

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 :

**Benfarhat Mohamed Tahar**

**Djekidel Sidi Mohamed Belkaid**

### THEME

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

**Soutenu devant le jury composé de :**

Hadjadj Abdelchafik	Prof	UAT-Laghouat	Président
Bendjedia Bachir	MCA	UAT-Laghouat	Examineur
Nouar Allal	MAA	UAT-Laghouat	Encadreur

*Promotion : sept 2023.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Mes très chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.*

*Mes frères et mes sœurs, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A tous mes amis et mes camarades.*

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*Djekidel Mohamed Belkaid*

# *Dédicace*

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :*

*Mon bien-aimé Muhammad, le Messager de DIEU, que la prière et le salut d'ALLAH soient sur lui.*

*A ma tendre mère que DIEU la protège et à mon très cher père que DIEU lui accorde sa miséricorde.*

*A mes précieuses sœurs.*

*A mon beau-frère : Lakhdar*

*A tous les membres de ma famille.*

*A mes meilleurs amis :*

*Abdessalam, Radwan, Mohammed, Abdessalam, Youcef*

*A tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.*

*Benferhat Mohammed Tahar*

## *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 gentillesse, sa qualité remarquable d'encadrement, pour sa grande disponibilité, sa grande contribution, et pour le temps qu'il a consacré afin de bien mener ce travail de mémoire. Nous avons été nommés Monsieur de vous exprimer nos reconnaissances les plus sincères.*

*Nous remercions également Monsieur Hadjadj Abdechafik 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 Benjedia Bachir, 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 تركيبية 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 بواسطة منظم خطي نسبي تكاملي (PI). يتم تحليل أداء النظام ومقارنته من حيث تتبع التعليمات المرجعية والصلابة وإزالة الاضطرابات.

يتم تشغيل الآلة اللائزمانية ذات التغذية المزدوجة من خلال تطبيق تقنية التحكم الجيبية المثالية على المومج. لتجنب تدهور الشبكة، قمنا بالتحكم في مومج التيار باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة (ت.ع.ن MLI). تمت دراسة أداء المنظومة من خلال دراسة سلوك MADA وهذا بالتأثير على سرعة التوربين لاشتقاق قيمة السرعة التي تتوافق مع نقطة الإنتاج المثلى.

في الجزء الأخير من الدراسة اهتمنا بمساهمة مغنطة الجزء الثابت مقارنة بتلك التي ينتجها التيار الدوار من حيث أداء MADA في إنتاج الطاقة الكهربائية المفعلة والمفاعلة.

وكشفت لنا النتائج أن الآلة اللائزمانية ذات التغذية المزدوجة تؤدي بشكل مميز عملها في إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة طاقة الرياح.

## الكلمات المفتاحية:

آلة غير متزامنة ذات التغذية المزدوجة ، توربينات الرياح ، النمذجة ، مومج ، 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.

# 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>III.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.5 Contrôle vectoriel du MADA à l'aide d'un convertisseur AC/DC/AC</b> .....	<b>59</b>
<b>IV.5.1.Opération de connexion au réseau</b> .....	<b>59</b>
IV.5.1.1. Boucle ouvert de contrôle du courant de base .....	59
IV.5.1.2. Boucle de contrôle de puissance et de vitesse .....	60
<b>IV.6 Résultats de Simulation</b> .....	<b>61</b>
<b>IV.6.1. Paramètre et grandeurs de la MADA</b> .....	<b>61</b>
<b>IV.6.2. Schéma bloc de la simulation</b> .....	<b>62</b>
<b>IV.6.3. Interprétation des résultats</b> .....	<b>62</b>
IV.6.3.1. Analyse des grandeurs électromécaniques du générateur MADA .....	63
IV.6.3.2. Performance en régime permanent de l'éolienne basée sur MADA .....	67
<b>IV.7 Conclusion</b> .....	<b>70</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>71</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>73</b>

# *Introduction générale*

# Introduction générale

Aujourd'hui, l'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus les scientifiques, en raison de la protection de l'environnement. Ils estiment que cela est la solution parfaite pour éviter la pollution qui cause d'énormes problèmes à tous les êtres vivants. L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables les plus utilisées.

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.

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.

L'objectif de ce travail est de présenter la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne.

Dans le premier chapitre, qu'est une étude bibliographique, nous allons présenter les différents éléments d'une éolienne à savoir la partie mécanique, la partie électrique et la partie commande. Nous avons commencé par la définition de l'énergie éolienne et les types d'aérogénérateurs. Puis nous avons mis en exergue les inconvénients et avantages de l'énergie éolienne. Nous avons abordé la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, à vitesse fixe et à vitesse variable.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation de la turbine qui représente la partie mécanique de l'éolienne. Nous avons présenté les principes de base de l'interaction entre les pâles 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. Nous avons conclu ce chapitre en présentant les résultats de simulation.

Dans le troisième chapitre nous avons abordé la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation qui représente la partie électromécanique de l'éolienne. Dans ce chapitre, nous nous sommes penchés sur la modélisation de la MADA en établissant les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement de la machine, (équations électriques, équations magnétiques et équations mécaniques). Nous sommes ensuite passés à la modélisation de l'alimentation de la MADA commençant par la chaîne de conversion qui contient la modélisation du redresseur triphasé à diodes et la modélisation du filtre, puis la modélisation de l'onduleur triphasé.

Dans le quatrième chapitre quatre, nous avons présenté la partie commande de la MADA pour la régulation des puissances.

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le principe de la commande vectorielle ensuite nous avons montré le modèle de la MADA à flux statorique orienté jusqu'à ce que nous écrivions après les expressions des puissances actives et réactive statoriques puis les expressions des tensions rotoriques Nous avons ensuite expliqué le contrôle indépendant des puissances active et réactive, commande directe et commande indirecte (commande en boucle ouvert et commande en boucle fermé)). Nous concluons ce chapitre en présentant les résultats de Simulation et l'Interprétation des résultats.

# 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 [1].

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 [2].

## 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[3].

Savonius-Rotor

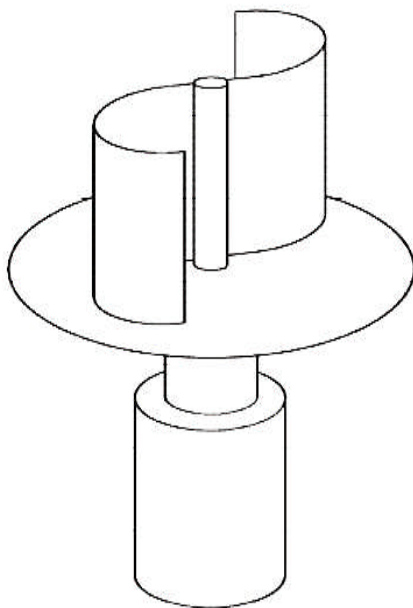


Fig.I.1 : Structure de Savonius [3].

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.

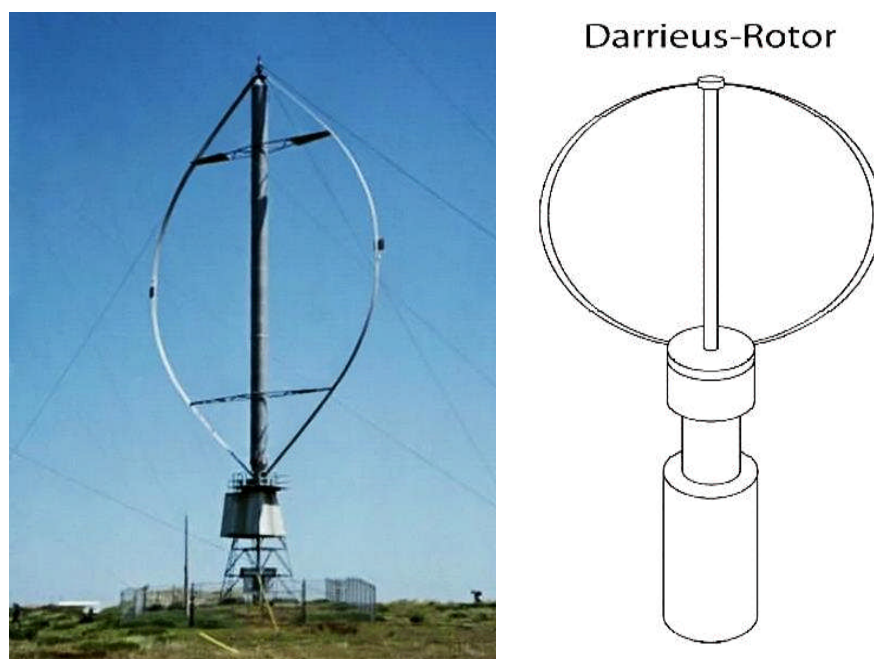


Fig.I.2 : Structure de Darrieus.

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 [4].**

- **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 [4] :

- **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.

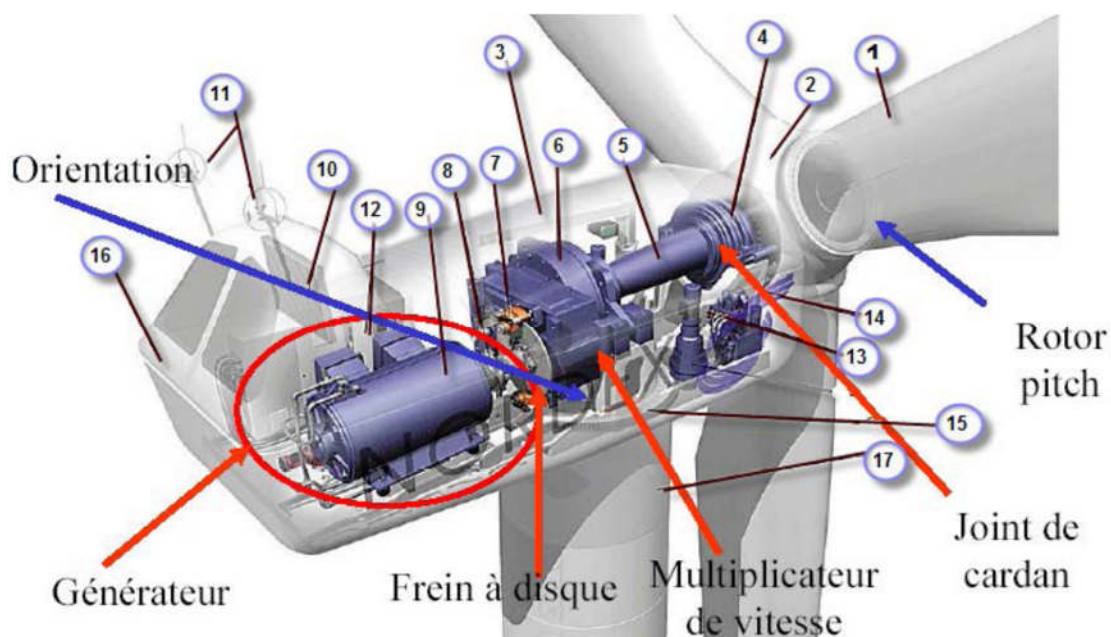


Fig.I.4 représente les différents composants d'une éolienne [1].

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  $V_2$  » [1].

