficient de puissance de la turbine .....	34
Figure II.11 : Vitesse mécanique et la puissance mécanique produite par la turbine ..	35
Figure II.12 : Vitesse spécifique $\gamma$ et le profil du vent appliqué à la turbine .....	35

## CHAPITRE III

### Modélisation de la MADA (partie électromécanique)

Figure III.1 Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA.....	37
Figure. III.2 : Représentation des enroulements (rotor-stator) d'une machine asynchrone .....	40
Figure III.3 : Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents ... ..	43
Figure III.4 : Schéma synoptique de fonctionnement en génératrice de la MADA. ...	47
Figure III.5 : Représentation du redresseur triphasé à diodes.....	48
Figure III.6 : Représentation de la tension de sortie du redresseur.....	49
Figure III.7 : Représentation du filtre passe –bas. ....	49
Figure III.8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA .....	50
Figure III.9 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire. ....	52

## CHAPITRE IV :

### Commande de la MADA pour la régulation des puissances

Figure IV.1 : Analogie avec le moteur à courant continu .....	55
Figure IV.2 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	56
Figure. IV.3 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances .....	60
Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande directe .....	62
Figure IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	63
Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.....	64
Figure IV.7 : Les composantes du flux statorique .....	65
Figure IV.8 : Les composantes du courant statoriques .....	65
Figure IV.9 : Courants statorique avec zoom.....	65
Figure IV.10 : La puissance active et réactive statorique.....	66
Figure IV.11 : Le couple électromagnétique et les courants rotorique .....	66
Figure IV.12 : Courant direct et quadrature rotorique.....	66
Figure IV.13 : Les composantes du flux statorique .....	67
Figure IV.14 : Les composantes du courant statorique .....	67
Figure IV.15 : La puissance active et réactive statorique.....	68
Figure IV.16 : Couple électromagnétique et les courants rotorique.....	68
Figure IV.17 : Courant direct et quadrature rotoriques .....	68

## Liste des symboles

$V$	: Vitesse du vent
$U$	: Vitesse du vent relative
$W$	: Vitesse résultante
$C$	:Facteur d'échelle de la courbe $P(V)$
$V_{moy}$	: Vitesse moyenne du vent
$r$	: distance du moyeu
$V_1$	: Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
$V_2$	: Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
$\rho$	:Masse volumique de l'air
$S$	:Surface balayée par les pâles
$P_{tr}$	: Puissance transmise au disque
$P_v$	: Puissance totale du vent
$C_p$	: Coefficient de puissance
$R_T$	: Rayon des pales
$\Omega_1$	: Vitesse de rotation avant le multiplicateur
$\Omega_2$	: Vitesse de rotation après multiplicateur
$P_n$	: Puissance nominale
$V_n$	: Vitesse nominale du vent
$F_{force}$	: Force appliqué sur le disque actif
$\Omega_T$	: Vitesse de rotation de la turbine
$a$	: Facteur d'induction axial
$V_{max}$	: Vitesse maximale du vent
$V_{min}$	: Vitesse minimale du vent
$\beta$	: Angle de calage
$\Omega_{mec}$	: Vitesse de mécanique de la génératrice
$\Omega_{min}$	: Vitesse de rotation minimale de la génératrice
$\Omega_{max}$	: Vitesse de rotation maximale de la génératrice
$\lambda$	: Rapport de vitesse
$v_d(t)$	: vitesse dans le plan de disque
$\Delta P$	: Variation de puissance
$\Delta V$	: Variation de la vitesse de vent
$C_{em}$	: Couple électromagnétique
$C_{aer}$	: Couple mécanique sur l'axe de la turbine
$C_{mec}$	: Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice
$C_{em}$	: Couple électromagnétique
$\Omega_{ref}$	: Vitesse de rotation de référence
$\Omega_r$	: Vitesse de rotation de la génératrice ( arbre rapide)
$\Omega_t$	: Vitesse de rotation de la turbine (arbre lent)
$F(s)$	: fonction de transfère du régulateur de vitesse
$J$	: moment d'inertie totale
$J_g$	: moment d'inertie de la machine
$J_t$	: moment d'inertie de la turbine
$P^+; P^-$	: Pressions atmosphérique
$Cr$	: Couple résistant dû au frottement
$V_0(t)$	: Vitesse du vent en un point
$\Psi$	: Angla d'attaque avec le plan de rotation
$U_d(t)$	: Tension instantané

LISTE DES SYMBOLES

$p_{em}$	: Puissance electromagnétique
$C_{vis}$	: Couple de frottement visqueux
$P_a$	: Puissance absorbé
$C_t$	: Coefficient de couple
$f_m$	: Coefficient de frottement de la machine
$f_t$	: Frottement visqueux de la turbine
$V_{s-abc}$	: Tensions simples du stator de la MADA
$V_{r-abc}$	: Tensions simples du rotor de la MADA
$I_{s-abc}$	: Courants du stator de la MADA
$I_{r-abc}$	: Courants du rotor de la MADA
$\Phi_{s-abc}$	: Flux statorique de la MADA
$\Phi_{r-abc}$	: Flux rotorique de la MADA
$R_s$	: Résistance d'une phase due stator
$R_r$	: Résistance d'une phase du rotor
$L_s$	: Inductance propre d'une phase du stator
$L_r$	: Inductance propre d'une phase du rotor
$M_{ss}$	: Inductance mutuelle entre phases du stator
$M_{sr}$	: Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor
$M_{rr}$	: Inductance mutuelle entre phases du rotor
$M$	: Inductance mutuelle maximale
$P$	: Nombre de paires des pôles
$V_{ds}, V_{qs}$	: Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q
$V_{dr}, V_{qr}$	: Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{ds}, I_{qs}$	: Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{dr}, I_{qr}$	: Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}$	: Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q
$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$	: Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$[\mathbf{P}(\theta)]$	: Matrice de transformation de Park
$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1}$	: Matrice de transformation de Park inverse
$\omega_a$	: Vitesse de rotation du repère de Park
$\omega_s$	: Vitesse électrique du champ tournant
$\omega_m$	: Vitesse électrique du rotor
$\omega_g$	: Vitesse angulaire du glissement
$V_{abc}$	: Tensions efficaces de la ligne
$R_l$	: Résistance de la ligne
$L_l$	: Inductance de la ligne
$S_{abc}$	: Etat des interrupteurs de l'onduleur
$U_{dc}$	: Tension aux bornes du bus continu (tension redressée)
$P_s$	: Puissance active statorique
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
$P_r$	: Puissance active rotorique
$Q_r$	: Puissance réactive rotorique
$P_{s-ref}$	: Puissance active de référence statorique
$Q_{s-ref}$	: Puissance réactive de référence statorique
$\alpha$	: Angle d'incidence
$\gamma$	: vitesse relative

## LISTE DES SYMBOLES

---

<i>MSAP</i>	: Machine synchrone à aimant permanent
<i>MADA</i>	: Machine asynchrone à double alimentation
<i>Mcc</i>	: Machine à courant continu
<i>Fmm</i>	: Force magnétomotrice
<i>Ec</i>	:Energie cinétique
<i>MLI</i>	: modulation largeur d'impulsion
<i>CV</i>	: Commande vectorielle
<i>IGBT</i>	: Transistor bipolaire à grille isolée
<i>EDF</i>	: Entreprise de production et fourniture d'électricité
<i>g</i>	: Glissement
<i>G</i>	: Gain du multiplicateur

# Table des matières

Dédicaces .....	i
Remerciements.....	ii
Résumés .....	iii
Liste des figures .....	iv
Liste des symboles .....	v
Tables des matières .....	vi
Introduction générale .....	2

## CHAPITRE I :

### ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	6
I.2 Etat de l'art.....	6
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	6
I.2.2. Types d'aérogénérateurs .....	7
A. Aérogénérateurs à axe verticale .....	7
B. Aérogénérateurs à axe horizontal .....	8
I.2.3. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne .....	9
• Les avantages .....	9
• Les inconvénients .....	9
I.4 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	12
Le mat .....	10
La nacelle .....	10
Le rotor .....	11
I.4 Constitution d'une éolienne .....	12
I.4.1 Loi de BETZ.....	12
I.4.2 Utilité de la vitesse variable .....	14
I.5. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.....	15
I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe .....	15
I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	16
I.6. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique .....	17
I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone .....	17
I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone .....	17

<b>I.7 Avantages de la GADA.....</b>	<b>19</b>
<b>I.8.Conclusion .....</b>	<b>20</b>

## **CHAPITRE II :**

### **Modélisation de la turbine (Partie mécanique)**

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.1. Principe .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.2. Modèle du vent.....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.3. Modèle du disque actif .....</b>	<b>25</b>
II.2.3.1. Équation de continuité .....	26
II.2.3.2. Bilan de quantité de mouvement .....	26
II.2.3.3. Coefficient de puissance .....	27
<b>II.2.4. Action du vent sur les pales de la turbine .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.5. Modélisation de la turbine éolienne .....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.6. Modèle de la boîte de vitesse .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.7. Equation dynamique de l'arbre .....</b>	<b>32</b>
<b>II.3 Résultats de simulation .....</b>	<b>34</b>
<b>II.4 Conclusion .....</b>	<b>35</b>

## **CHAPITRE III :**

### **Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation**

#### **(Partie électromécanique)**

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.Présentation de la machine asynchrone à double alimentation .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.1. Principe de fonctionnement de la MADA .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.2. Domaines d'application de la MADA .....</b>	<b>39</b>
<b>III.3 Modélisation de la machine Asynchrone .....</b>	<b>39</b>
<b>III.3.1. Équations électriques .....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.2. Équations magnétiques .....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.3. Équation mécanique .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3.4. Transformation de Park applique sur la machine asynchrone triphasée .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3.5. Équations de la machine biphasée équivalente .....</b>	<b>43</b>
<b>III.3.6. Définition des différents référentiels .....</b>	<b>44</b>
<b>III.3.7. Puissance absorbée et couple électromagnétique .....</b>	<b>46</b>

<b>II.4 Modélisation d'alimentation de la MADA</b> .....	<b>47</b>
<b>III.4.1. La chaine de conversion</b> .....	<b>47</b>
III.4.1.1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes .....	48
III.4.1.2. Modélisation du filtre .....	49
<b>III.4.2. Modélisation de l'onduleur triphasé</b> .....	<b>49</b>
<b>III.4.3. Modulation de largeur d'impulsion (MLI)</b> .....	<b>51</b>
<b>III.5 Conclusion</b> .....	<b>52</b>

## **CHAPITRE IV :**

### **Commande de la MADA pour la régulation des puissances**

<b>IV.1 Introduction</b> .....	<b>54</b>
<b>IV.2. Principe de la commande vectorielle</b> .....	<b>55</b>
<b>IV.3 Modèle de la MADA à flux statorique orienté</b> .....	<b>57</b>
<b>IV.3.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques</b> .....	<b>58</b>
<b>IV.4 Expressions des tensions rotorique</b> .....	<b>59</b>
<b>IV.5 Contrôle indépendant des puissances active et réactive</b> .....	<b>61</b>
<b>IV.5.1. Commande directe</b> .....	<b>61</b>
<b>IV.5.2. Commande indirecte</b> .....	<b>62</b>
IV.5.2.1. Commande en boucle ouvert .....	62
IV.5.2.2. Commande en boucle fermé .....	63
<b>IV.6 Résultats de Simulation</b> .....	<b>64</b>
<b>IV.6.1. Interprétation des résultats</b> .....	<b>66</b>
<b>IV.6.2. Interprétation des résultats</b> .....	<b>67</b>
<b>IV.7 Conclusion</b> .....	<b>69</b>

# *Introduction générale*

## Introduction générales

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et d'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. Le système de puissance qui est à la base de cette énergie fonctionne dans un environnement en évolution continue : charges, puissance de génération, topologie du réseau. L'augmentation de la dépendance électrique de la société moderne implique des systèmes de puissance exploitables à cent pour cent de leur capacité avec une sûreté maximale.

Les trois machines " à courant continu, synchrone et asynchrone " ont de tout temps servi les besoins de l'industrie traditionnellement, ces machines électriques ont été commandées manuellement et les équipements pour ces opérations sont complexes et coûteux.

Comparés aux moteurs à courant continu et aux moteurs synchrones, les moteurs asynchrones sont de plus en plus utilisés dans le monde de l'industrie pour les différentes applications modernes telles que la robotique et le véhicule. Aussi ils sont à l'étude pour remplacer les actionneurs hydrauliques et pneumatiques dans différentes applications telles l'aérospatial, les ports de métro, etc..... Cela est dû à plusieurs facteurs, le bas coût de fabrication, la robustesse et la fiabilité. Contrairement aux deux moteurs cités plus hauts, les enroulements du moteur asynchrones sont court-circuités, et donc ne nécessitent pas d'alimentation externe.

La machine asynchrone, de part sa simplicité de conception et d'entretien, a été la plus favori des industriels depuis son invention par Nicola Tesla à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle.

Cette simplicité s'accompagne toutefois de grande complexité physique liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. D'autre part, la machine asynchrone peut, selon sa construction, être alimentée par un réseau monophasé ou polyphasé (généralement triphasé car c'est celui du réseau de distribution). En outre, la machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans le domaine des

puissances supérieures à quelques kilowatts car elle offre le meilleur rapport qualité prix.

La machine asynchrone occupe une place très importante dans le domaine de la production d'énergie éolienne de faible et moyenne puissance qui est dédiée au secteur privé notamment dans les pays développés comme les Etats unis et le Canada. L'apparition de ces centrales privées éoliennes est le résultat de la croissance de la demande en énergie et en même temps le souci de préserver l'environnement.

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques [2].

**Dans ce chapitre I** nous présentons les différents éléments d'une éolienne à savoir la partie mécanique, la partie électrique et la partie commande. Les générateurs les plus utilisés actuellement dans les aérogénérateurs on trouve la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), et la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le critère de choix de la machine repose sur les avantages que présente chaque machine, une comparaison entre la MSAP et la MADA est mis en exergue.

**Chapitre II** Dans cette partie, on présente les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie. Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de cette puissance sont ensuite brièvement exposées.

**Chapitre III** Ce chapitre sera consacré à la modélisation de la MADA, ce qui contribue en outre à développer la stratégie de la commande pour le convertisseur du côté rotor, ainsi que la modélisation de convertisseur du côté réseau électrique dans un repère d-q en rotation synchrone

**Chapitre IV** Dans ce travail, il sera exposé le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA. Ainsi, comme il est montré dans la (Fig. IV.2), le flux sera callé sur l'axe d et la tension du stator sur l'axe q, cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié.

. Il s'agit fondamentalement de définir la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande en vue d'asservir indépendamment les puissances statoriques (puissance Active et Réactive) en fonction des courants rotoriques direct et en quadrature.

Dernièrement le quatrième chapitre, ce chapitre est réservé au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté.

# Chapitre I

## *Etude bibliographique*

## **I.1. Introduction**

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée.

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques [2].

Dans ce chapitre nous présentons les différents éléments d'une éolienne à savoir la partie mécanique, la partie électrique et la partie commande. Les générateurs les plus utilisés actuellement dans les aérogénérateurs on trouve la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), et la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le critère de choix de la machine repose sur les avantages que présente chaque machine, une comparaison entre la MSAP et la MADA est mis en exergue.

## **I.2. Etat de l'art sur l'énergie éolienne**

### **I.2.1. Définition de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuse discipline scientifique et du savoir-faire de la météorologie à l'écologie [1].

## I.2.2 Types d'aérogénérateurs

### A. Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, plusieurs structures ont vu le jour mais seulement deux structures ont été industrialisées :

A.1- Structure Savonius (conformément à son inventeur) : son principe de fonctionnement est basé sur le principe de la "traînée différentielle" qui illustre que le mouvement de rotation est dû au fait que l'air en mouvement exerce des pressions très différentes sur les différents corps constituant l'éolienne, et que la force du vent agissant sur la partie concave est très différente de la force s'exerçant sur la partie convexe, créant ainsi un couple moteur sur l'axe[9].

#### Savonius-Rotor

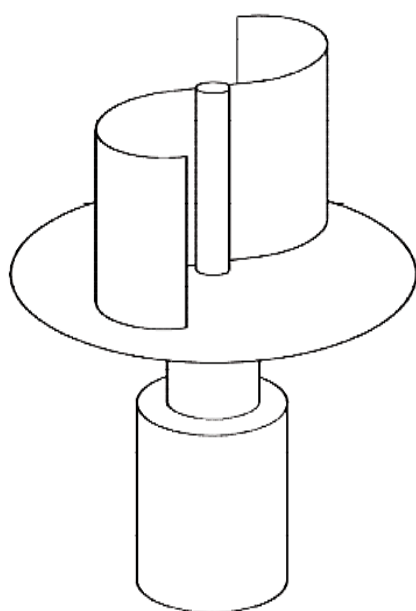


Fig.I.1 : Structure de Savonius [9].

A.2- Structure Darrius : Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

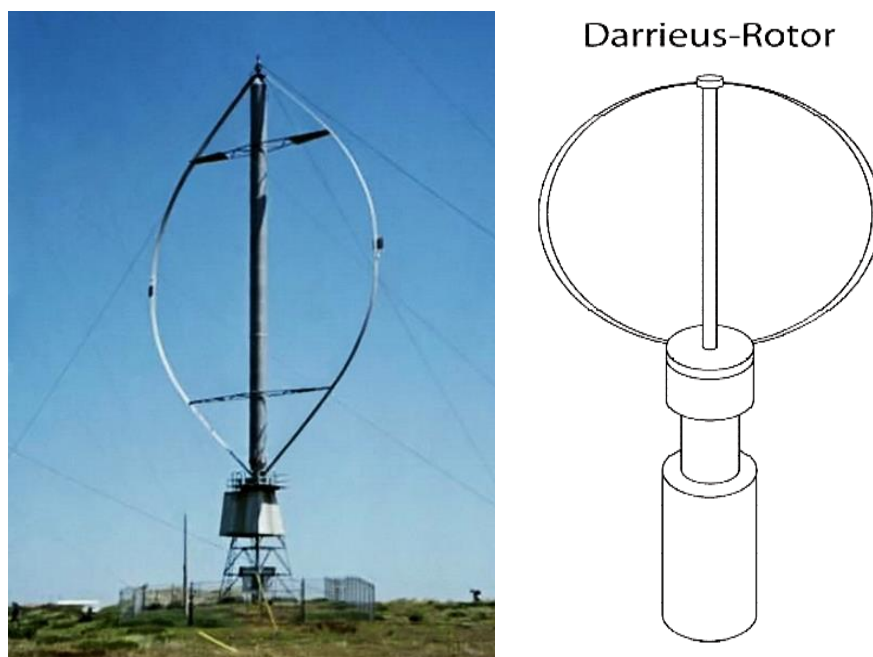


Fig.I.2 : Structure de Darrieus.

Les aérogénérateurs à axe vertical ont l'avantage d'avoir la génératrice et les organes de commande au niveau du sol ce qui facilite les interventions de la maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'installer un système d'orientation des pales mais la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Ils sont de plus exposés à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les Puissances élevées.

### **B. Aérogénérateurs à axe horizontal**

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales, mais il existe d'autres structures à une ou deux pales.



Fig.I.3 : Aérogénérateur à axe horizontal

### **I.2.3. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne [3].**

- **Les avantages :**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois ;
- ✓ l'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable ;
- ✓ l'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation ;

Au-delà de la donnée économique et environnementale, l'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

- **Les inconvénients :**

- ✓ La pollution visuelle et sonore. La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations ;

Sur le plan technique, l'éolien a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production de l'énergie électrique :

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible ;
- ✓ Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux. En effet, tant que ce type de production reste marginal, les contraintes sont limitées. Aussi pendant longtemps les parcs éoliens n'ont souvent eu pour seules «contraintes » que de produire lorsqu'il était possible de produire et de ne pas dégrader la qualité de tension sur les réseaux.

Aujourd'hui, du fait du développement important et toujours croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à des exigences techniques de plus en plus sévères imposées par des règles de raccordement aux réseaux définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux.

### I.3. Constitution d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs à axe horizontal qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois principaux éléments [3] :

- **Le mât** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle sont nécessaires pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent.

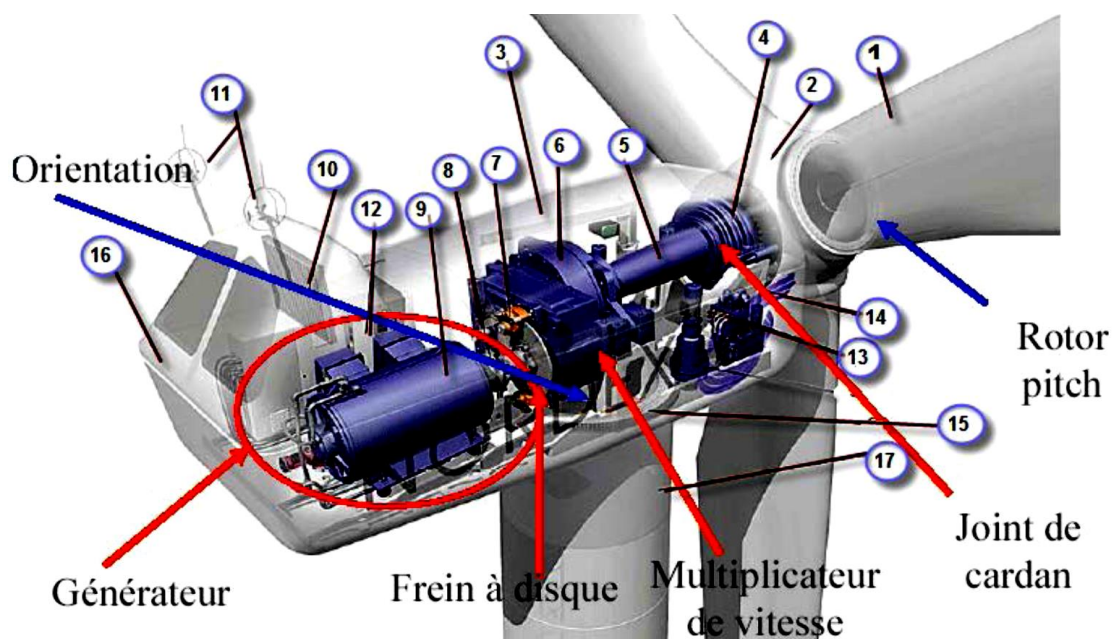


Fig.I.4 représente les différents composants d'une éolienne [2].

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

- **Le rotor** : est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

## I.4 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

### I.4.1 Loi de BETZ

La théorie du éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le turbine éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  » [2].

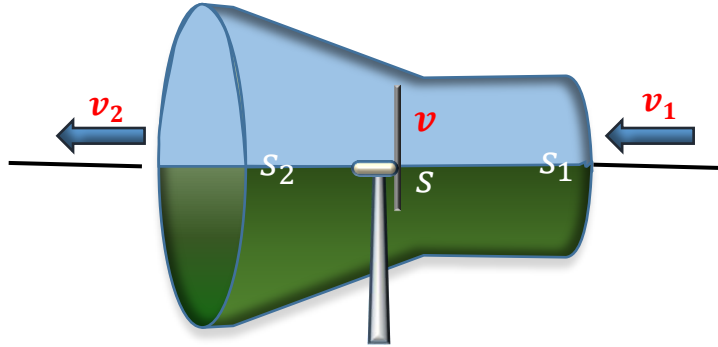


Fig.I.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [1].

De la figure (I-5) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$s_1 v_1 = s_2 v_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par :

$$f = \rho \cdot s v \cdot (v_1 - v_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$p_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot s v^2 (v_1 - v_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique  $E_c$  de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = p_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot s v (v_1^2 - v_2^2) \quad (I.4)$$

En déduit :

$$V = (v_1 + v_2)/2 \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de  $V$  dans les relations (I. 2) et (I. 3) on obtient :

$$p_{aero} = \frac{1}{4} \cdot p \cdot s (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) \quad (I.6)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $s$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $v_1$ , la puissance (mécanique théorique) correspondante serait alors [2] :

$$p_{mt} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot s v_1^3 \quad (I.7)$$

On définit le rapport entre les deux puissances  $C_p$  (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{p_{aero}}{p_{mt}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right) \quad (I.8)$$

Ce coefficient présente un maximum de  $16/27$  soit  $0,59$  [1]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\gamma$

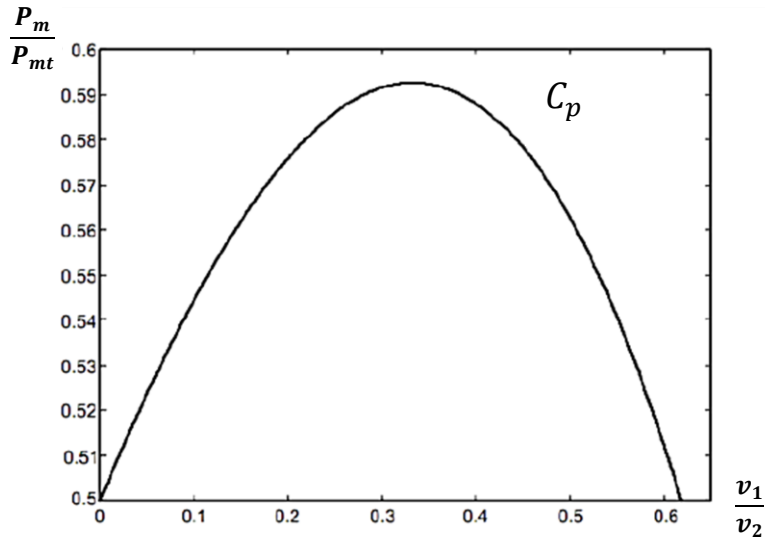


Fig.I.6 : Variations du coefficient de puissance [2].

En combinant les équations (I. 8) et (I. 9), la puissance mécanique  $p_{aero}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$p_{aero} = \frac{p_{aero}}{p_{mt}} p_{mt} = C_p(\beta, \gamma) \cdot p_{mt} = C_p(\beta, \gamma) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s v_1^3 \quad (I.9)$$

avec :

$$\gamma = \frac{\Omega_T R_T}{v} \quad (I.10)$$

où

$\Omega_T$  : vitesse de rotation de la turbine

$R_T$  : la longueur (rayon) de la pale

### I.4.2 Utilité de la vitesse variable

Pour une vitesse du vent  $V_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point *A*) (Figure I-7). Si la vitesse du vent passe de  $V_1$  à  $V_2$  et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2ème caractéristique (point *B*). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point *C*). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [1].

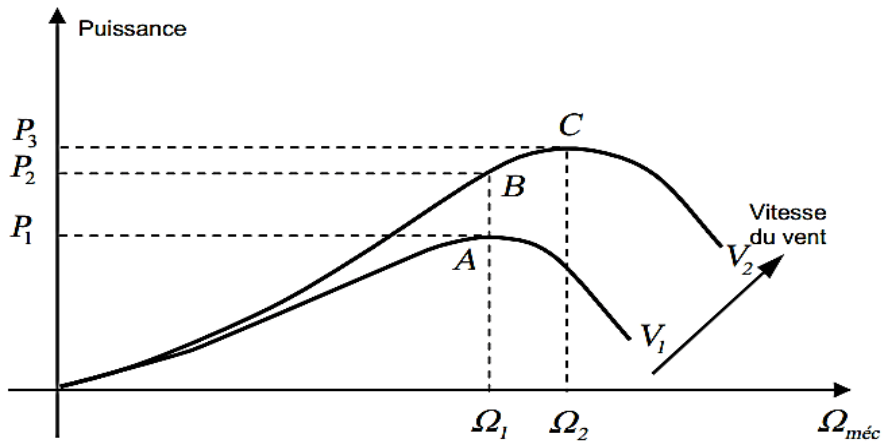


Fig.I.7 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.

## I.5. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

### I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I.8), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de pair de pôles de la génératrice.

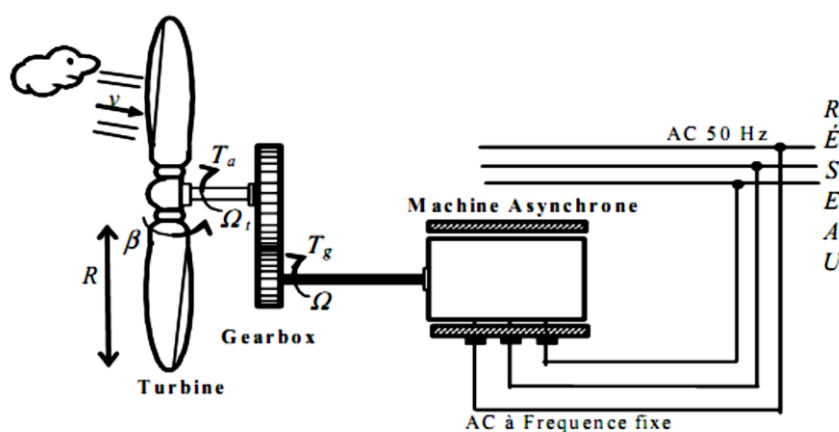


Fig.I.8 : Aérogénérateur à vitesse fixe

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice [7].

#### ❖ Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.
- Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

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

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques) .
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

### I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.9) [10].

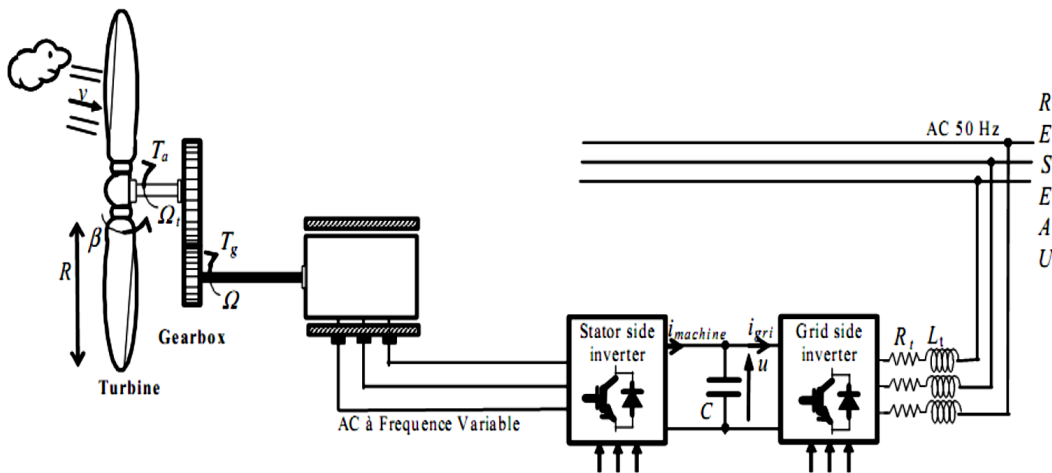


Fig.I.9 : Aérogénérateur à vitesse variable [10].