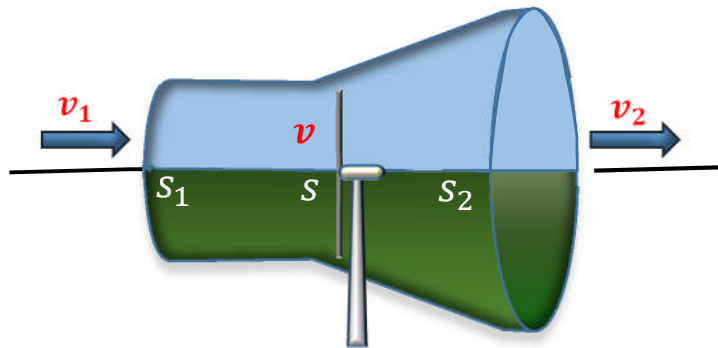


Fig.I.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [1].

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

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

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

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

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

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

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 :

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

En déduit : 
$$V = (v_1 + v_2)/2 \tag{I.5}$$

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

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

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] :

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

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 :

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

Ce coefficient présent 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  $\gamma$

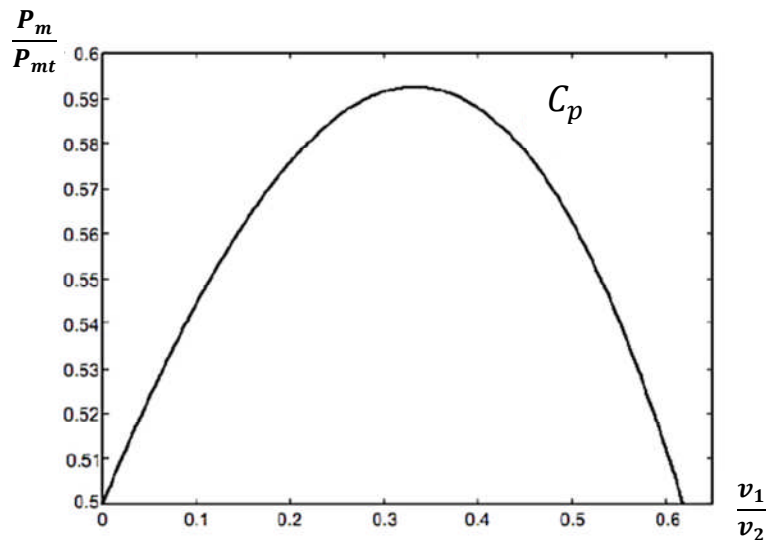


Fig.I.6 : Variations du coefficient de puissance [2].

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 [2].

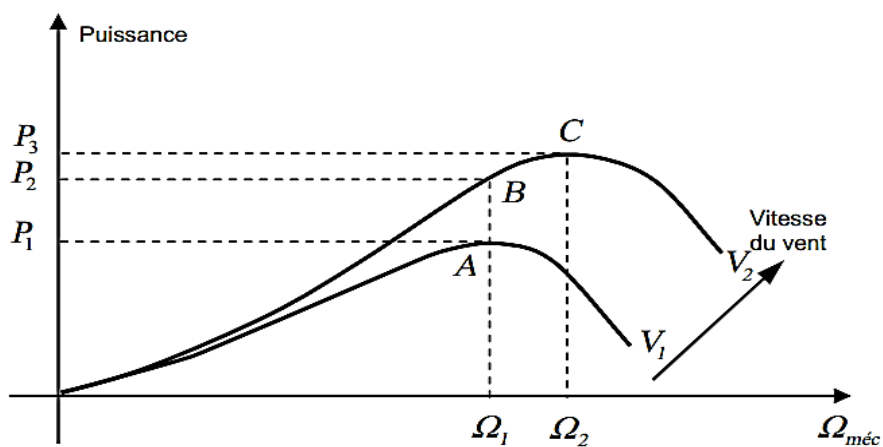


Fig.I.7 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.

## 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.

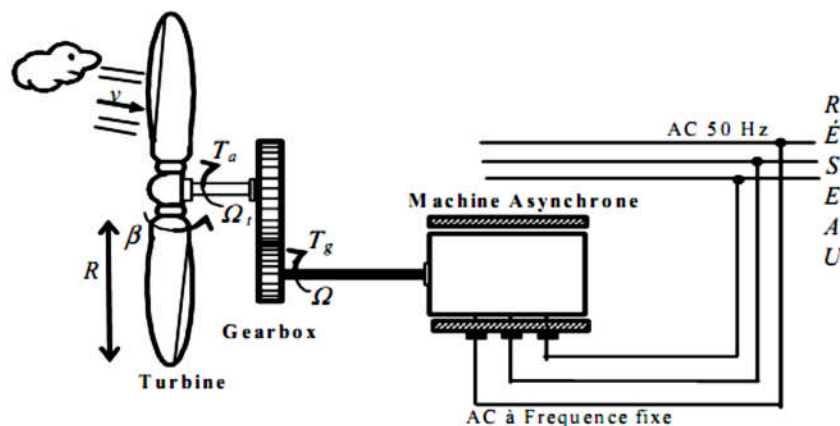


Fig.I.8 : Aérogénérateur à vitesse fixe

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 [5].

#### ❖ 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 maximas 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) [6].

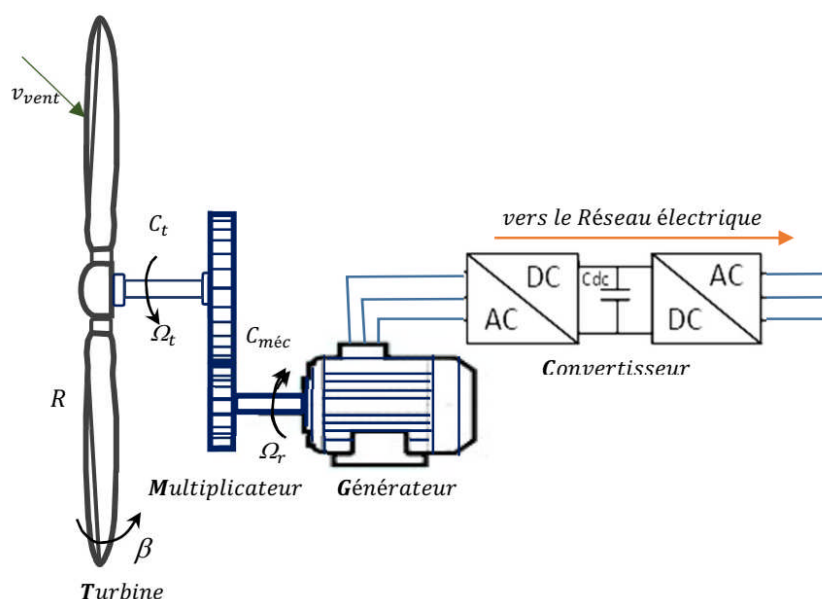


Fig.I.9 : Aérogénérateur à vitesse variable [7].

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 [2][3].

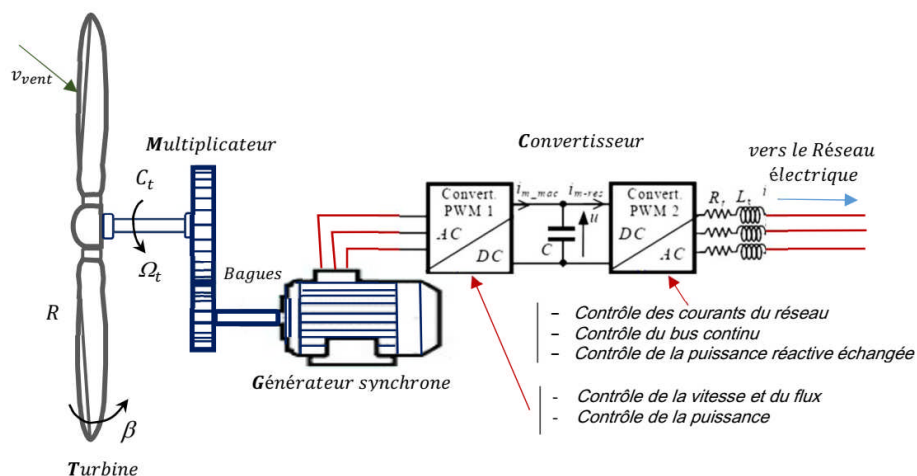


Fig.I.10 : alternateur dans au chaîne de conversion éolienne [7].

## 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 [5].

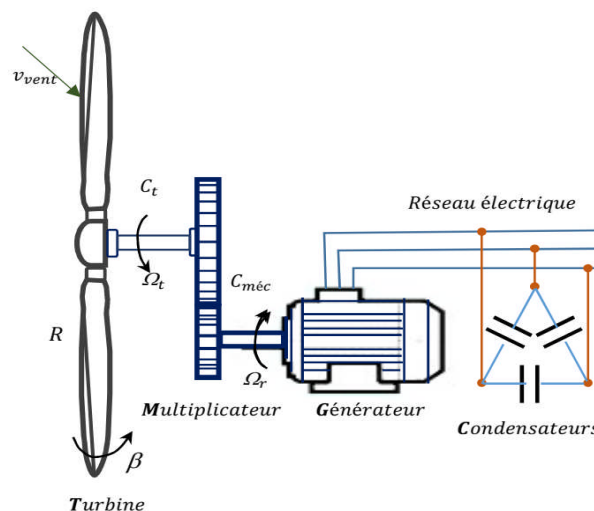


Fig.I.11 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne [7]

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.

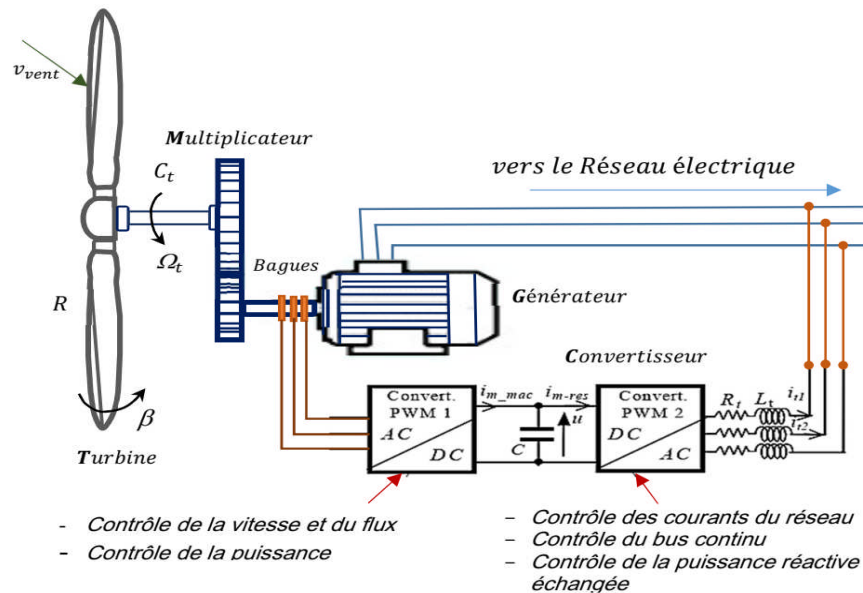


Fig.I.12 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne [7]

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 harmonique

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 utilisés 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 l'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 [8].

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 [9]. 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.