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude.

## I.6. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique

### I.6.1 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 des 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 éolien [1][7].

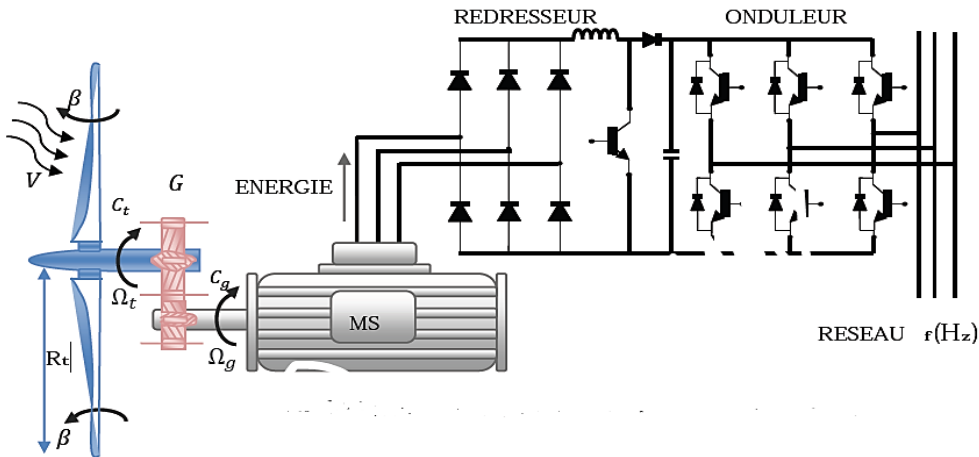


Fig.I.10 : alternateur dans au chaîne de conversion éolienne [7].

### I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à

l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine 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 des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%)

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 [7].

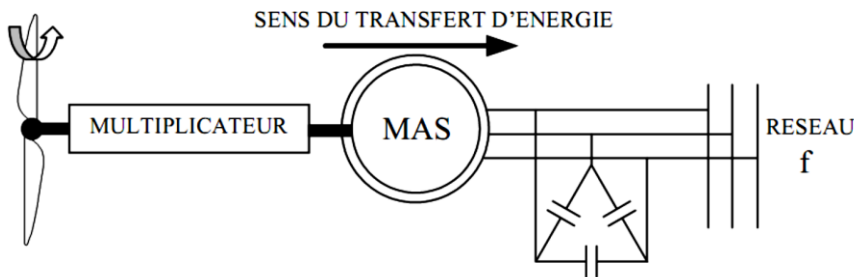


Fig.I.11 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne [1]

Par conséquent, la MADA a trouvé la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

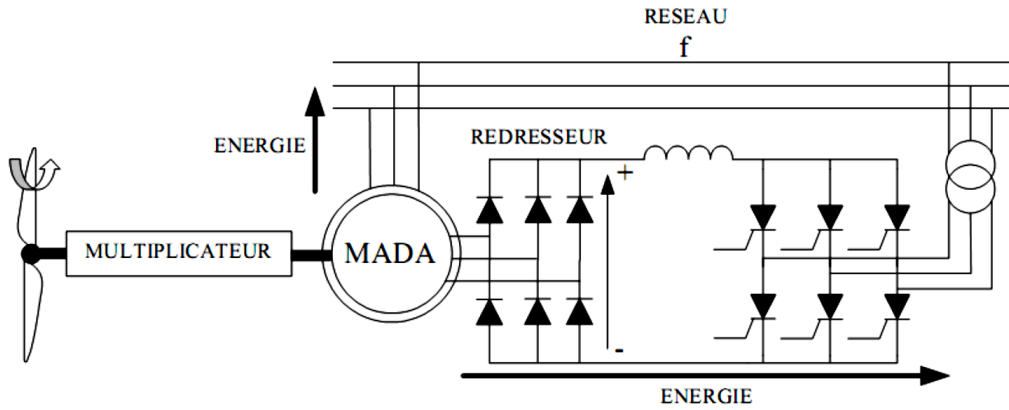


Fig.I.12 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux (Figure I.12).

### I.7. Avantages de la GADA

Parmi ses nombreux avantages, on peut citer :

- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive.
- La possibilité de fonctionner la MADA comme un filtre actif pour les harmoniques de courant grâce à la commande indirecte des puissances active et réactive par les courants rotoriques.
- Le convertisseur coté rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui divise pratiquement leur prix par 3 par rapport à des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement du système de conversion est ainsi amélioré.

- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones et asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances, elle est envisagée pour des puissances élevées (>1MW) où elle s'avère être une concurrente de la machine asynchrone à cage.
- La MADA est une "machine généralisée", effectivement c'est une machine pouvant "assurer" tous les fonctionnements des autres machines. Par extension, cette généralisation nous permet d'envisager le pilotage de cette machine de manière plus globale en le dédiant à la gestion de l'optimisation des échanges d'énergie au sein du système auquel la MADA est intégrée.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

## **I.8. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation Etat de l'art sur l'énergie éolienne, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éoliens, les différentes génératrices et convertisseurs utilisées et enfin nous avons fait la description et l'impact sur le réseau et sur la qualité d'énergie dans les systèmes éoliens.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation de la partie mécanique de éolienne

# Chapitre II

## *Modélisation de la turbine (Partie mécanique)*

## II.1. Introduction

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts. A nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués [11].

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale.

Dans cette partie, on présente les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie. Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de cette puissance sont ensuite brièvement exposées.

## II.2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne :

### II.2.1. Principe :

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

La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [42]. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse gain  $G$ . Le dispositif est illustré dans la figure II.1.

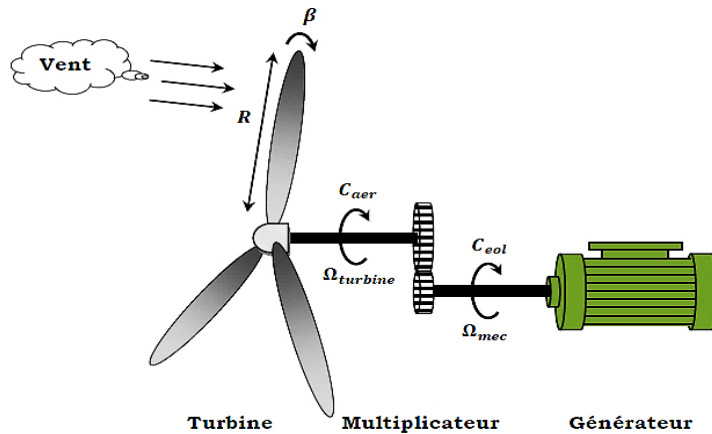


Fig.II.1- Schéma de la turbine éolienne.

$J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine.

$J_g$  : Le moment d'inertie du générateur.

$f_V$  : Le coefficient du frottement visqueux du générateur.

$C_{aér}$  : Le couple mécanique sur l'axe de la turbine.

$C_{mec}$  : Le couple mécanique sur l'Arbre du générateur ;

$\Omega_{aér}$  : La vitesse de rotation de la turbine ;

$\Omega_{mec}$  : La vitesse de rotation du générateur ;

$\beta$  : Angle de calage des pales de la turbine.

### II.2.2. Modèle du vent :

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension, [39].

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une

fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [30].

Une composante moyenne à variation lente «  $v$  », qui représente le niveau de vitesse du Vent.

$v = 6 \text{ m/s}$  pour un vent faible vitesse.

$v = 12 \text{ m/s}$  pour un vent moyen vitesse.

$v = 18 \text{ m/s}$  pour un vent fort vitesse.

La vitesse  $v_0(t)$  du vent en un point peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne (lentement variable)  $v$  et d'une composante variable représentant les fluctuations  $v(t)$ . L'expression de la vitesse du devient donc :

$$v_0(t) = v + v(t) \quad (\text{II.1})$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [39] :

$$v_0(t) = 8,5 + 2 \sin(2,5t - \pi/5) + 2 \sin(4t - \pi/3) + 1,5 \sin(5,4t + \pi/12) + 0,5 \sin(2,5t - \pi/12) \quad (\text{II.2})$$

Dans la suite de la modélisation, le profil du vent appliqué possède une vitesse moyenne de  $12 \text{ m/s}$  représenté par la figure suivante :

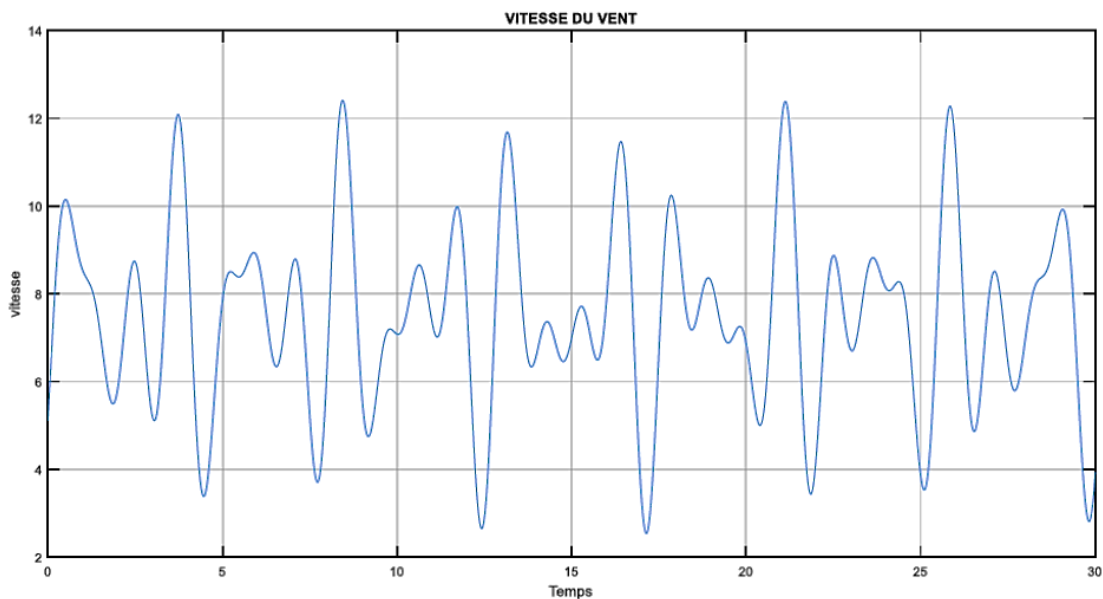


Fig.II.2 : Profil du vent appliqué à la turbine [30].

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à des mesures effectuées par EDF sur le site du canal des dunes [39].

### II.2.3. Modèle du disque actif, [40] :

En mécanique des fluides, le disque actif est défini comme une surface de discontinuité où des forces de surface agissent sur l'écoulement. Ce modèle est extrêmement simplifié et repose sur les hypothèses suivantes :

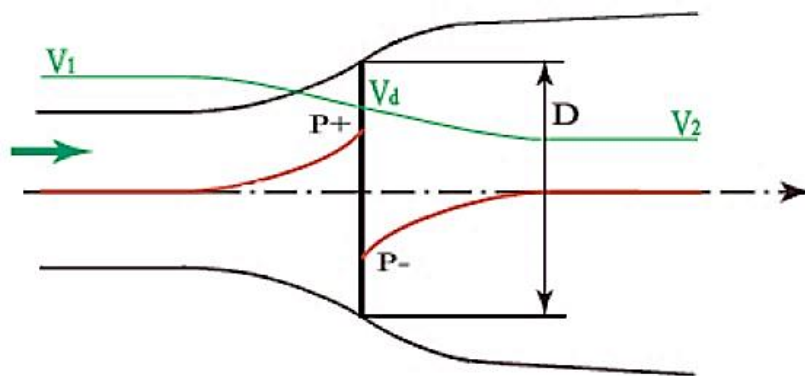


Fig.II.3 - Modélisation du rotor éolien par un disque actif, [42].

La géométrie du rotor est simplifiée et ce dernier n'est représenté que par un disque d'épaisseur nulle de diamètre  $D$ . Le fluide est incompressible, non visqueux et non pesant. Les vitesses  $V_1$  à l'infini amont,  $V_d$  dans le plan du disque et  $V_2$  dans la veine à l'infini aval sont uniformes et axiales.

L'énergie spécifique de l'écoulement comporte deux parties : cinétique et potentielle de pression.

La vitesse axiale dans le plan de rotation est définie en fonction de la vitesse à l'infini amont par l'introduction du facteur d'induction axial  $a$ , défini comme étant la proportion de la réduction de vitesse entre le vent incident et le vent passant à travers le rotor [40].

Soit :

$$a = \frac{V_1 - V_d}{V_1} \quad (\text{II.3})$$

Donc :

$$V_d = (1 - a)V_1 \quad (\text{II.4})$$

### II.2.3.1. Équation de continuité :

L'application de l'équation de continuité permet d'écrire :

$$\rho S_1 V_1 = \rho S_d V_d = \rho S_2 V_2 \quad (\text{II.5})$$

On désigne par  $S$ ,  $S_2$  et  $S_d$  les surfaces du disque traversées par le vent.

### II.2.3.2. Bilan de quantité de mouvement :

Quand le vent passe dans le tube de courant comportant le disque actif, il y a un changement de vitesse égal à  $(V_1 - V_2)$ , et le taux de variation de quantité de mouvement est égal à la somme des efforts extérieurs appliqués. Comme le tube de courant est complètement entouré par le vent à la pression atmosphérique, les forces à l'origine du changement de quantité de mouvement viennent uniquement de la différence de pression créée par le disque actif, [40].

$$(P_d^+ - P_d^-)S_d = (V_1 - V_2)\rho S_d V_1(1 - a) \quad (\text{II.6})$$

Pour obtenir la différence de pression, nous utilisons l'équation de Bernoulli entre l'infini amont et le disque et entre le disque et l'infini aval, [40] :

à l'amont:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_d^+ + \frac{1}{2}\rho V_d^2 \quad (\text{II.7})$$

à l'aval:

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = P_d^- + \frac{1}{2}\rho V_d^2 \quad (\text{II.8})$$

d'où :

$$\Delta P = (P_d^+ - P_d^-) = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.9})$$

A l'aide des équations (II.4), (II.6) et (II.9) on trouve que :

$$V_2 = (1 - 2a)V_1 \quad (\text{II.10})$$

En comparant les équations (II.4) et (II.10) on trouve que la vitesse induite dans le plan du rotor est égale à la moitié de la vitesse induite à l'infini aval, [40].

### II.2.3.3. Coefficient de puissance :

D'après les équations (II.6) et (II.10), on exprime la force appliquée sur le disque actif [40] :

$$F_{force} = (P_d^+ - P_d^-)S_d = 2\rho S_d V_1^2 a(1 - a) \quad (II.11)$$

La puissance transmise au disque est :

$$P = F_{force} V_d = 2\rho S_d V_1^3 a(1 - a)^2 \quad (II.12)$$

Le coefficient de puissance est défini par le rapport entre la puissance transmise au disque actif et une valeur de référence correspondant à la puissance du vent amont traversant une surface égale à celle du disque actif, [40] :

$$C_p = \frac{2\rho S_d V_1^3 a(1-a)^2}{2\rho S_d V_1^3} \quad (II.13)$$

Donc :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (II.14)$$

### II.2.4. Action du vent sur les pales de la turbine :

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté dans la figure II.4, [42].

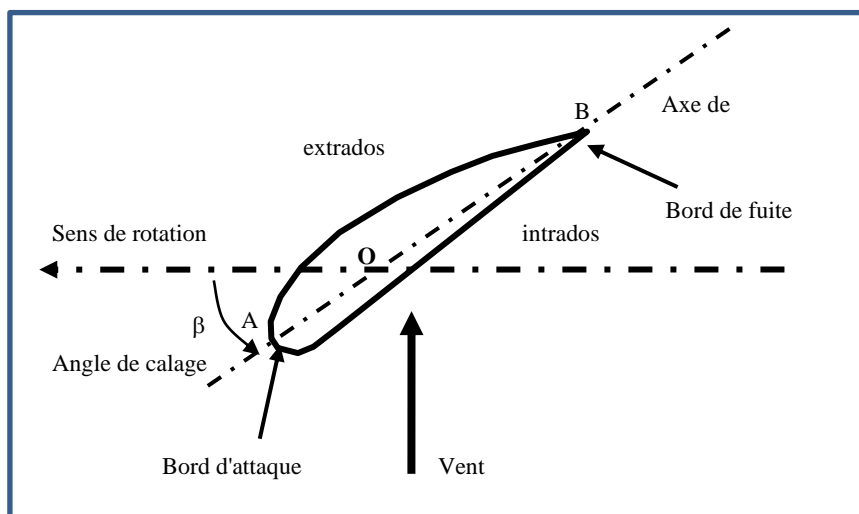


Fig.II.4 - Éléments caractéristiques d'une pale, [41].

On remarque plus particulièrement les éléments suivants, [40] :

- Extrados : dessus de la pale
- Intrados : dessous de la pale.
- Corde l : longueur du profil du bord d'attaque au bord de fuite [A-B] - Angle de calage (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation) .

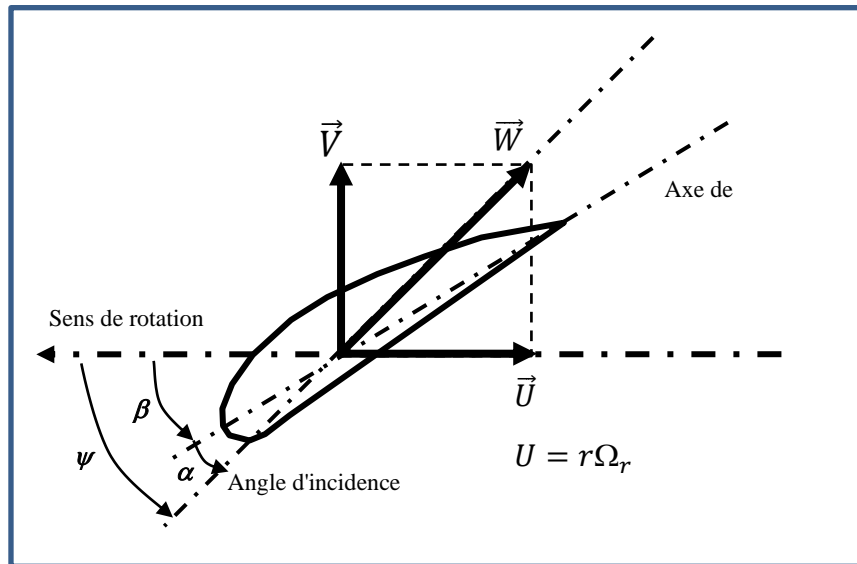


Fig.II.5 - direction du vent sur un tronçon de pale [41].

Du fait de la rotation de la pale, le « tronçon » de largeur  $d$  située à une distance  $r$  du moyeu est soumis à la fois au vent incident de vitesse  $\vec{V}$  et à un vent relatif de vitesse  $\vec{U}$  dirigée dans le sens contraire de la rotation de vitesse  $\Omega_{aér}$ , [41].

$$U = r \cdot \Omega_{aér} \quad (\text{II.15})$$

La vitesse résultante  $WW$  du vent « apparent » s'écrit donc :

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad (\text{II.16})$$

La vitesse résultante du vent « apparent »  $\vec{W}$  fait un angle d'attaque  $\psi$  avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\psi = \text{Arctan} \left( \frac{V}{U} \right) \quad (\text{II.17})$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté  $\alpha$  entre l'axe de référence de la pale  $\beta$  et la direction du vent apparent  $\psi$  :

$$\alpha = \psi - \beta \quad (\text{II.18})$$

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale  $dS$  de largeur  $dr$  et de longueur de corde  $l$  à une distance  $r$  de l'axe de rotation une force résultante  $d\vec{F}$  :

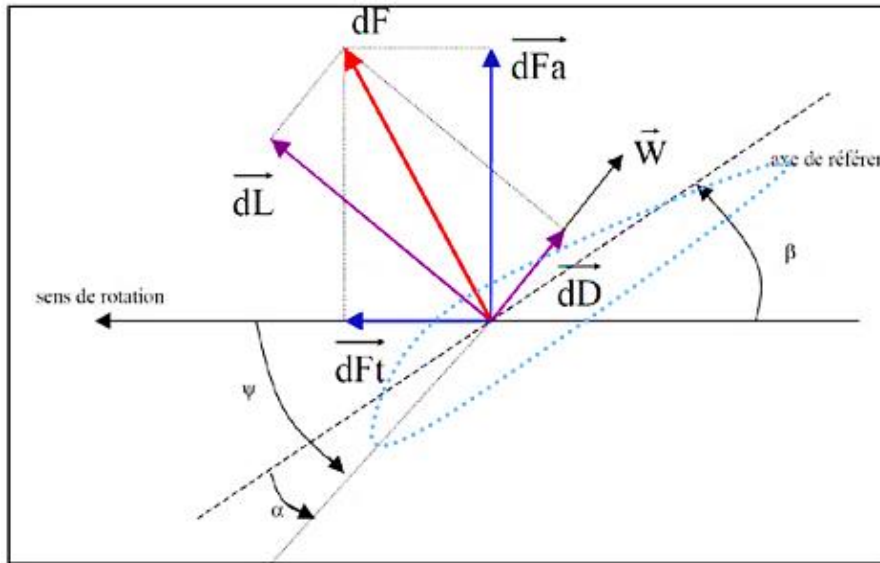


Fig.II.6 - Forces appliquées sur un élément de pale, [41].

On peut décomposer la force résultante  $d\vec{F}$  de la manière suivante :

- La portance  $d\vec{L}$ , normale à la direction du vent apparent.
- La force de trainée  $d\vec{D}$ , parallèle à la direction du vent.
- La poussée axiale  $d\vec{F}_a$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle  $d\vec{F}_t$ , dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la trainée à partir du schéma précédent, [41] :

$$d\vec{F}_t = dL \cdot \sin(\psi) - dD \cdot \cos(\psi) \quad (\text{II.19})$$

$$d\vec{F}_a = dL \cdot \cos(\psi) + dD \cdot \sin(\psi) \quad (\text{II.20})$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

### II.2.5 Modélisation de la turbine éolienne :

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers  $\Omega$  d'entraînement tournant à une vitesse turbine un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  [24].

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_v = \frac{\rho S v^3}{2} \quad (\text{II.21})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [19]:

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S v^3}{2} \quad (\text{II.22})$$

Avec :  $C_p$ : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda-3)\beta \quad (\text{II.23})$$

$\beta$ : L'angle d'orientation des pales.

$\lambda$ : : Le rapport de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_{vent}} \quad (\text{II.24})$$

$\Omega_{turbine}$ : La vitesse de la turbine.

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1,5 MW, l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [4] :

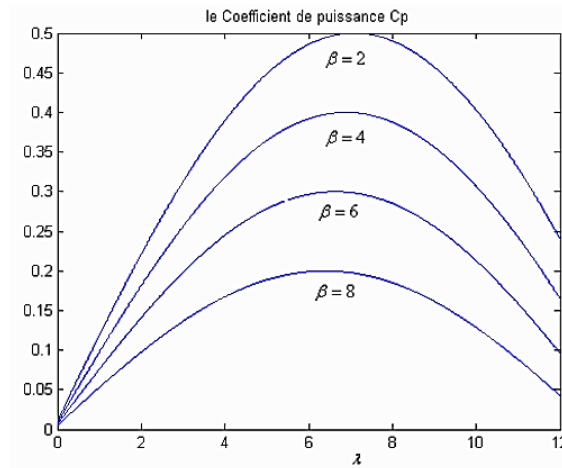


Fig.II.7 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine [4] :

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} C_p \frac{\rho S v^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.25)$$

### II.2.6. Modèle de la boîte de vitesse :

La turbo génératrice doit effectuer deux tâches principales. Tout d’abord, elle doit produire de l’énergie électrique. Ensuite, en ajustant la charge électrique, le couple de freinage de la génératrice va contrôler la vitesse de la turbine pour atteindre la rotation de vitesse optimale correspondant au coefficient de puissance  $C_p$  optimal pour la vitesse du vent actuelle. Le système à vitesse variable proposé est censé être connecté à travers une boîte de vitesse. Cette dernière, branchée entre la turbine et la génératrice, adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice en multipliant la vitesse de la turbine par un simple gain comme suit :

$$\Omega_r = G \Omega_t \quad (II.26)$$

Avec :

$\Omega_r$  : vitesse de la génératrice (arbre rapide en rad/s).

$G$  : rapport de multiplication.

$\Omega_t$  : vitesse de rotation des pales (arbre lent en rad/s).

Afin d'obtenir le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice, le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplication comme suit :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (II.27)$$

Avec :

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe de la génératrice [N.m].

$C_t$  : Couple mécanique de la turbine éolienne [N.m].

### II.2.7. Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est amenée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_T$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine amenée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_g$ , [40]

$$J = J_t G^2 + J_g \quad (II.28)$$

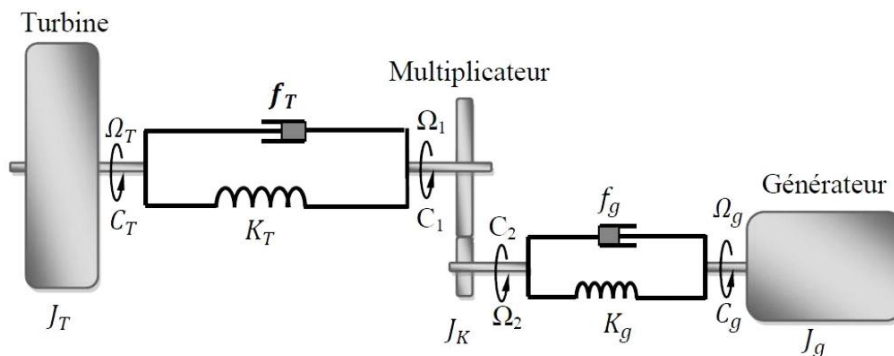


Fig.II.8 - Modèle de la turbine [30]

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

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor, [40] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (II.29)$$

Avec :

$J$  : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice [ $\text{kg.m}^{-2}$ ].

$C_{mec}$  : le couple mécanique

Le couple mécanique  $C_{mec}$  comporte :

- $C_{em}$  : Le couple électromagnétique produit par la génératrice
- $C_{vis}$  : Le couple de frottement visqueux

et le couple issu du multiplicateur  $C_g$  :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.30})$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (\text{II.31})$$

Alors, l'équation mécanique du modèle, ramenée sur l'arbre du générateur, se simplifie sous la forme suivante :

$$\frac{C_t}{G} - C_g = \frac{J_T}{G^2} + J_g \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + \frac{f_t}{G^2} + f_g \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.32})$$

$C_t, C_g$  : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

$J_t, J_g$  : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

$f_t, f_g$  : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

$G$  : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

$\Omega_{mec}$  : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad \text{et} \quad \frac{f_t}{G^2} + f_g = f \quad (\text{II.33})$$

d'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.34})$$

Le schéma bloc correspondant à l'ensemble de ces modélisations se traduit sur la figure

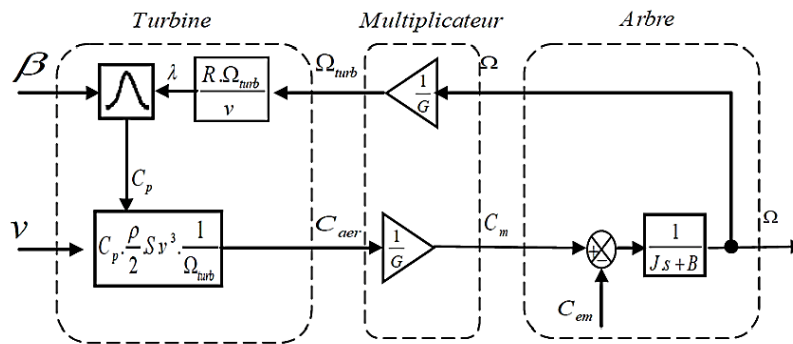


Fig.II.9 : Schéma bloc du modèle de la turbine [4].

### II.3. Résultats de simulation :

Les équations (II.23), (II.24), (II.25), (II.26), (II.27), (II.28) et (II.29) permet de reprendre un schéma bloc de la turbine. Sur la figure (I.10), la courbe est caractéristique par le point optimal ( $C_{pmax} = 0,50$ ,  $\beta = 2^\circ$ ) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance ( $C_{pmax}$ ). La figure (I.12) présente la vitesse spécifique  $\gamma$  et le profil du vent appliqué à la turbine éolienne la valeur du vent est variée de 6 à 9,5 m / s.