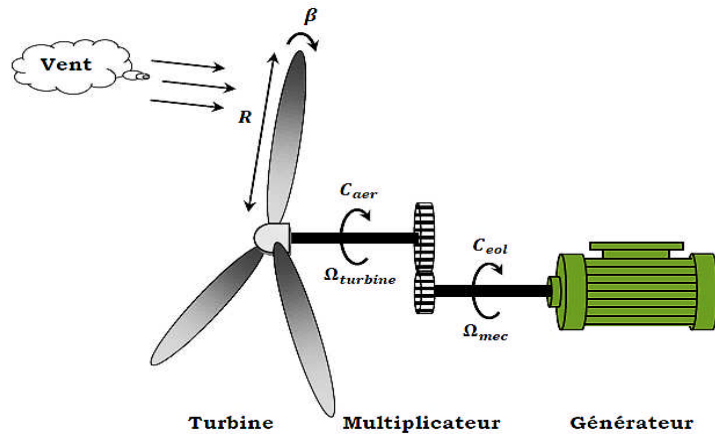


Fig.II.1- Schéma de la turbine éolienne.

$J_t$  : 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, [10].

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 [11].

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 [10] :

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

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 :

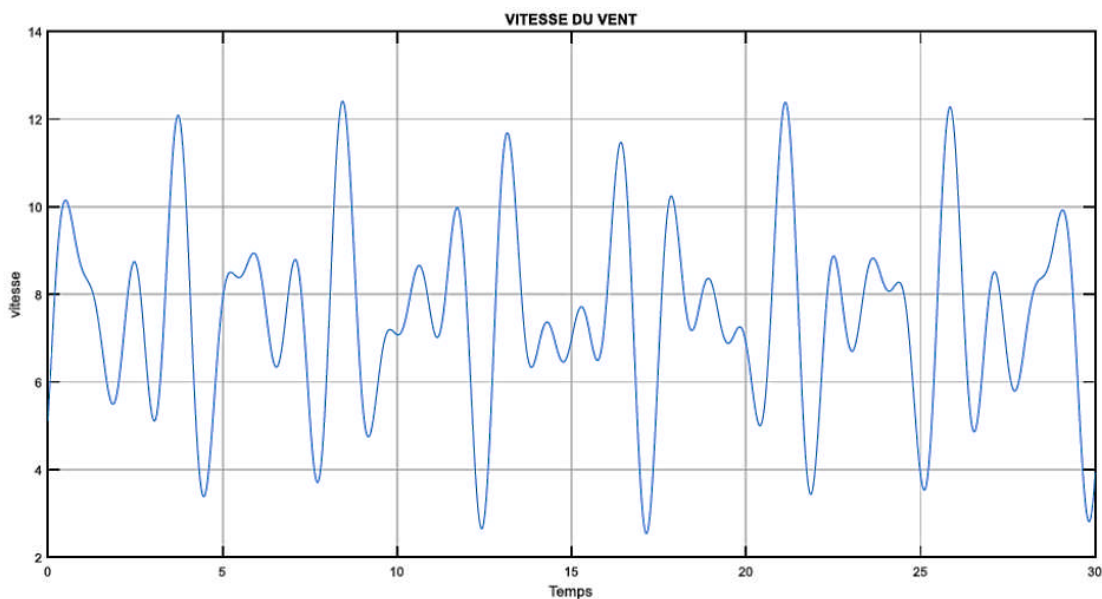


Fig.II.2 : Profil du vent appliqué à la turbine [11].

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à des mesures effectuées par EDF sur le site du canal des dunes [10].

### II.2.3. Modèle du disque actif, [12] :

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 :

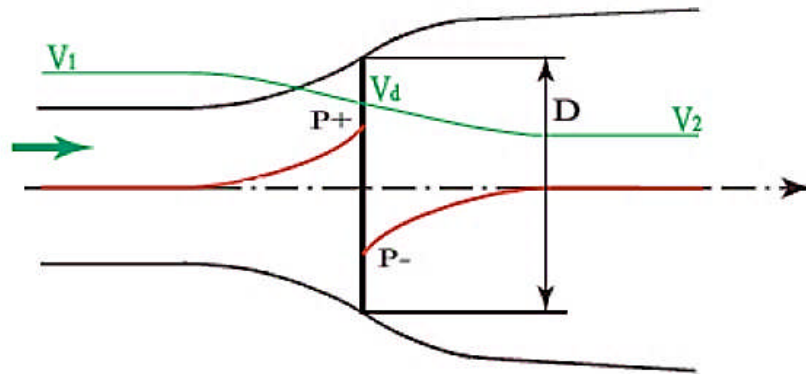


Fig.II.3 - Modélisation du rotor éolien par un disque actif, [13].

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 [12].

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, [12].

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

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, [12] :

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, [12].

### 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 [12] :

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

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, [13].

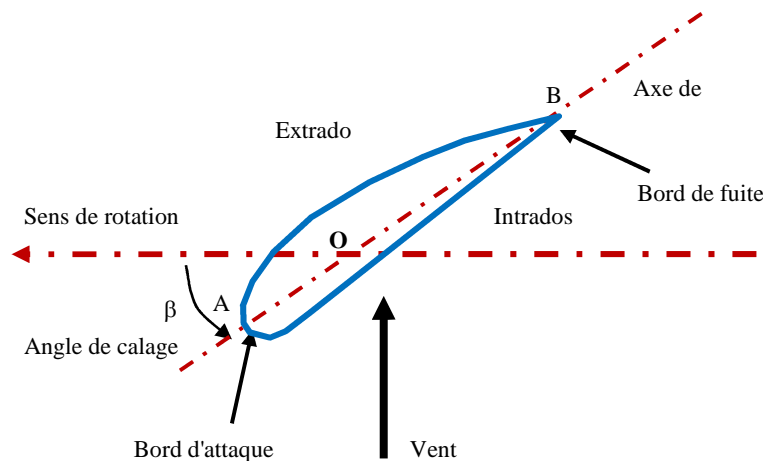


Fig.II.4 - Éléments caractéristiques d'une pale, [14].

On remarque plus particulièrement les éléments suivants, [12] :

- Extrados : dessus de la pale
- Intrados : dessous de la pale.

- Corde 1 : 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) .

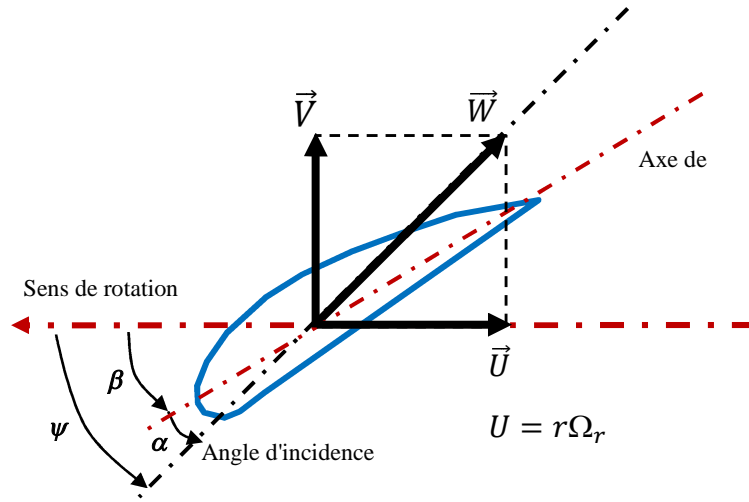


Fig.II.5 - direction du vent sur un tronçon de pale [14].

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  $\Omega_{a\acute{e}r}$ , [14].

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

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  $d\vec{F}$  :

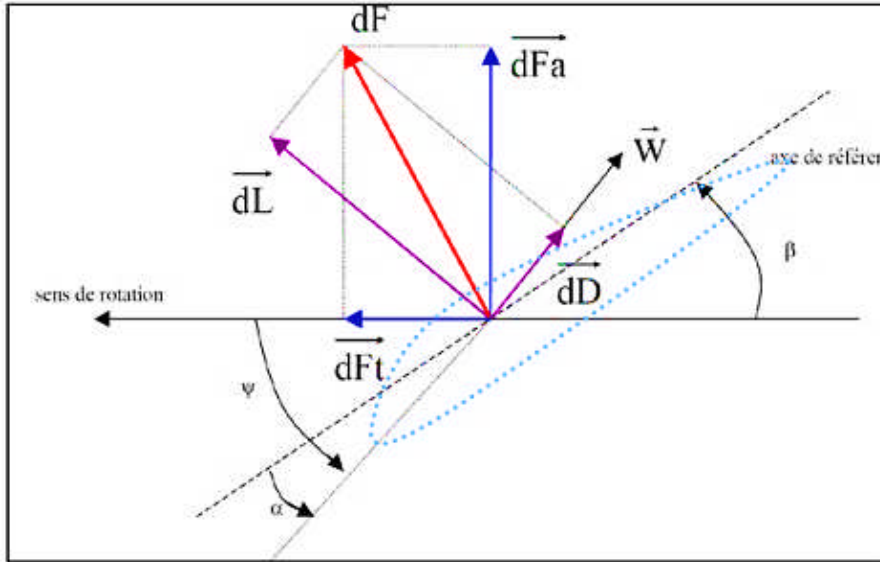


Fig.II.6 - Forces appliquées sur un élément de pale, [14].

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 traînée  $\vec{D}$ , parallèle à la direction du vent.
- La poussée axiale  $\vec{F}_a$ , 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 traînée à partir du schéma précédent, [14] :

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

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

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  $G$  [15].

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] :

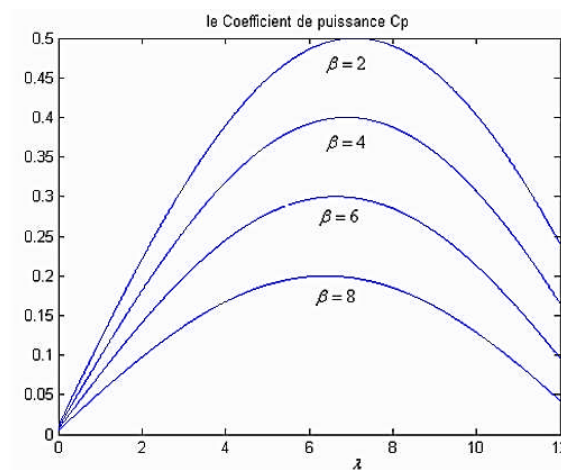


Fig.II.7 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine [16] :

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  $J_g$  [12].

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

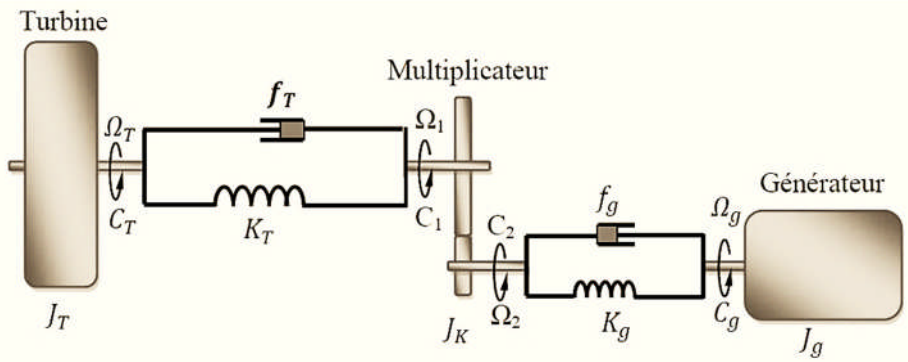


Fig.II.8 - Modèle de la turbine [11]

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  $C_{mec}$  appliqué au rotor, [12] :

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

Avec :

$J$  : inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice [ $kg.m^{-2}$ ].