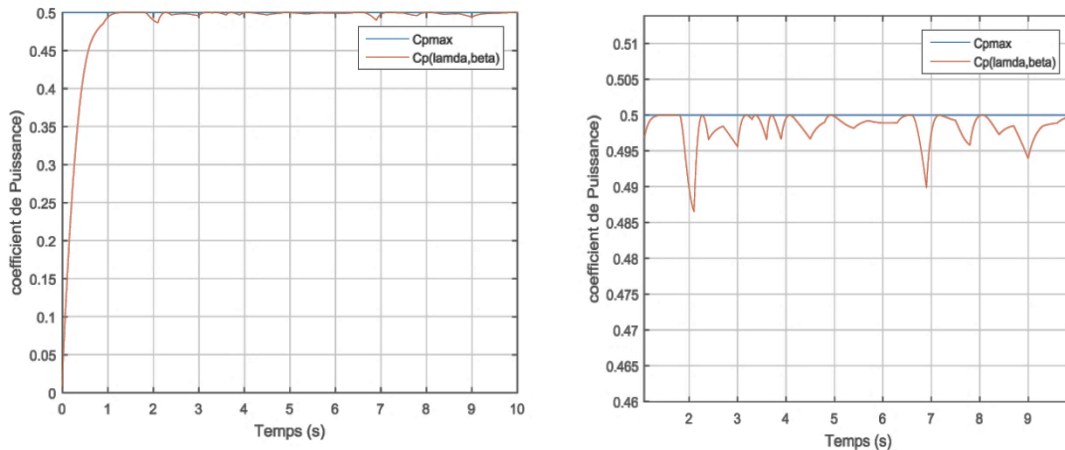


Fig.II.10 : coefficient de puissance de la turbine

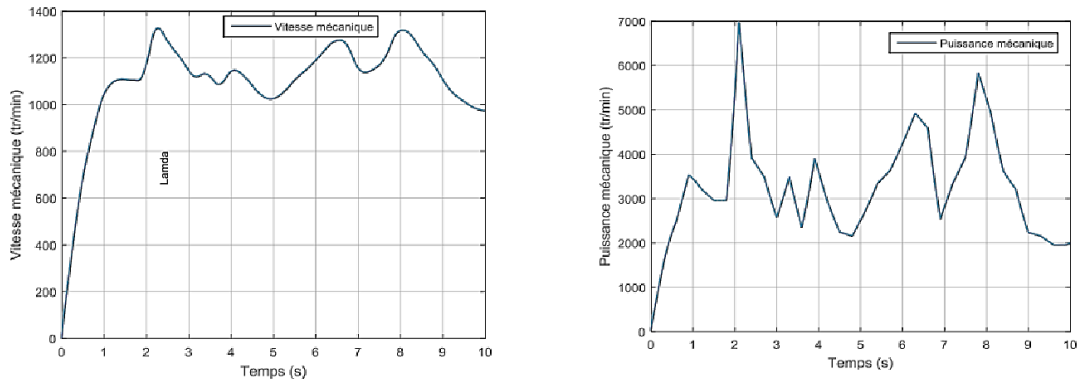


Fig.II.11 : Vitesse mécanique et la puissance mécanique produite par la turbine

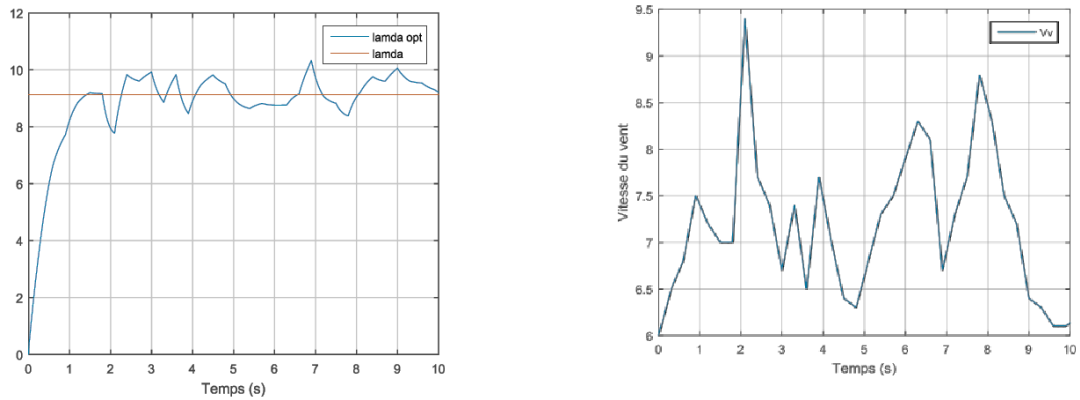


Fig.II.12 : Vitesse spécifique  $\gamma$  et le profil du vent appliqué à la turbine

## II.4.Conclusion :

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pale utilisé. Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations.

# Chapitre III

*Modélisation de la machine  
asynchrone à double  
alimentation  
(Partie électromécanique)*

### III.1 Introduction

La modélisation mathématique est la première étape nécessaire pour étudier la machine asynchrone à double alimentation. Le modèle d-q d'une machine asynchrone est le plus largement utilisé, car il offre de nombreux avantages au niveau de contrôle de la machine asynchrone.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation de la MADA, ce qui contribue en outre à développer la stratégie de la commande pour le convertisseur du côté rotor, ainsi que la modélisation de convertisseur du côté réseau électrique dans un repère d-q en rotation synchrone.

### III.2 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures ; elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation [9].

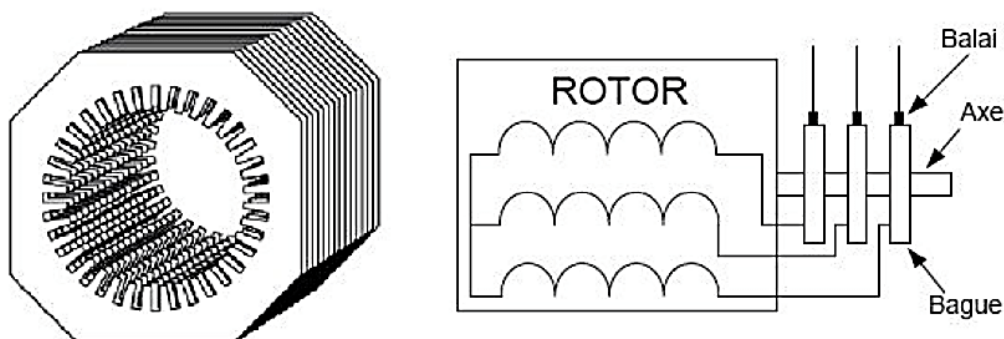


Figure III-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [9].

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général [26].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.

### III.2.1 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant des f.m.m des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi f$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega$  ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f.m.m des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que [9].

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = g\omega_s \quad (\text{III.1})$$

Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

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

Pour que la rotation du vecteur résultant des f.m.m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence, définie à partir de :

$$\omega_{gl} = 2\pi f_r \quad \text{c'est-à-dire} \quad f_{r0} = f g$$

### III.2.2 Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que [17] :

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

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

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

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

### III.3 Modélisation de la machine Asynchrone

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement [23], à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ;

ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres. Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont :

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- La f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La symétrie de construction est parfaite.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [11],

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

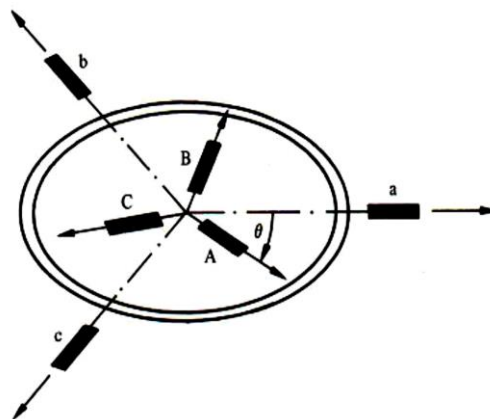


Figure III.2: Représentation des enroulements d'une machine asynchrone [15].

Nous allons procéder à l'établissement des équations mathématiques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone.

### III.3.1 Équations électriques

Elles concernent les tensions triphasées statoriques et rotorique

$$\begin{cases} [v_s] = \frac{d}{dt} [\varphi_s] + R_s [i_s] \\ [v_r] = \frac{d}{dt} [\varphi_r] + R_r [i_r] \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

où les tensions des trois phases statoriques et rotoriques, sont respectivement

$$[v_s] = (v_a, v_b, v_c)^T \quad \text{et} \quad [v_r] = (v_A, v_B, v_C)^T$$

et les vecteurs des courants traversant ces phases sont:

$$[i_s] = (i_a, i_b, i_c)^T \quad \text{et} \quad [i_r] = (i_A, i_B, i_C)^T$$

les vecteurs des flux totalisés traversant les enroulements statoriques et rotoriques sont :

$$[\varphi_s] = (\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c)^T \quad \text{et} \quad [\varphi_r] = (\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C)^T$$

### III.3.2 Équations magnétiques

Les expressions des flux statoriques et rotoriques sous forme matricielle condensée s'écrivent :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [l_{ss}][i_s] + M_{sr} [i_r] \\ [\varphi_r] = [l_{rr}][i_r] + M_{rs} [i_s] \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

avec

$$[l_{ss}] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} ; \quad [l_{rr}] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

où :

$\theta_r$  : Angle entre les phases a dû stator et celle du rotor.

$l_s, (l_r)$  : Inductance propre d'une phase statorique (rotorique).

$M_s, M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotoriques).

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.

### III.3.3 Équation mécanique

Elle exprime la relation entre couple moteur et couple résistant.

$$C_{em} - C_r - f_r \Omega = j \frac{d}{dt} \Omega \quad (\text{III.4})$$

$C_{em}, C_r, f_r, j$  : couple électromagnétique, couple résistant, coefficient de frottement et moment d'inertie, respectivement.

Nous aboutirons ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, d'où la complexité de la résolution analytique. Afin de surmonter cette difficulté, on va considérer les enroulements biphasés équivalents aux enroulements statoriques et rotoriques [5].

### III.3.4 Transformation de Park applique sur la machine asynchrone triphasée

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents. Ainsi les enroulements statoriques  $a, b, c$  sont remplacés par 3 enroulements équivalents  $ds, qs, os$  et les enroulements rotoriques  $A, B, C$  par  $dr, qr, or$  [15]. La matrice de transformation de Park est telle que :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

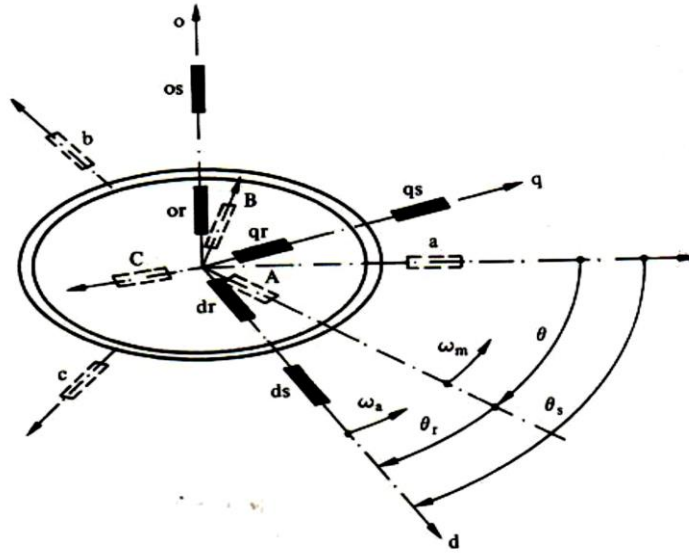


Fig. III.3 - Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents [15].

$\omega_a$  Désigne la vitesse angulaire électrique du système d'axes  $d, q, o$  et  $\omega_m$  celle du rotor.

Les tensions, courants et flux dans le nouveau repère sont définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

### III.3.5 Équations de la machine biphasée équivalente

Pour simplifier la représentation des équations électriques de la machine asynchrone, on a utilisé la transformation de Park, permettant de rendre la matrice impédance indépendante de la variable  $\theta_r$ .

Les équations électriques et magnétiques donnent alors le système suivant :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_S \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_S \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \\ v_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Dans cette équation apparaît une tension nulle au rotor correspondant au court-circuit des enroulements.

et les équations de flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

en posant :

$$\omega_a = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{vitesse de rotation du référentiel.}$$

$$\omega_r = p \cdot \Omega = p \frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{vitesse électrique de rotation du rotor .}$$

$L_s, L_r$  : Inductances propres cycliques du stator et du rotor respectivement

M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

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

### III.3.6 Définition des différents référentiels

Le référentiel est le système (d, q) associé à la rotation  $\omega_a$ . Dans notre cas, nous allons adopter un seul référentiel pour le rotor et le stator. Il existe trois possibilités de référentiels dans la pratique :

- Référentiel fixe par rapport au stator : il se traduit par la condition :  $\omega_a = 0$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Le référentiel fixe est intéressant lorsqu'on veut étudier la variation de la fréquence d'alimentation, associée ou non à la variation de la vitesse de rotation.

- Référentiel fixe par rapport au rotor  $\omega_a = \omega_r$ :  
il correspond aux transformations des grandeurs de la machine dans un référentiel tournant à la vitesse du rotor,

$$\begin{cases} v_{ds} = R_S \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_S \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Ce référentiel est particulièrement avantageux dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation du rotor est considérée comme constante, par exemple pour l'étude des contraintes résultant d'un court-circuit.

- Référentiel fixe par rapport au champ tournant  $\omega_a = \omega_s$ :
- il correspond aux transformations des grandeurs de la machine dans un référentiel tournant à la vitesse synchrone,

$$\begin{cases} v_{ds} = R_S \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_S \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine. Il est utilisé dans les problèmes d'alimentation des machines asynchrones par convertisseur statique de fréquence, et lorsqu'on veut étudier la fonction de transfert du moteur par rapport à de petites variations de la vitesse autour d'un régime donné [14].

Le choix se fait en fonction du problème étudié. Parmi les relations que nous venons de présenter, les seules qui soient affectées par le choix du référentiel sont les équations (1.7). Le glissement de la machine ( $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ ) est faible dans les conditions réelles de fonctionnement donc ( $\omega_s \approx \omega_r = \omega$ ). Notre choix c'est porté sur le cas du référentiel fixe par rapport au rotor.

### III.3.7 Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes  $(d, q)$  tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par [16].

$$p_a = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (\text{III.12})$$

En remplaçant les tensions  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  par leurs expressions (I.11) dans (I.12)

$$p_a = \{R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)\} + \left\{i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt}\right\} + \{\omega_s(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\} \quad (\text{III.13})$$

L'expression (III.13) se compose de trois termes

- le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- le second représente la variation de l'énergie électromagnétique ;
- le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $p_{em}$ ).

Sachant que :

$$c_{em} = \frac{p_{em}}{\Omega_s} = p \frac{p_{em}}{\omega_s} \quad (\text{III.14})$$

Alors, l'expression de couple électromagnétique est égale à :

$$c_{em} = P(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant les flux  $(\varphi_{ds}, \varphi_{qs})$  donnés par la relation (III.8) dans la relation (III.15) on obtient :

$$c_{em} = PM(i_{ds}i_{qs} - i_{qs}i_{ds}) \quad (\text{III.16})$$

En substituant les courants rotoriques par leurs expressions (III.8) :

$$c_{em} = \frac{PM}{l_r} (\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \quad (\text{III.17})$$

### III.4 Modélisation d'alimentation de la MADA

Après avoir étudié la machine asynchrone a double alimentation a rotor bobiné dans la première partie de ce chapitre il suffit maintenant de trouver la structure de commande pour la chaîne de conversion.

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines de rotor, ce dernier qui est contrôlé par une technique de modulation de large impulsion (MLI) permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension. Donc on doit utiliser la commande de la MADA par un seul onduleur.

#### III.4.1 La chaîne de conversion

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un filtre passe bas et d'un onduleur à *IGBTs* alors que le stator est relié directement à la source triphasé. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique.

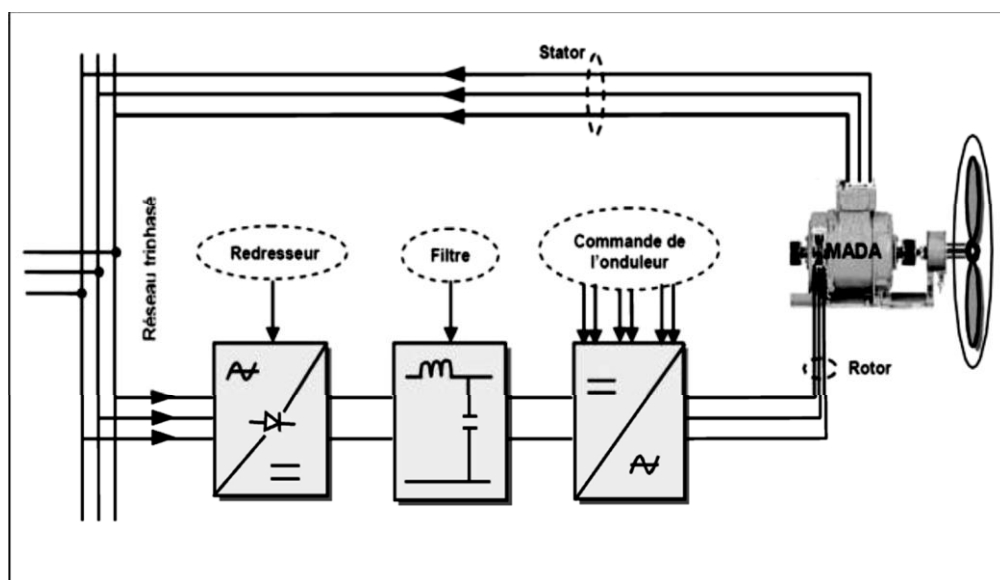


Figure III-4 : Schéma synoptique de fonctionnement en génératrice de la MADA [9].

Les caractéristiques exigées de l'actionneur électrique dépendent à la fois de la machine, de son alimentation et de la commande des convertisseurs de fréquence. Ces caractéristiques sont :

- Un couple avec le minimum d'ondulation possible, contrôlable par le plus petit nombre de variable, en régime dynamique comme en régime permanent [9].
- Une large plage de variation de vitesse.
- Des constantes de temps électriques et mécanique faibles.
- La source d'alimentation triphasée est supposée symétrique, de fréquence et d'amplitude constante.

### III.4.1.1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur utilisé est un redresseur triphasé double alternance à diodes. La figure représente son schéma de principe, il est composé de trois diodes **D1**, **D2**, **D3** à cathode commune chacune conduit lorsque le potentiel de son anode est le plus positif, et de trois diodes **D4**, **D5**, **D6** à anode commune, chacune conduit lorsque le potentiel de sa cathode est le plus négatif assurant ainsi le retour de courant  $i_d(t)$ .

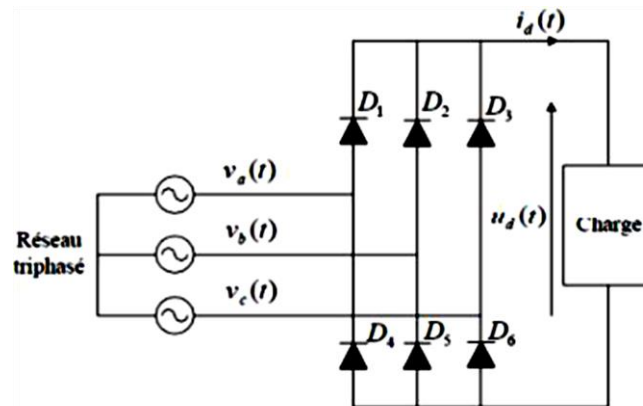


Figure III-5 : Représentation du redresseur triphasé à diodes [11].

Le redresseur est alimenté par un système de tension triphasé exprimé par :

$$v_a(t) = v_m \sin(2\pi ft)$$

$$v_b(t) = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_c(t) = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right)$$

La valeur instantanée de la tension redressée est donnée par :

$$u_d(t) = \text{Max}(v_a(t), v_b(t), v_c(t)) - \text{Min}(v_a(t), v_b(t), v_c(t))$$

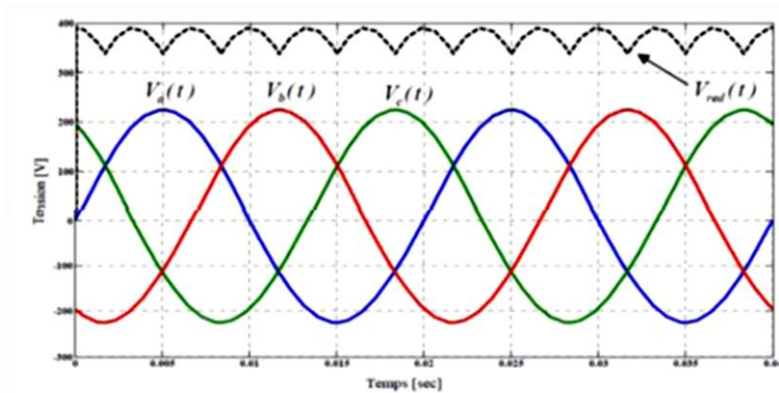


Figure III-6 : Représentation de la tension de sortie du redresseur [11].

La tension redressée présente un taux d'ondulations. Pour réduire ces ondulations il faut placer un filtre passe bas entre le redresseur et l'onduleur.

### III.4.1.2 Modélisation du filtre

Le rôle de ce circuit est de réduire le taux d'ondulations de la tension redressée. La

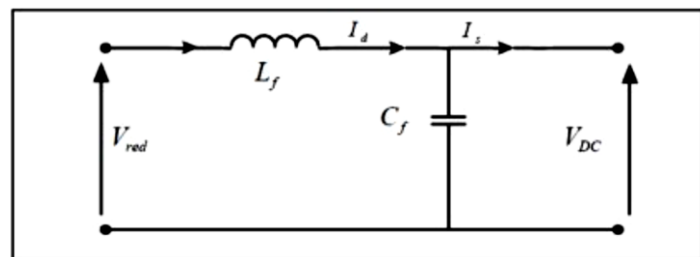


Figure III-7 : Représentation du filtre passe –bas

### III.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs

d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [9].

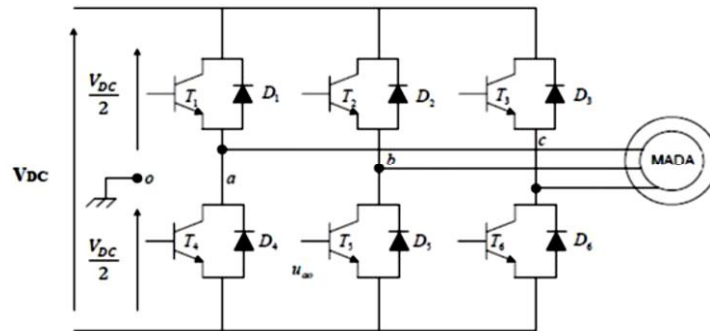


Figure III-8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits.

Les trois tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « O ».

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} &= V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} &= V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

Soit n le point neutre du côté de la MADA, alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} V_{ao} &= V_{an} - V_{no} \\ V_{bo} &= V_{bn} - V_{no} \\ V_{co} &= V_{cn} - V_{no} \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

et comme le système est supposé en équilibre, c'est-à-dire :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

alors :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

On obtient finalement les expressions des tensions simples de la machine :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3}(2V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \\ V_b &= \frac{1}{3}(2V_{bo} + V_{ao} + V_{co}) \\ V_c &= \frac{1}{3}(2V_{co} + V_{bo} + V_{ao}) \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

### III.4.3 Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec le porteur (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquence entre la porteur triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulations sont nombreuses, les plus utilisées sont ; la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

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

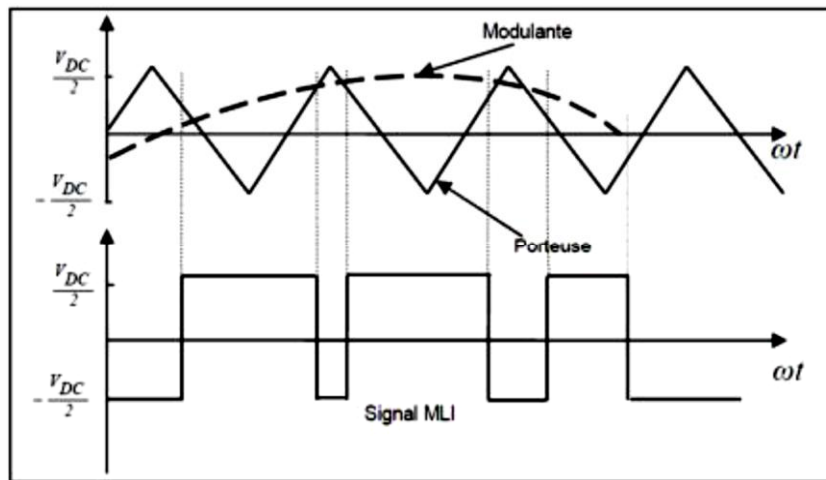


Figure III-9 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

### III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, On remarque également que la majorité des sujets traités concernent le fonctionnement générateur avec une visée sur les applications éoliennes puis à l'étude la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés.

Dans la dernière partie nous avons présenté le modèle de la chaîne de conversion, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

# Chapitre IV

*Commande de la MADA  
pour la régulation des  
puissances*

## IV.1. Introduction

Les qualités de la machine à courant continu, résumées essentiellement dans le découplage naturel entre le flux et le couple, ont fait de cette machine et pendant longtemps, le meilleur moyen utilisé dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Cependant, la présence du collecteur mécanique dont est dotée la machine à courant continu limite son emploi à des domaines où la vitesse et la puissance sont relativement réduites. Cette limitation a contraint les chercheurs à la remplacer par la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné en effet, la machine à induction est de construction simple, robuste, supporte les surcharges et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux [21]. Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle.

Cette dernière a été proposée en 1971 par Blashke [21]. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Ou bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

## IV.2. Principe de la commande vectorielle

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la (Fig. IV.1).

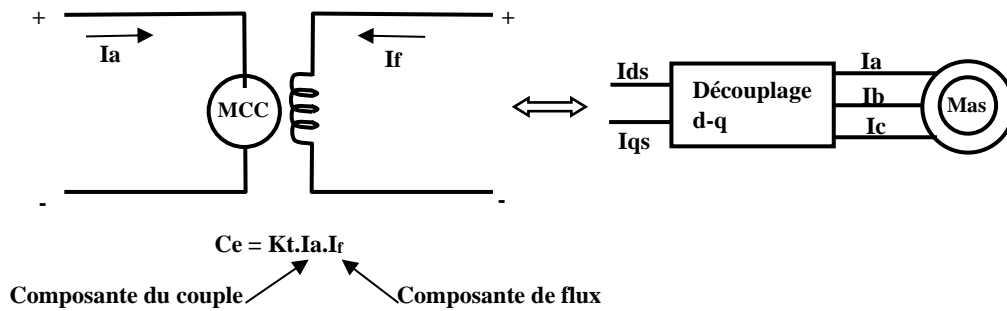


Fig.IV.1 Analogie avec le moteur à courant continu

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle de moteurs électriques, mais en revenant au phénomène physique, cela nous ramène à une notion élémentaire, mais très importante de l'électromagnétisme à savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Appliquée aux moteurs électriques, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courant et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif ; par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs. [21].

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans ce travail, il sera exposé le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA. Ainsi, comme il est montré dans la (Fig. IV.2), le flux sera callé sur l'axe d et la tension du stator sur l'axe q, cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié.

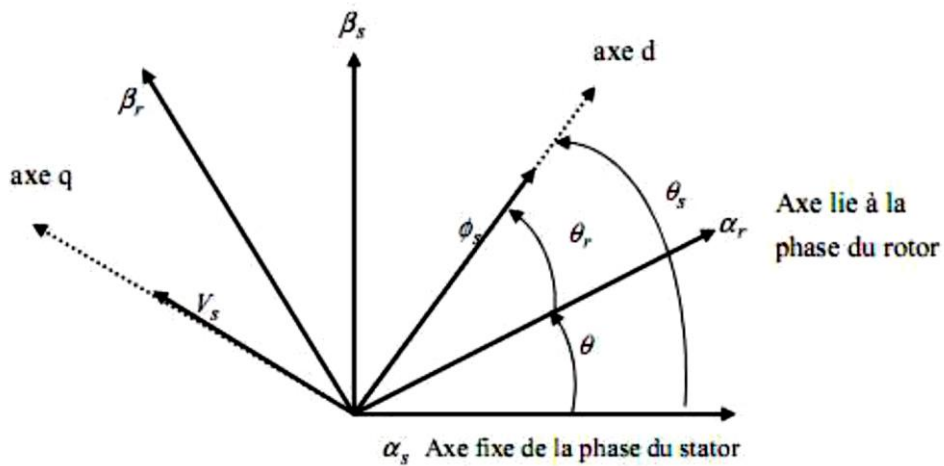


Fig. IV.2 Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Rappelons que l'expression du couple électromagnétique est donnée par :

- Couple électromagnétique de la machine à courant continu

$$C_{em} = K \cdot \phi_f i_s \quad (IV.1)$$

- Couple électromagnétique de la MADA que nous allons examiner :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd} \quad (IV.2)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\varphi_s = \varphi_{ds} \quad \rightarrow \quad \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi_{sd} i_{sq} \quad (\text{IV.4})$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant, ce qui est l'objectif de la commande vectorielle.

### IV.3. Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [23]

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

Avec un flux statorique constant et orienté ( $\varphi_s = \varphi_{ds} \rightarrow \varphi_{qs} = 0$ )

Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante [24] :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

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 [21] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{V_s}{\omega_s} i_{sq} \quad (\text{IV.11})$$

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique.

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotorique imposés par l'onduleur.

### IV.3.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques

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

$$P_S = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \quad (IV.12)$$

$$Q_S = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \quad (IV.13)$$

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

$$P_S = V_{qs}I_{qs} \quad (IV.14)$$

$$Q_S = V_{qs}I_{ds} \quad (IV.15)$$

Les puissances active  $P_S$  et réactive  $Q_S$  sont donc fonction des courants statoriques  $I_{qs}$  et  $I_{ds}$  respectivement, sur lesquels nous n'avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotorique et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_s}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (IV.16)$$

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

$$\begin{cases} P_S = -\frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_S = -\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (IV.17)$$

Il ressort de l'expression (IV.17) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe  $q$ , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe  $d$  à une constante près  $\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$  imposée par le réseau.

#### IV.4 Expressions des tensions rotoriques :

A partir du système d'équation (IV.17) les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.18})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (IV.9) on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

A partir des systèmes d'équations (IV.18) et (IV.19) nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc figure (IV.3) [22] [20].

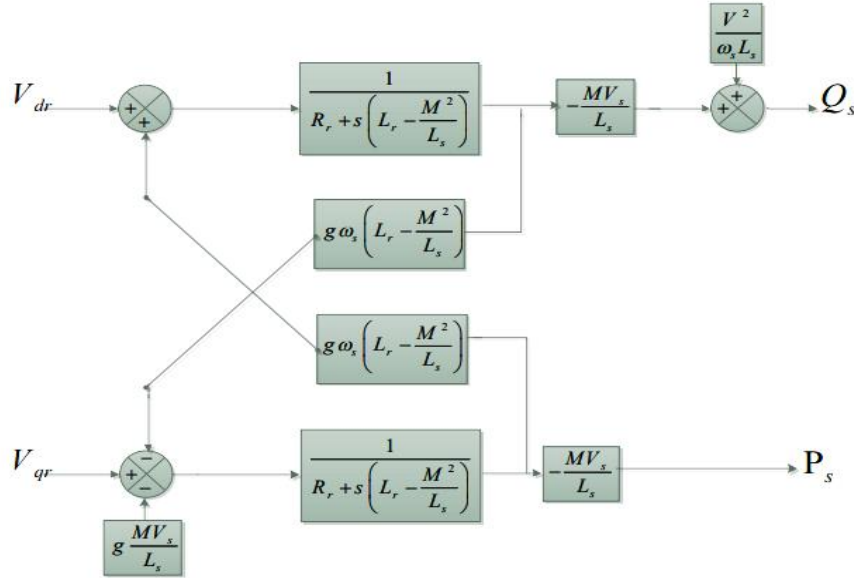


Figure IV.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé

indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe  $q$  rotorique et la puissance active pour l'axe  $d$  rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

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.

#### IV.5 Contrôle indépendant des puissances active et réactive :

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références [22,19].

##### IV.5.1 Commande directe :

Si l'on observe les équations (IV.18), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme  $\frac{Mv_s}{L_s}$ . De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système d'équations (IV.19), disparaissent en régime permanent.

Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g\omega_s \frac{Mv_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.20)$$

$v_{dr}$  et  $v_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'effet du terme de

couplage  $g w_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$  est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme  $g \frac{M v_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure IV.4)

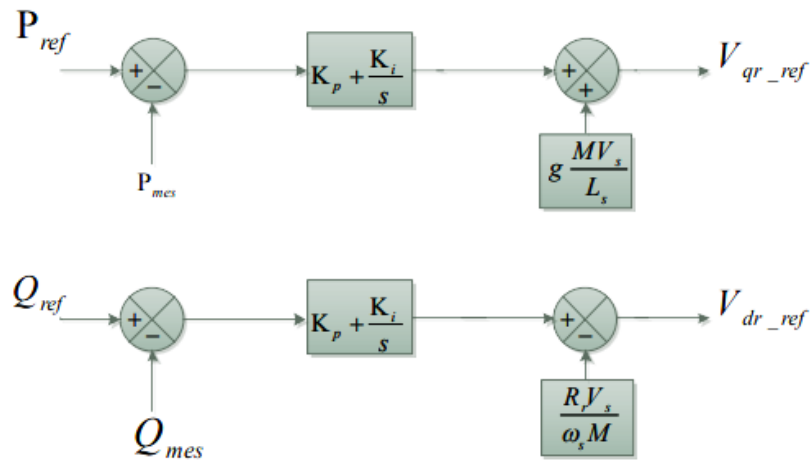


Figure (IV.4) : Schéma bloc de la commande directe

## IV.5.2 Commande indirecte :

### IV.5.2.1 Commande en boucle ouvert :

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.

$$\begin{cases} i_{qr\_ref} = \frac{L_s}{M v_s} P_{s\_ref} \\ i_{dr\_ref} = -\frac{L_s}{M v_s} Q_{s\_ref} + \frac{v_s}{M \omega_s} \end{cases} \quad (IV.21)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc (figure IV.5)

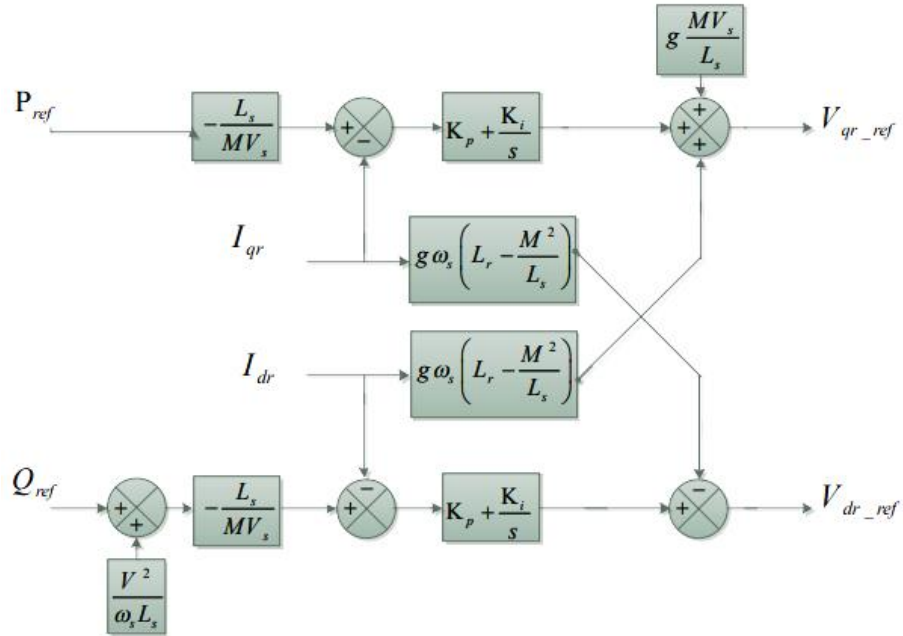


Fig.IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

#### IV.5.2.2 Commande en boucle fermé :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure IV.6

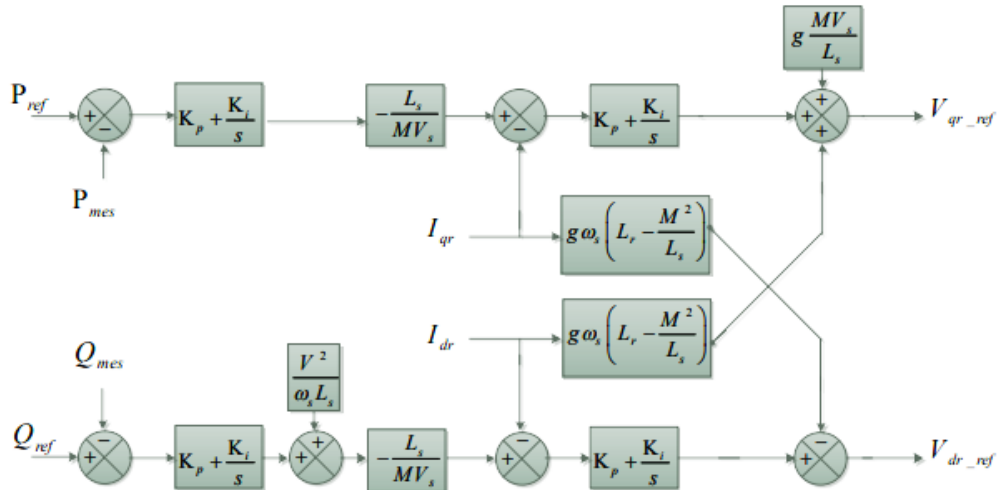


Fig.IV.6: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l’asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l’utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans l’annexe.

#### IV.6.Résultats de Simulation

Ce paragraphe va permettre d’analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse (vérification de découplage) avec un démarrage à vide puis avec application d’une puissance active  $P_s = -3.5 \text{ KW}$  entre  $t = 1\text{s}$  et  $t = 2\text{s}$  et une puissance réactive  $Q_s = 2\text{Kvar}$  entre  $t = 3\text{s}$  et  $t = 4\text{s}$ , la machine est entraînée à une vitesse fixe  $N = 1425 \text{ tr/min}$ .

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA.

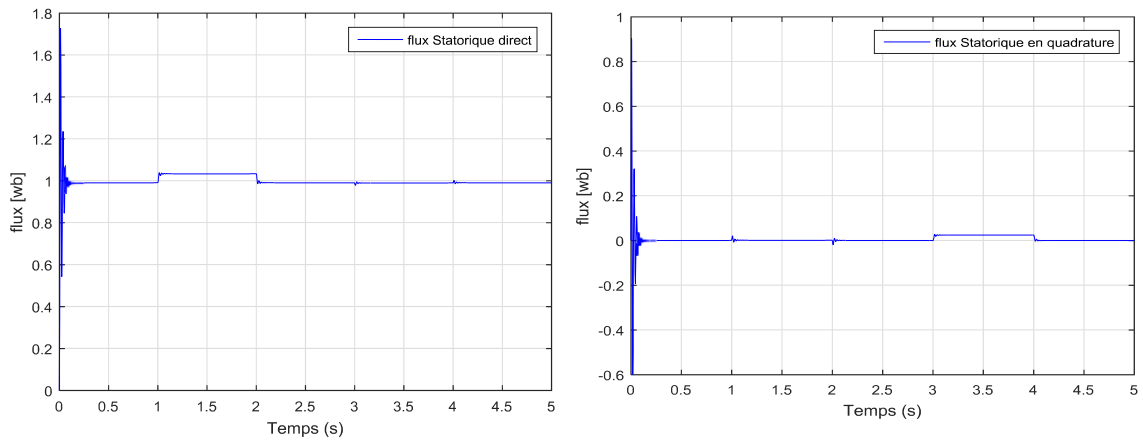


Fig.IV.7 : Les composantes du flux statorique.

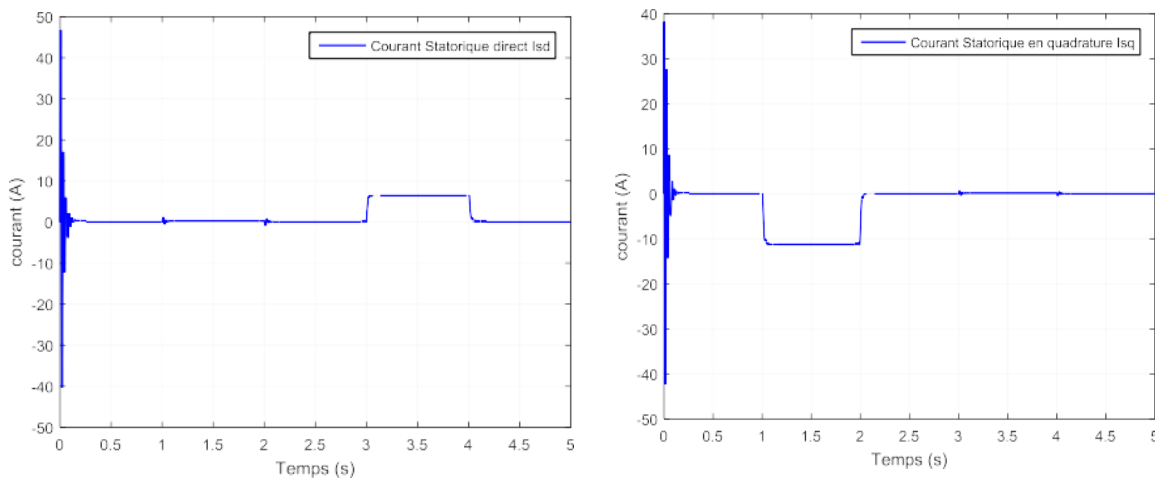


Fig.IV.8 : Les composantes du courant statoriques.

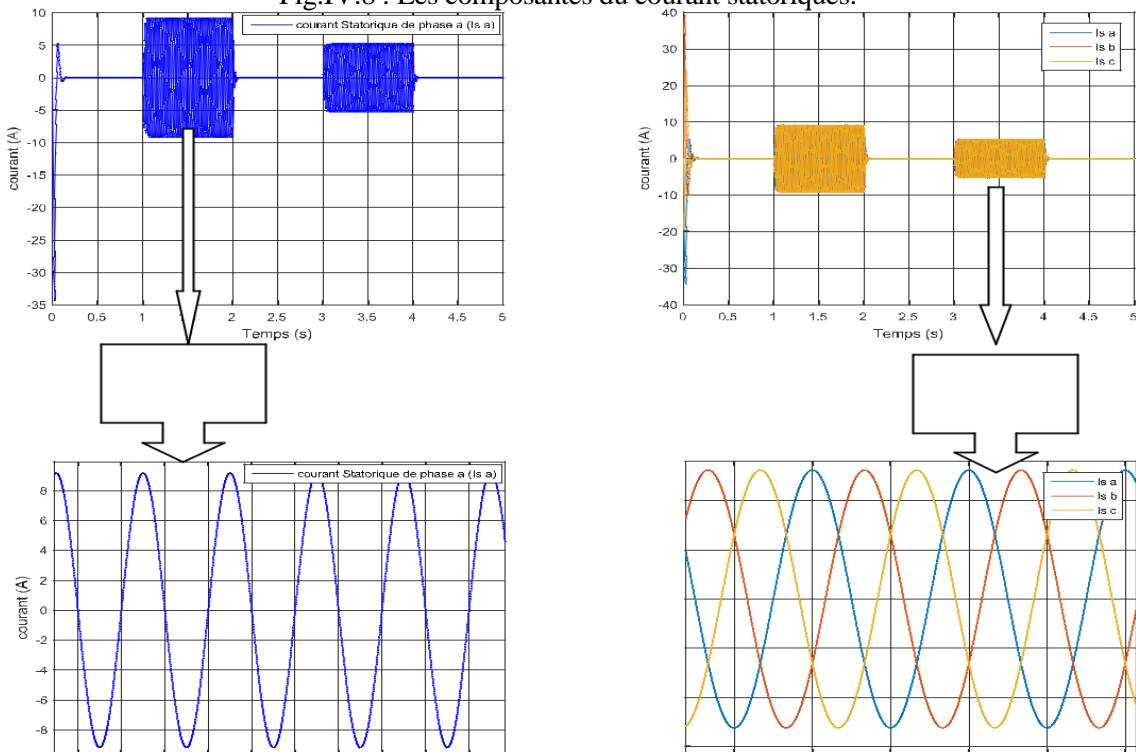


Fig.IV.9 : Courants statorique avec zoom

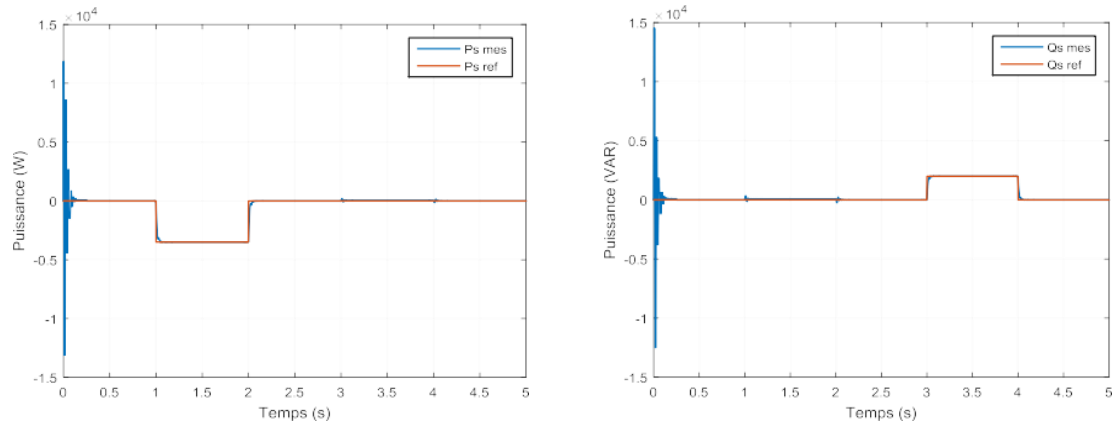


Fig.IV.10 : La puissance active et réactive statorique.

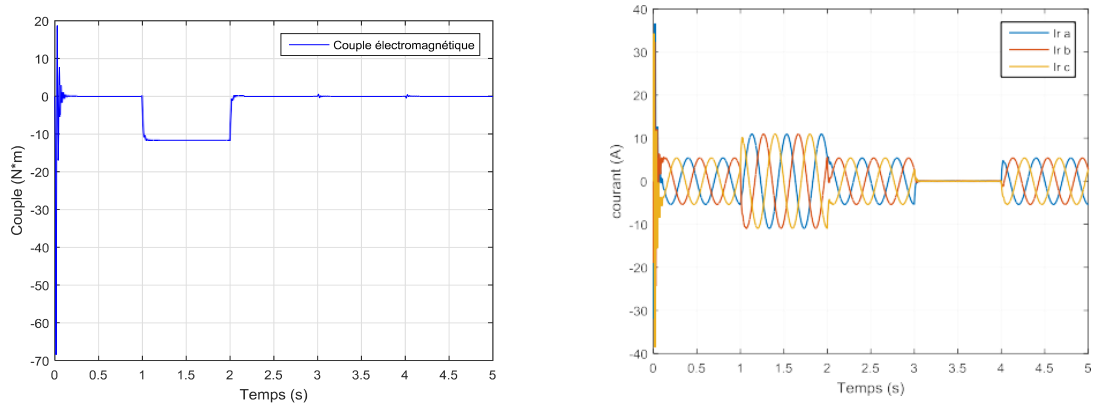


Fig.IV.11 : Le couple électromagnétique et les courants rotoriques

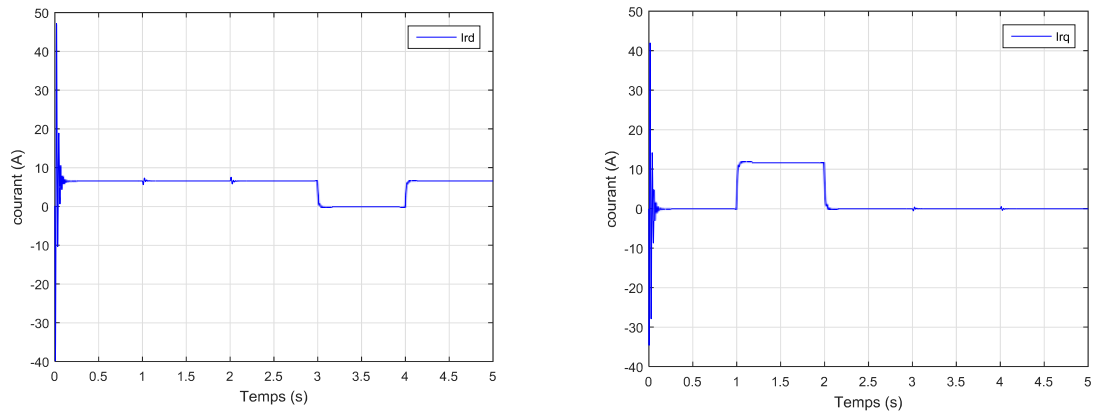


Fig.IV.12 : courant direct et quadrature rotoriques.