$C_{mec}$  : 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

Le couple issu du multiplicateur  $C_g$  :

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

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

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

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

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

$C_t, C_g$  : 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 :

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

d'où, l'équation mécanique devienne :

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

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

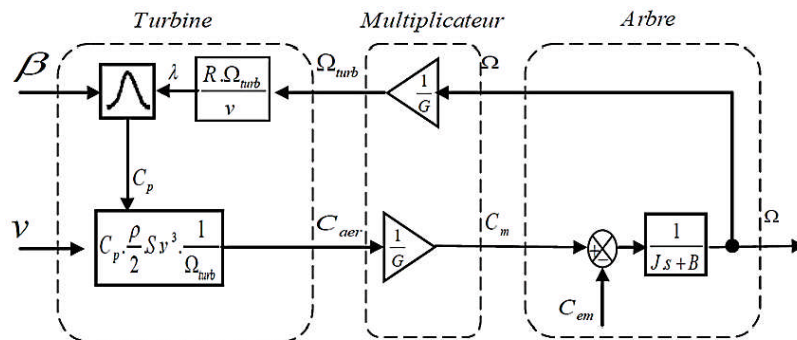


Fig.II.9 : Schéma bloc du modèle de la turbine [16].

**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.

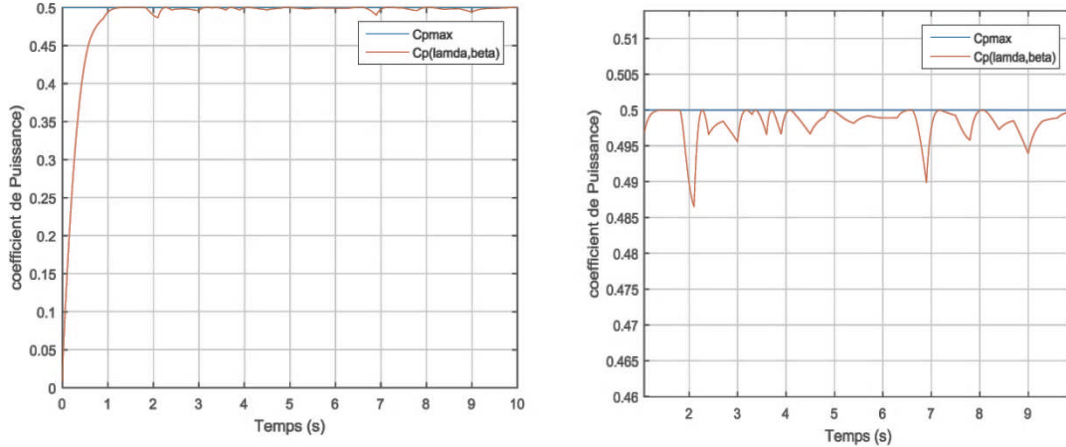


Fig.II.10 : coefficient de puissance de la turbine

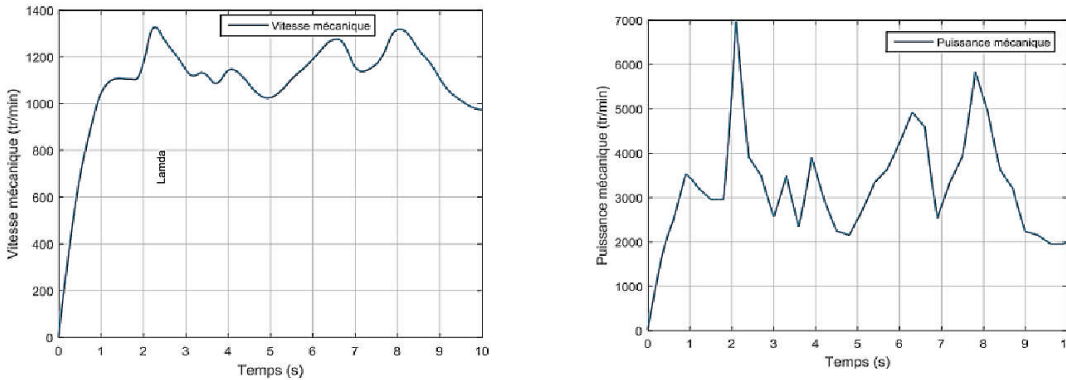


Fig.II.11 : Vitesse mécanique et la puissance mécanique produite par la turbine

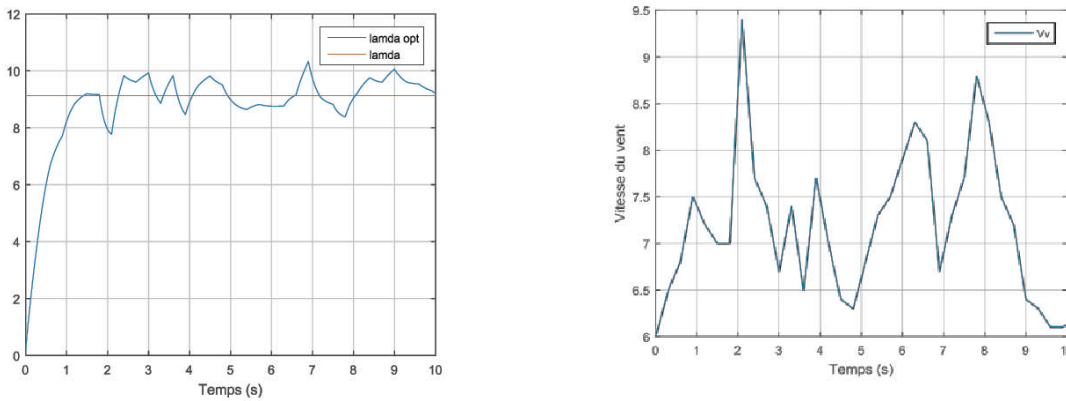


Fig.II.12 : Vitesse spécifique  $\gamma$  et le profil du vent appliqué à la turbine

## **II.4.Concluison :**

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 corner 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 [3].

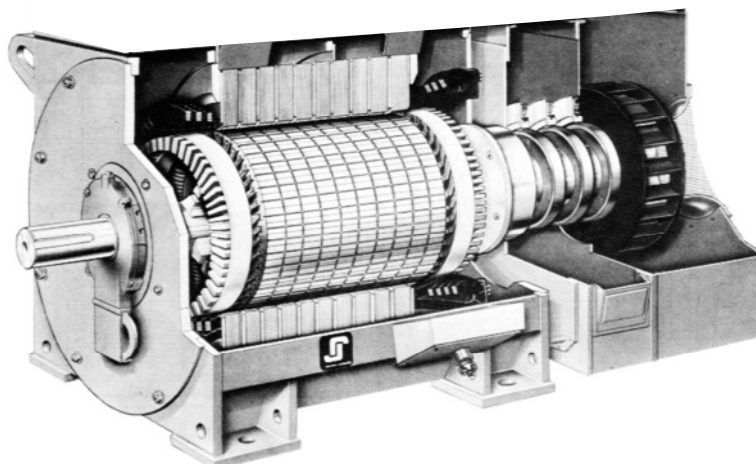


Figure III-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général [17].

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 coté 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 [3].

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

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 :

$$\omega_{gl} = 2\pi f_r \quad \text{ou} \quad f_r = gf$$

### 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 [16] :

- 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 [7], 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 [8],

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

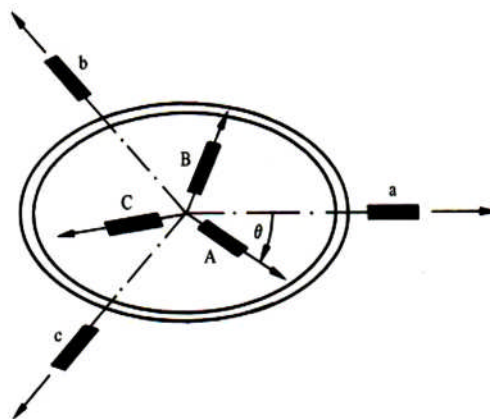


Figure III.2: Représentation des enroulements d'une machine asynchrone [17,18].

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 rotoriques

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

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 sinusoidales 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 [17,18].

### 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  $dr, qr, or$  [17]. La matrice de transformation de Park est telle que :

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

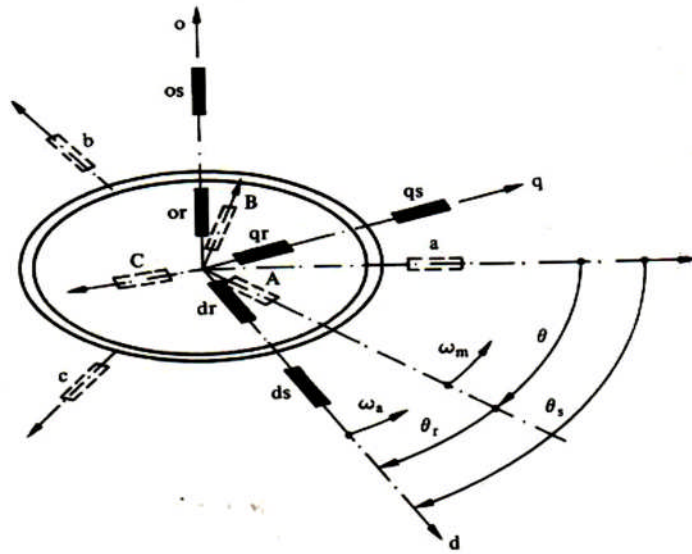


Fig. III.3 - Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents [17].

$\omega_a$  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 :

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

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

$L_s, L_r$  : 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 [17].

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 [17].

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

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.

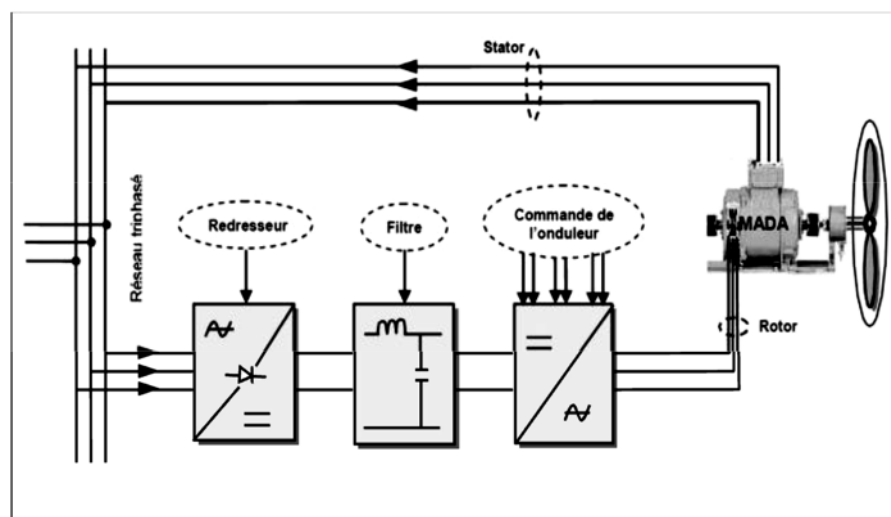


Figure III-4 : Schéma synoptique de fonctionnement en génératrice de la MADA [3].