#### IV.6.1. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant

rotorique contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

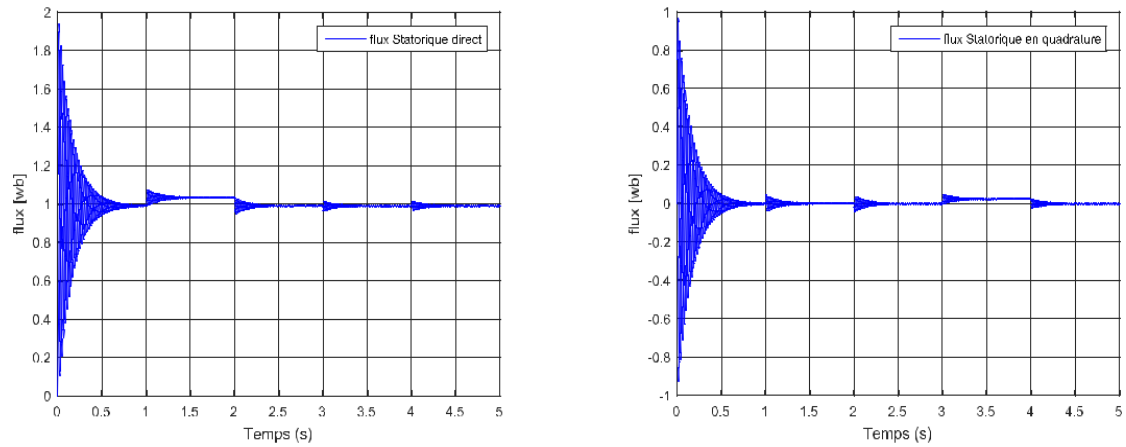


Fig.IV.15 : Les composantes du flux statorique

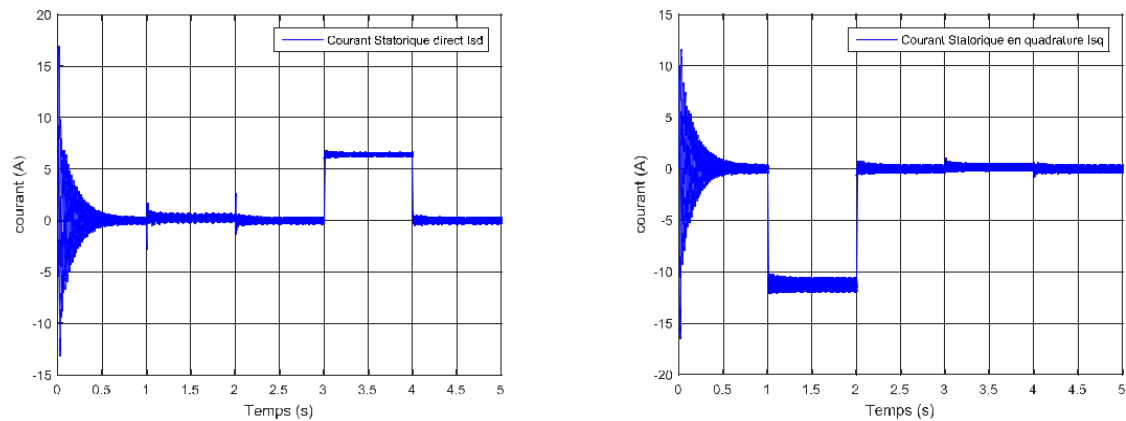


Fig.IV.16 : Les composantes du courant statorique.

#### IV.6.2. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA+ Onduleur) contrôlé par des régulateur PI. , De ce fait, nous reteindrons la commande indirecte pour la suite de nos travaux. Les résultats présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

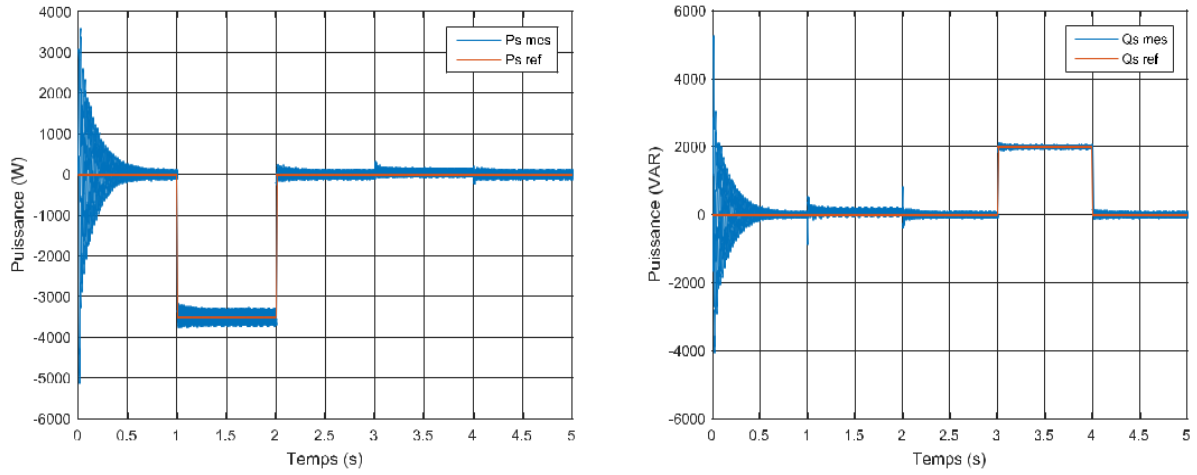


Fig.IV.17 : La puissance active et réactive statorique.

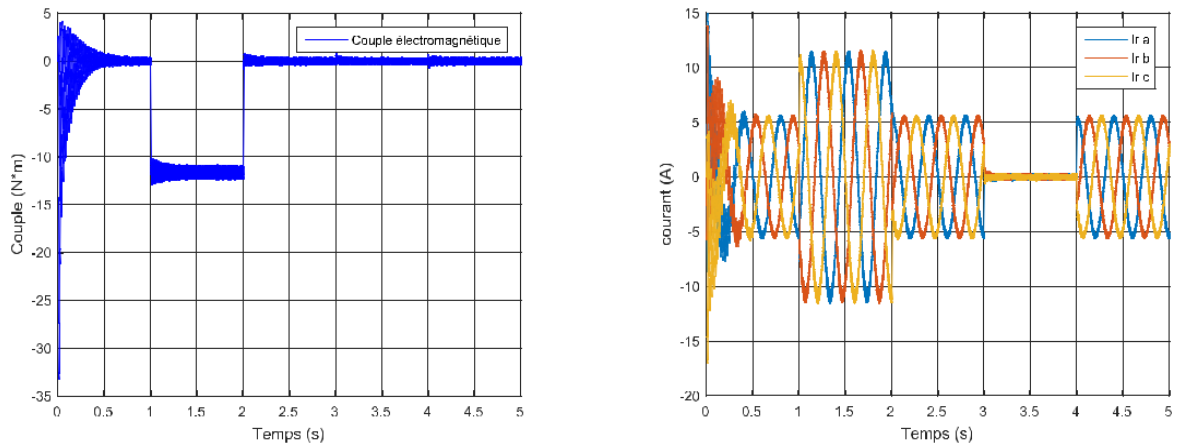


Fig.IV.18 : Le couple électromagnétique et les courants rotorique.

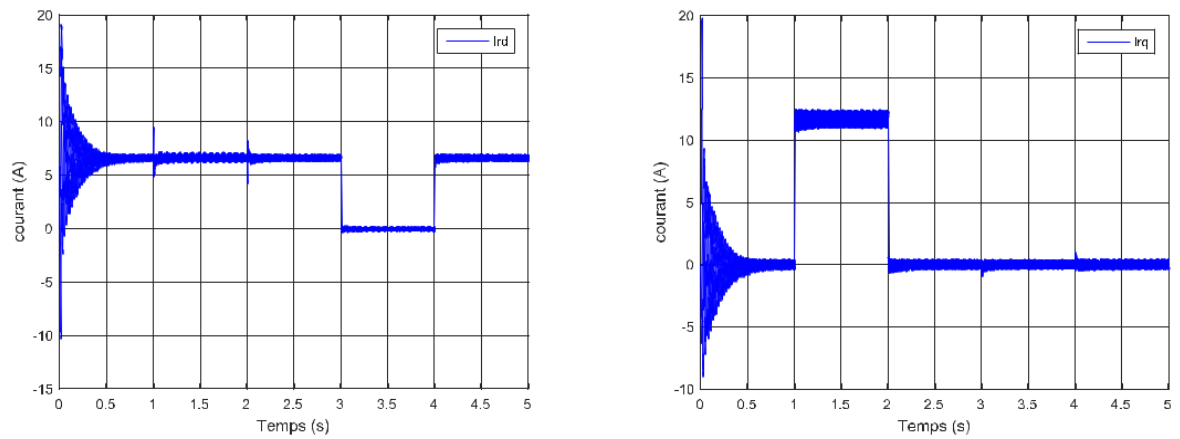


Fig.IV.20 : courant direct et quadrature rotoriques.

#### **IV.7.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la loi de la commande vectorielle par orientation du flux statorique pour découpler le flux et le couple dans le but de contrôler séparément les puissances actives et réactives fournies au réseau. Puis nous avons présenté la commande de la machine asynchrone double alimentation alimentée par un onduleur de tension à MLI. Il s'agit fondamentalement de définir la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande en vue d'asservir indépendamment les puissances, statoriques, active et réactive en fonction des courants rotoriques direct et en quadrature. Les résultats obtenus par simulation nous montrent que le système répond positivement à ce test, les puissances suivent leurs références, on remarque aussi que le réglage à l'aide de régulateurs PI permet d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes.

## *Conclusion générale*

---

## Conclusion Générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. En effet les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. 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. 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.

L'objectif de notre travail consistait en l'élaboration d'une étude sur la production d'énergie éolienne. L'étude est basée sur la modélisation, la commande et le contrôle des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation,

On a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes, et ces composants avec leurs définitions, aussi la loi aérodynamique de Betz et la variation de la puissance extraite du vent en fonction de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent.

La partie mécanique de la chaîne de conversion étudiée est vent et turbine éolienne qui sont le sujet du deuxième chapitre.

Nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnant en génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la Complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Ainsi, la modélisation et les résultats de simulation de la MADA ont été présentés et discutés.

Dernièrement est réservé au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude

---

théorique dans laquelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotorique afin d'envisager un pilotage de la machine par le rotor au moyen d'un onduleur à deux niveaux. Suivant la prise en compte des couplages entre les axes ou non, trois méthodes ont été considérées. La comparaison des résultats de simulation de ces trois méthodes en termes de suivi de consigne et de robustesse a permis de dévoiler la méthode qui sera retenue.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] Abderrahim TELLI « Etude et Commande d'une Eolienne à Vitesse Variable Integree au Reseau MT. » Mémoire De Magister En Electrotechnique d'Université D'ORAN, Algérie, 2012.
- [2] Yacine Abderrahmane BENCHERIF «Modélisation et Commande D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour La Production de l'énergie éolienne» Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique- Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2008.
- [3] Azouz TAMAARAT «Modélisation Et Commande D'un Système De Conversion D'énergie Eolienne A Base D'une MADA» THESE Doctorat De l'Université Biskra, Algérie, 2015.
- [4] Naouel HAMDI «Modélisation Et Commande Des Génératrices Eoliennes» Mémoire de Magister de Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2008.
- [5] [Http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA /aletape](http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA/aletape) html
- [6] Salama et Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille.
- [7] Riyadh ROUABHI « Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne», Mémoire de Magister de l'Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie, 2012.
- [8] R. KASDI et B. HANTAT - «Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connecté au réseau » Mémoire de Master de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2012.
- [9] Mourad GRINE «Etude d'éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA)». Mémoire de Magister en électrotechnique de l'Université de Mostaganem - Algérie, 2011.
- [10] Omar BOUHALI « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse de doctorat- Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [11] MELLOUL Ahmed «Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne.», Mémoire de Magister en Electrotechnique de l'Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie, 2008.
- [12] Zoheir TIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » Mémoire de Magister de l'Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie, 2010.

- [13] Marzouk N. KASBADJI « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ? » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.6-7
- [14] N. AKKARI « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a doublé alimentation » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2010.
- [15] F. POITIERS « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [16] N. ALLAL « Modélisation de la machine Asynchrone triphasée» Document de cours, Faculté de Technologie de Université Laghouat, Algérie, 2019.
- [17] M. BACHANI « Identification paramétrique de la machine asynchrone» Mémoire de Master - Université Mohamed Boudiaf d'Oran, Algérie, 2013.
- [18] R. KASDI et B. HANTAT « Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connecté au réseau » Mémoire de Master de l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, Algérie, 2012.
- [19] A. BOYETTE. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nancy I 2006.
- [20] A. GUASMI.-S. GUELMINE «Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA». Diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, Algérie 2014.
- [21] Cherif BENNOUR « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de magister - Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2012.
- [22] MOKRANE SMAILI « Modélisation et commande d'un aérogénérateur a machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » thèse de doctorat, Université Québec, Canada, 2013.

## Annexe

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

### **Valeurs nominales :**

Puissance nominale :  $P_n = 3kW$

Les tensions statorique et rotorique :  $V_s = \sqrt{2}.220$

La vitesse nominale :  $n_n = 1425tr/min$

Nombre de paires de pôles :  $P = 2$

### **Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Nombre de pale :  $N_p = 3$

Diamètre d'une pale :  $RT = 3m$

Inertie :  $f = 315 kg.m^2$

### **Paramètre :**

Résistance du stator :  $R_s = 1.2 \Omega$

Résistance du rotor :  $R_r = 1.8 \Omega$

Inductance stator :  $L_s = 0.1554 H$

Inductance du rotor :  $L_r = 0.1568 H$

Inductance mutuelle :  $M = 0.15 H$

### **Constantes mécaniques :**

Moment Inertie :  $f = 0.2 kg.m^2$

Coefficient de frottement :  $f = 0.001 N.m.S/rad$