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 [3].
- 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  $i_d(t)$ .

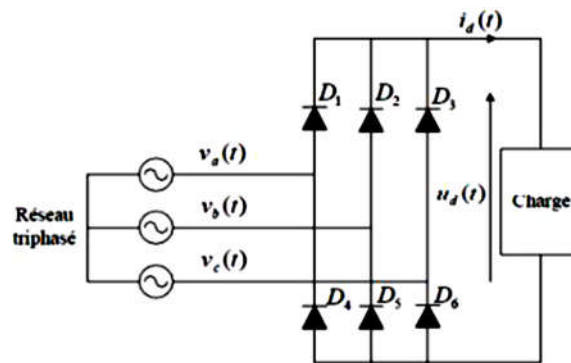


Figure III-5 : Représentation du redresseur triphasé à diodes [8].

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

La valeur instantanée de la tension redressée est donnée par :

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

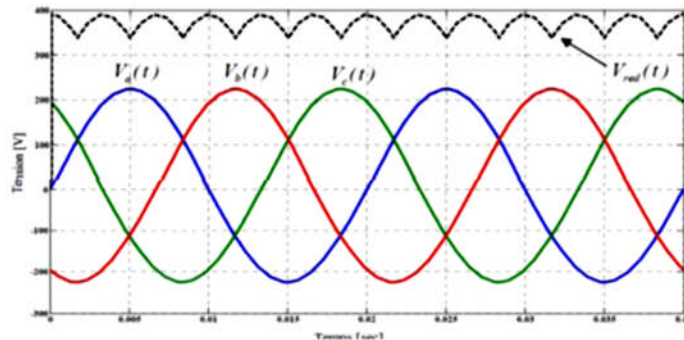


Figure III-6 : Représentation de la tension de sortie du redresseur [8].

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

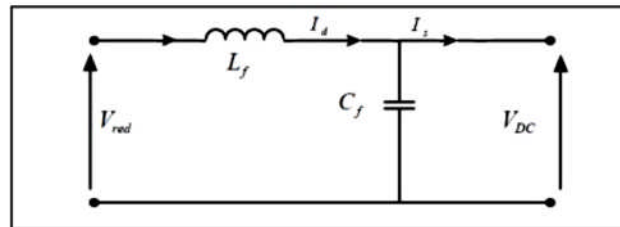


Figure III-7 : Représentation du filtre passe –bas

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{red}(t) = L_f \frac{dI_e(t)}{dt} + V_s(t) \\ \frac{dV_s(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} [I_e(t) - I_s(t)] \end{cases}$$

C'est un filtre du deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

La fonction du transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_s(s)}{V_{red}(s)} = \frac{1}{1 + \sqrt{(L_f C_f)^2}}$$

### 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 [3].

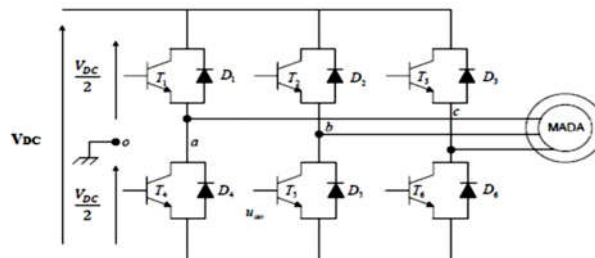


Figure III-8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

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 ».

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

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 porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de 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.

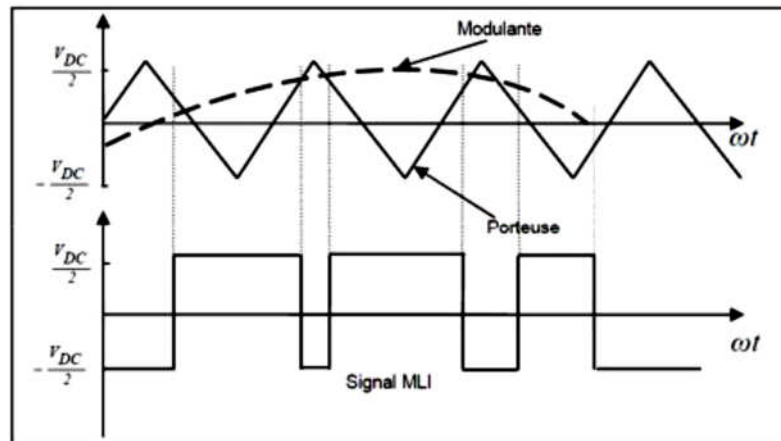


Figure III-9 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

### 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 [16,19]. 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 [19]. 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. Où 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 Fig. IV.1.

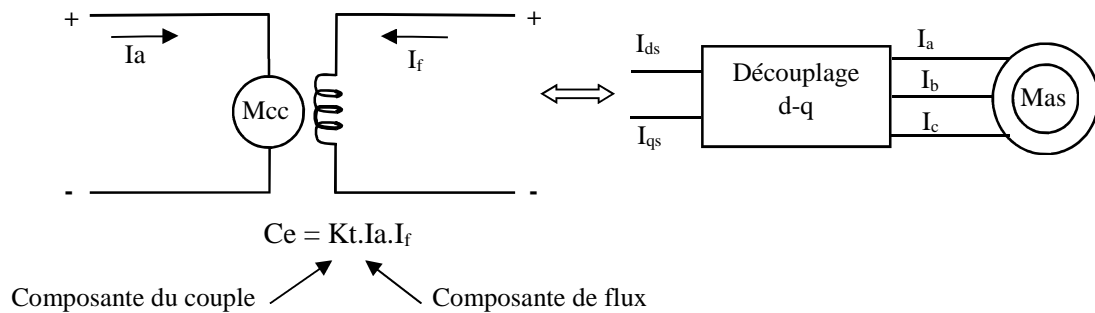


Fig.IV.1 Analogie avec le moteur à courant continu

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. [19].

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.

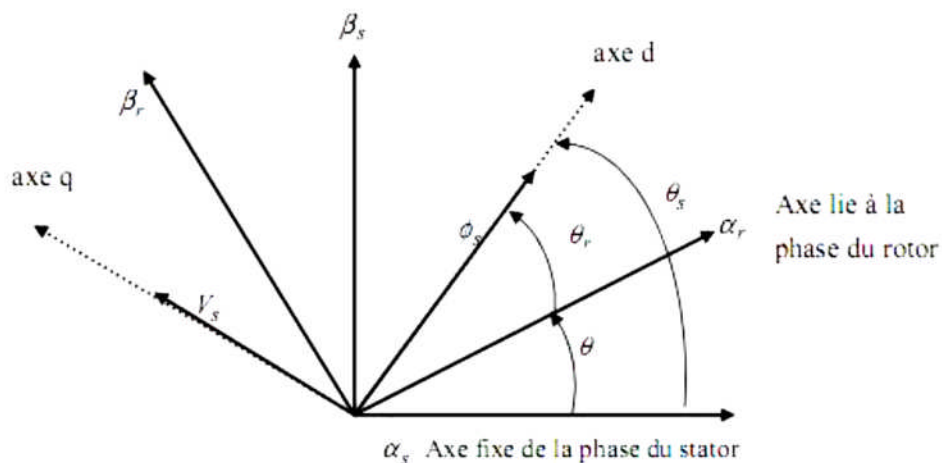


Fig. IV.2 Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

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

- Couple électromagnétique de la machine à courant continu

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

- Couple électromagnétique de la MADA que nous allons examiner :

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

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

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

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. [7]

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 [20, 21,22] :

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

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

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

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

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

$C_{em}$ : 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.5 Contrôle vectoriel du MADA à l'aide d'un convertisseur AC/DC/AC :

### IV.5.1 Opération de connexion au réseau :

Cette section décrit le contrôle du MADA. Il faut distinguer deux scénarios. L'opération de raccordement au réseau et l'exploitation autonome. Les deux configurations présentent des différences de contrôle significatives qui seront décrites. Cependant, seule la commande du convertisseur côté rotor est étudiée dans cette section, en supposant que la tension du bus CC du convertisseur AC/DC/AC est réglée par le convertisseur côté réseau

#### IV.5.1.1 Boucles de contrôle du courant du rotor

Parmi les différentes méthodes alternatives de lutte qui ont été développées pour le MADA, d'abord, par l'étude des boucles de contrôle de courant. Après cela, quelques analyses intéressantes en régime permanent sont développées avant de finalement décrire le contrôle en cas de tension de réseau déséquilibrée.

De manière équivalente aux techniques de contrôle vectoriel classiques [3,4,5] d'autres machines différentes, le contrôle vectoriel du MADA est effectué dans un cadre dq à rotation synchrone, dans lequel l'axe d est aligné, dans ce cas, avec le vecteur spatial de flux statorique

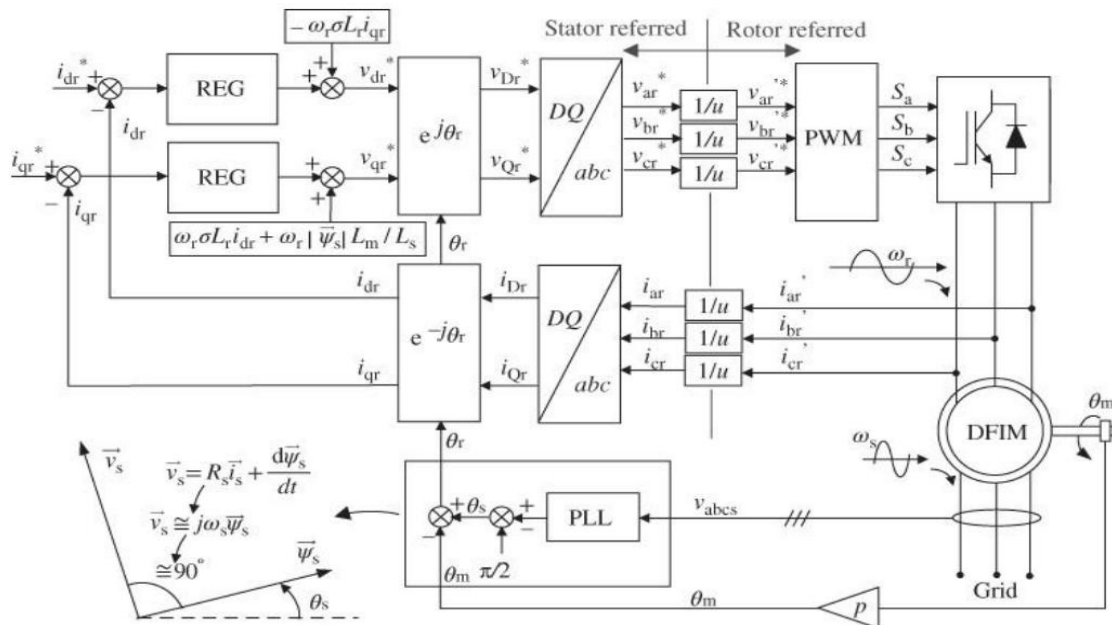


Fig.IV.7 Boucles de contrôle de courant du MADA [23]

Cependant, la figure IV.7 montre qu'en choisissant des régulateurs proportionnels intégraux (PI) égaux pour les deux boucles. En utilisant la compensation des termes croisés et en négligeant l'effet du convertisseur de source de tension et les retards possibles dans le calcul ou les mesures, l'équivalent en boucle fermée, les systèmes des deux boucles de courant sont égaux à un système du second ordre avec deux pôles et un zéro pouvant être placé par contrôle classique, théorie choisissant les gains appropriés des régulateurs PI [23].

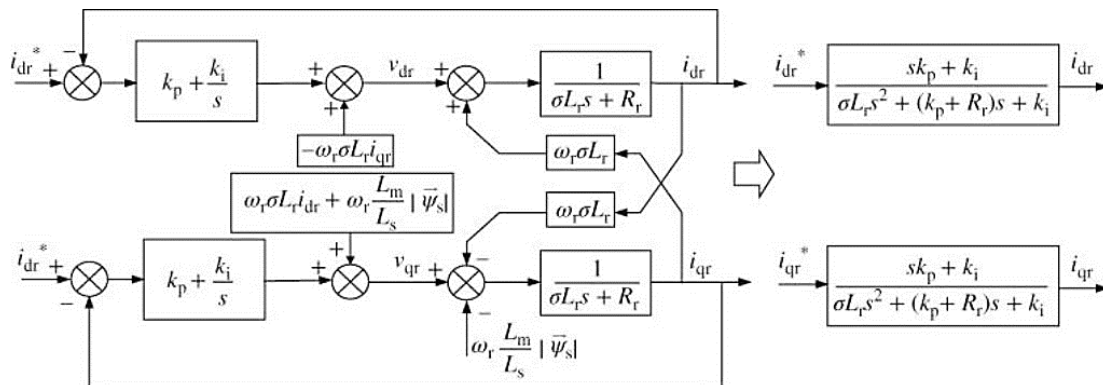


Fig.IV.8 Système équivalent du second ordre de contrôle de courant en boucle fermée avec régulateurs PI [23]

#### IV.5.1.2 Boucles de contrôle de puissance et de vitesse

Une fois les boucles de contrôle de courant et le calcul de l'angle de flux étudiés, le système de contrôle complet peut être introduit. Comme l'axe d du référentiel est aligné avec le vecteur spatial du flux statorique .

Cela signifie que la composante q du courant rotorique est proportionnelle au couple, c'est à dire qu'avec  $i_{qr}$  il est possible de contrôler le couple et, par conséquent, la vitesse de la machine si l'application l'exige. De la même manière, en développant l'expression de la puissance réactive du stator dans le repère dq.

Par conséquent, en raison de l'orientation choisie, on peut voir que les deux composantes du courant rotorique nous permettent indépendamment de contrôler le couple et la puissance réactive du stator.

Ainsi, à partir de ces expressions, la figure IV.9 illustre le contrôle vectoriel complet du MADA. En conservant les boucles de courant étudiées dans les sections précédentes, une boucle de vitesse et une boucle de puissance réactive statorique ont été ajoutées. La nécessité de réguler la vitesse dépend de l'application dans laquelle cette machine est utilisée, et il peut arriver que le MADA impose simplement un couple électromagnétique  $T_{em}$ , tandis que la vitesse de l'arbre est contrôlée par d'autres éléments.

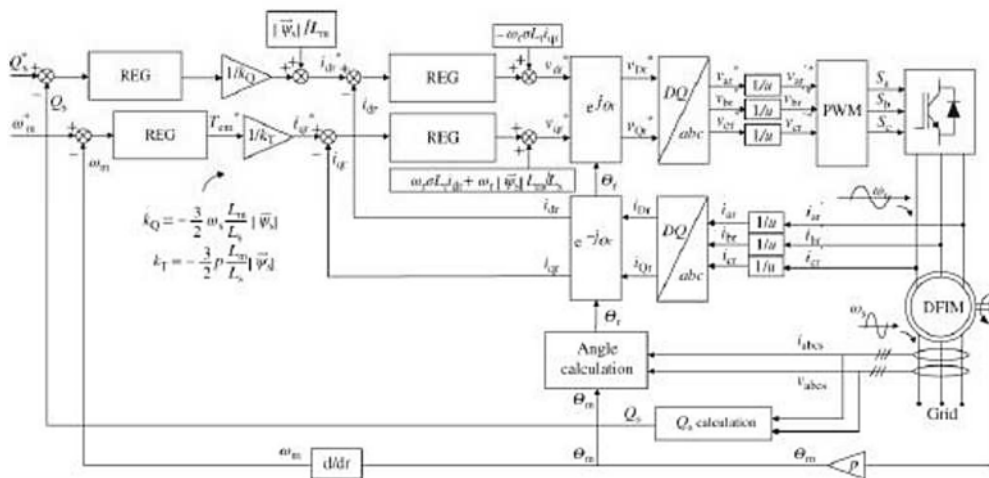


Fig.IV.9 Contrôle vectoriel complet du MADA [23]

## IV.6. Résultats de Simulation

Dans ce paragraphe on présente l'analyse des résultats obtenus par simulation, sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation,

### IV.6.1. Paramètres et grandeurs de la MADA

Fréquence statorique	$f = 50 \text{ Hz}$	Puissance nominale du stator	$P_s = 2e^6 \text{ W}$
Tension nominale du stator	$V_s = 690 \text{ V}$	Vitesse de rotation nominale	$n = 1500 \text{ tr/mn}$
Courant nominal du stator	$I_s = 1760 \text{ A}$	Couple nominal	$T_{em} = 12732 \text{ Nm}$
Tension nominale du rotor	$V_r = 2070 \text{ V}$	Nombre de pair de pôles	$p = 2$
Résistance statorique	$R_s = 2.6e^{-3} \Omega$	Glissement maximal	$s_{max} = 1/3$
Inductance magnétisante	$L_m = 2.5e^{-3} \text{ H}$	Rapport de transformation	$u = 1/3 (N_s/N_r)$
Résistance du rotor	$R_r = 2.9e^{-3} \Omega$	Moment d'inertie	$J = 127 \text{ kg.m}^2$
Inductance de fuite	$L_{si} = 0.087e^{-3} \text{ H}$	Amortissement	$D = 1e^{-3}$
Fréquence de commutation	$f_{sw} = 4e^3 \text{ Hz}$		



### IV.6.3. Interprétation des résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA+ Onduleur) contrôlé par des régulateur PI, dont la commande indirecte a été adoptée. Les résultats présentent les différentes courbes obtenues de 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 et réactives du générateur ou encore celle du couple. Dans la suite, nous allons présenter Les résultats de simulation

#### IV.6.3.1 Analyse des grandeurs électromécaniques du générateur MADA

L'utilisation du logiciel MATLAB, conçu pour la manipulation des matrices, pour la simulation de la MADA en fonctionnement générateur permet d'utiliser les modèles décrits dans les chapitres II et III. Nous avons traité dans la simulation trois cas possibles qu'on peut rencontrer au cours de l'exploitation des MADA :

- Dans le premier cas, la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse synchrone (on est en régime hypo-synchrone)
- Dans le deuxième cas, la vitesse du rotor est égale à la vitesse synchrone
- Dans le troisième cas, la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse synchrone (on est en régime hyper-synchrone)

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation concernant respectivement la vitesse et le couple, les composantes du courant statoriques et rotoriques et leur résultante :

- La Fig.IV.12 montre que si le démarrage n'est pas fait correctement, en fait nous ne pouvons pas le faire, mais par souci de simplicité nous l'avons évité. Le zoom montre à quel point le contrôle de la vitesse et le courant est si important pour la stabilité de fonctionnement. Les changements de la vitesse d'entraînement et le courant doivent être prises très au sérieux tous le long du processus de production de l'énergie électrique Fig.IV.13 et Fig.IV.14.
- La Fig.IV.15 montre l'ajustement que nous avons apporté au couple électromagnétique de  $\pm 0,25$  pu, et comment le courant rotorique en quadrature

$I_{qr}$  est ajustée en conséquence Figure IV.13. Alors que le courant rotorique direct reste nul,  $I_{dr} = 0$ , Fig. IV. 16

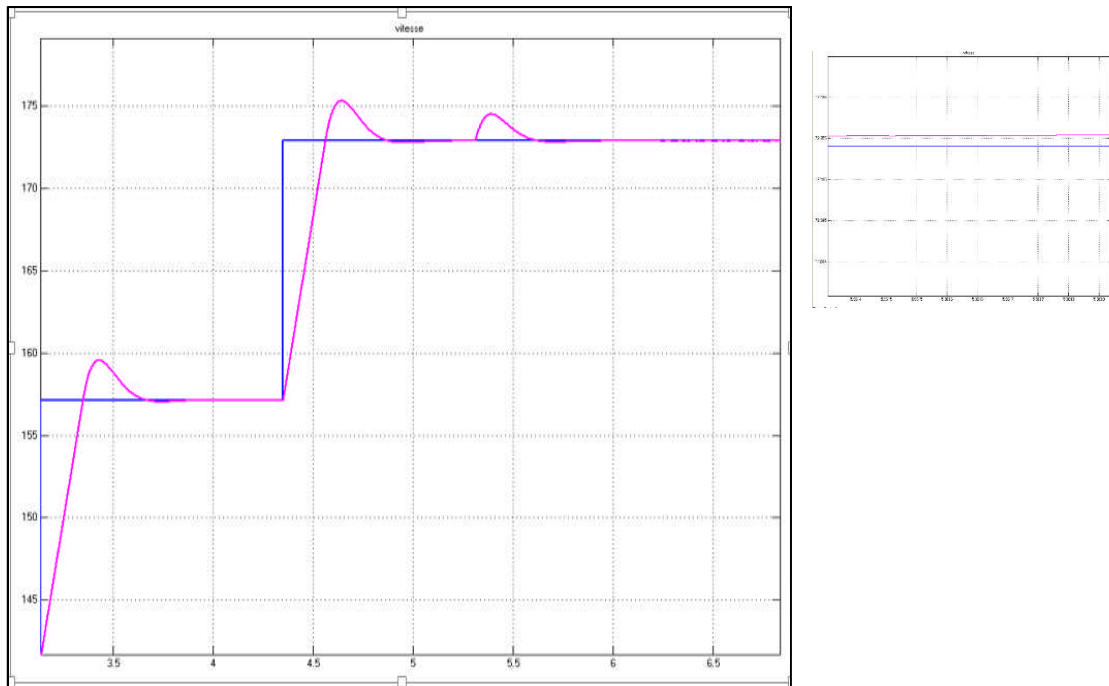


Fig.IV.12 La vitesse  $n$  en rd/s

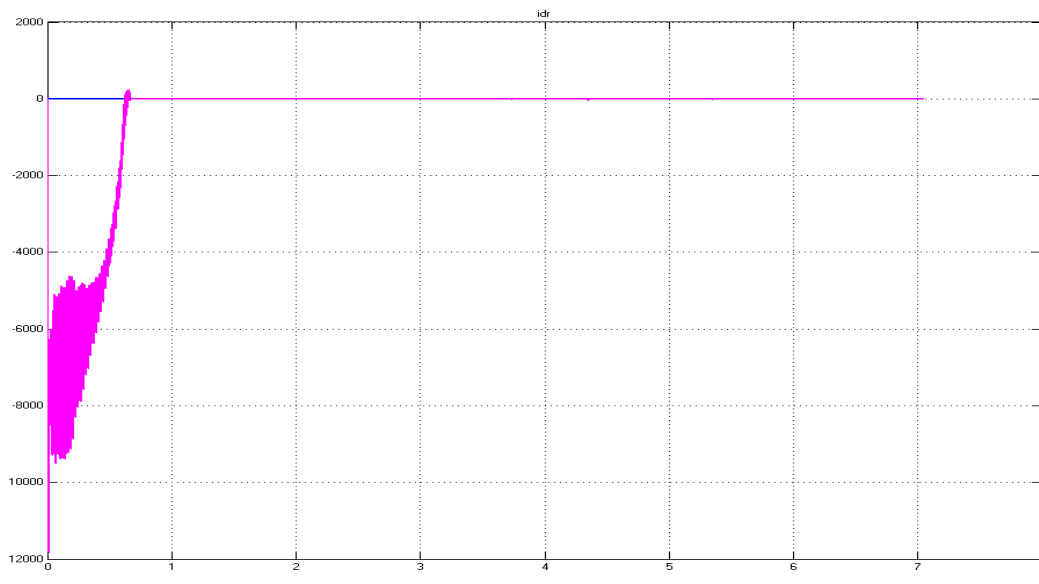


Fig.IV.13 courant rotorique directe  $I_{dr}$

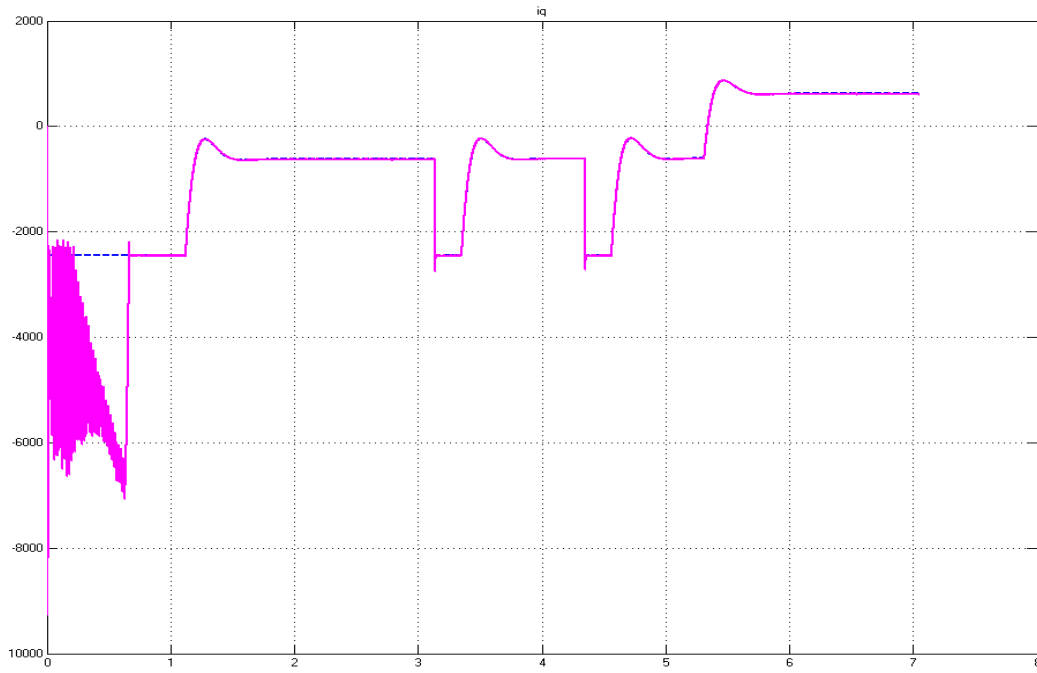


Fig.IV.14 Le courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$

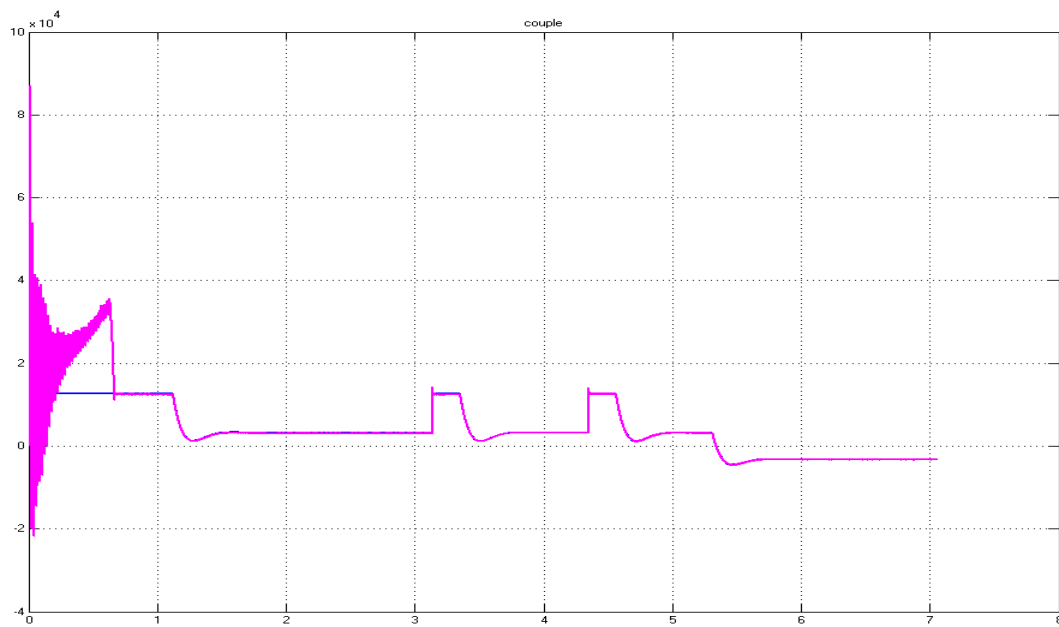


Fig.IV.15 Le couple électromagnétique  $T_{em}$  en Nm

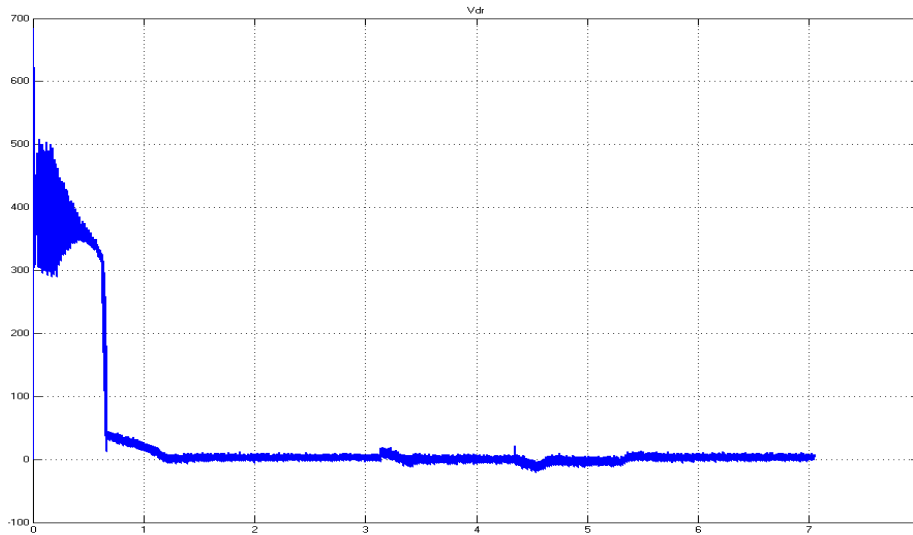


Fig.IV.16 Le tension rotorique directes  $V_d$

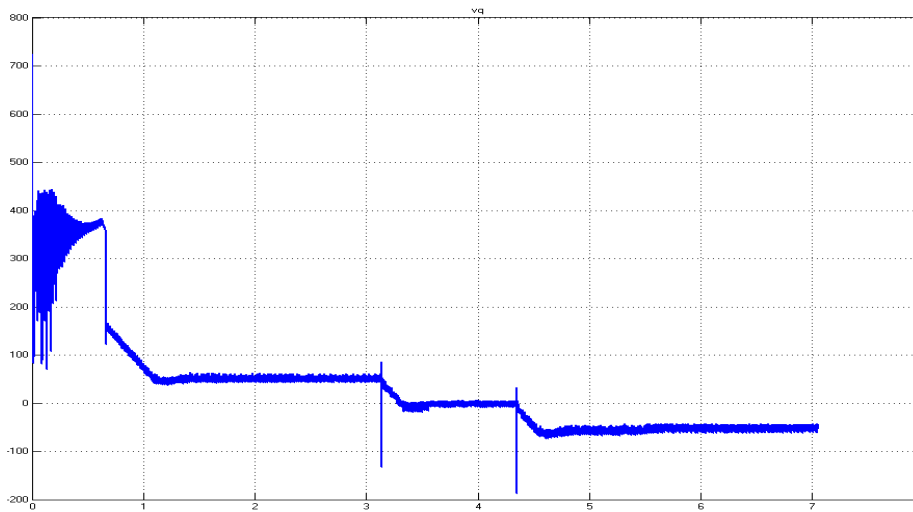


Fig.IV.17 Le tension quadrature  $V_q$

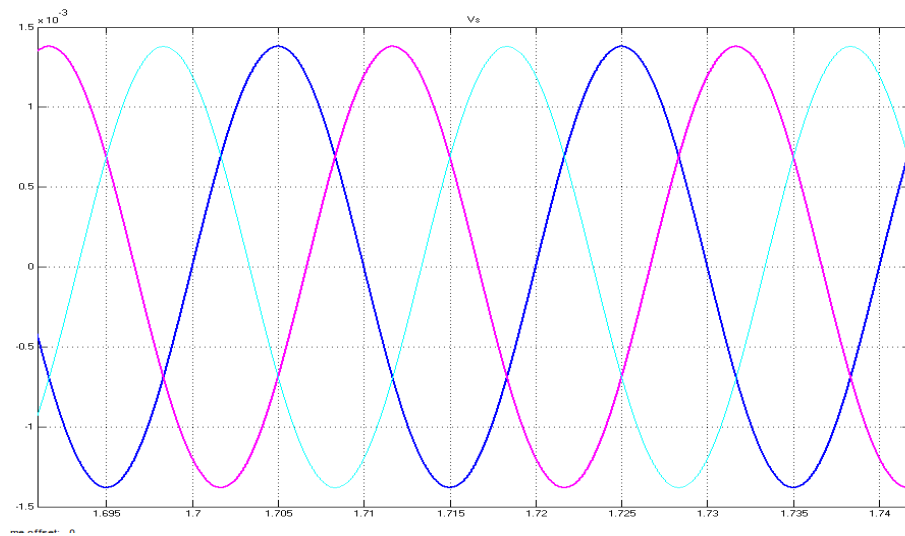


Fig.IV.18 Le tension statorique  $V_{abc}$  en (V)

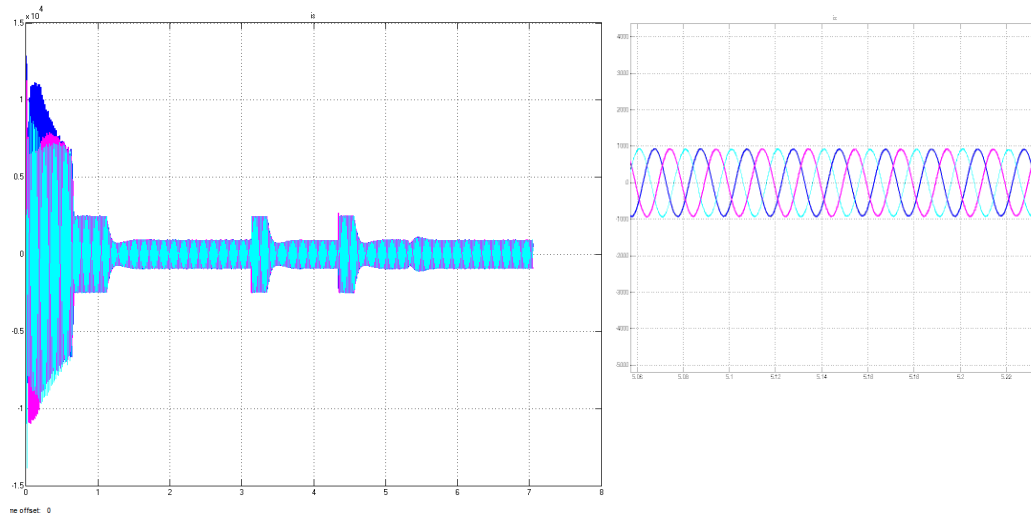


Fig.IV.19 Le courant statorique  $I_{abcs}$  en (A)

#### IV.6.3.2 Performance en régime permanent de l'éolienne basée sur MADA

Cette section présente les grandeurs électriques les plus représentatives d'une MADA de plusieurs mégawatts, fonctionnant dans un vent à vitesse variable en régulant l'angle d'inclinaison  $\beta$  de la turbine. Ainsi, le contrôle de l'éolienne imposera la caractéristique  $P_m = f(\Omega_m)$  de la figure IV.20.c. En considérant que la vitesse de rotation maximale correspond à un glissement minimum de  $s = -0,2$ , cela donne les courbes de puissance d'entrée et de couple comme le montre la figure IV.20.a. Ainsi, il est possible de déduire le comportement en régime permanent de l'éolienne à deux niveaux de magnétisation différents, par exemple avec  $Qs = 0$  et avec  $i_{dr} = 0$ . La figure IV.20 présente les résultats obtenus à l'état d'équilibre.

On peut en déduire que  $T_{em}$  et  $P_m$  sont entrés dans le puits du MADA, par conséquent, les deux sont identiques quelle que soit la stratégie de magnétisation utilisée. Notez que l'application éolienne produit les couples et les puissances les plus élevés aux vitesses les plus élevées (glissements minimum). De même, la figure IV.20.b montre comment la puissance d'entrée est répartie entre le stator et le rotor, en fonction principalement du glissement. Les puissances réactives du stator et du rotor sont représentées sur les figures IV.20.c et d.

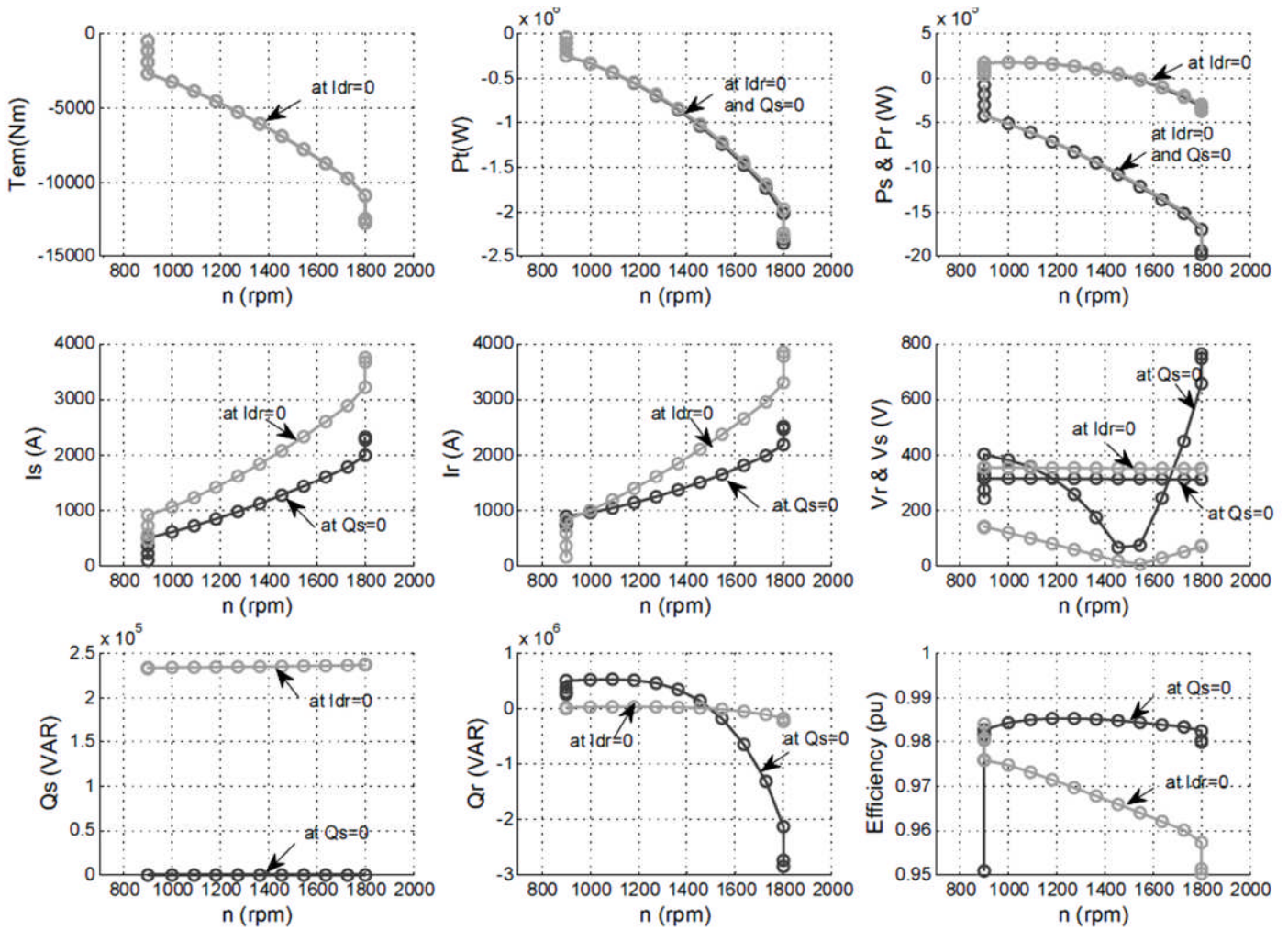


Fig.IV.20 Amplitudes des grandeurs électriques et mécanique les plus représentatives en régime permanent de l'éolienne à vitesse variable régulée par pas de plusieurs mégawatts avec des stratégies de magnétisation  $Q_s = 0$  et  $i_{dr} = 0$

Les graphes suivants sont donnés en pu (Valeurs relatives) en fonction du glissement

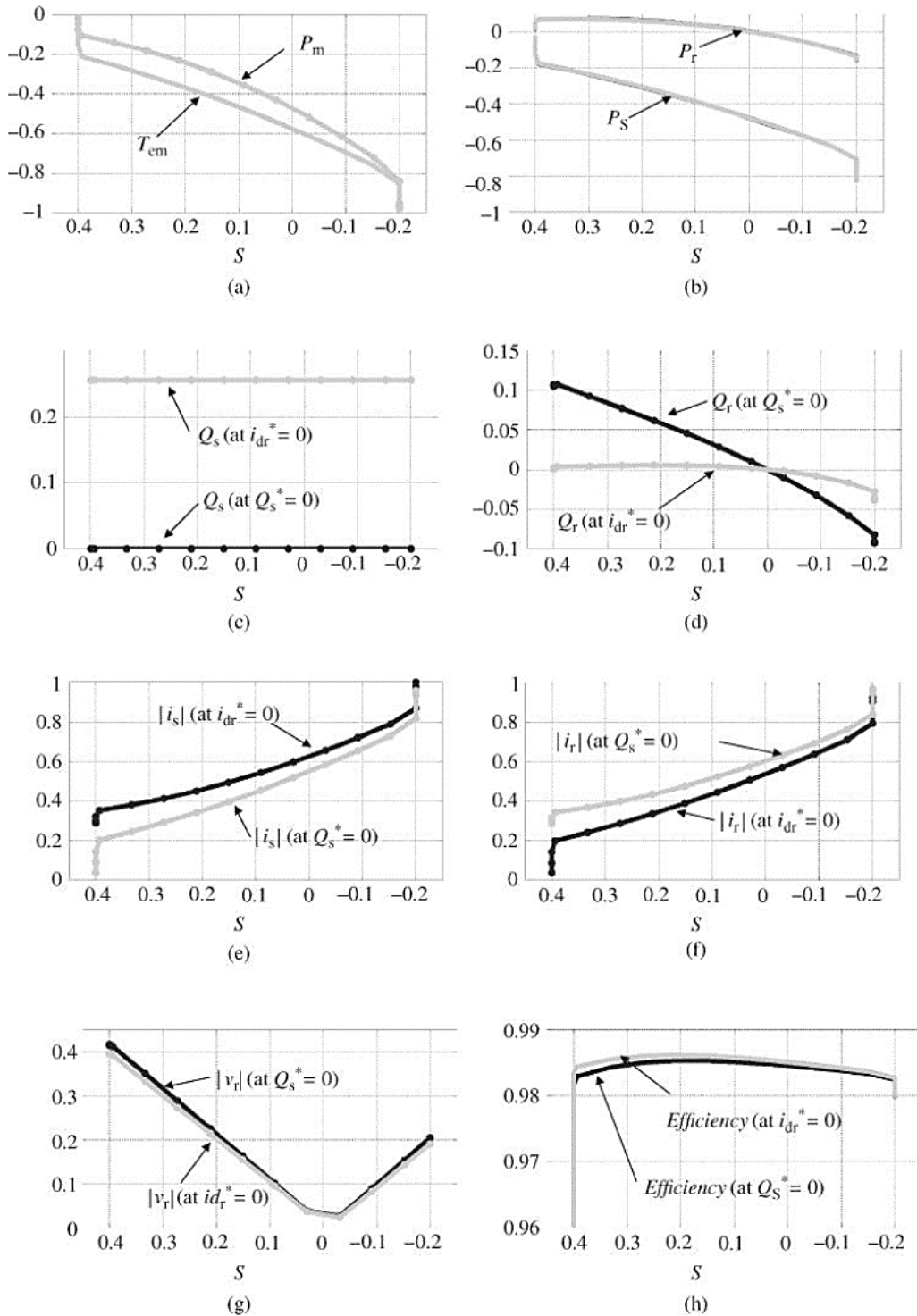


Fig.IV.21 Amplitudes des grandeurs électriques et mécanique les plus représentatives en régime permanent en pu (valeurs relatives) de l'éolienne à vitesse variable régulée par pas de plusieurs mégawatts avec les stratégies de magnétisation :  $Q_s = 0$  et  $i_{dr} = 0$

En magnétisant le DFIM à travers le stator, on constate que cette machine nécessite un  $Q_s$  constant = 0,25 pu. En ce qui concerne les modules de courant statorique et rotorique des figures IV.20e et f, on constate qu'ils suivent une évolution très similaire au couple ou à la puissance d'entrée comme le montre la figure IV.20a ; des couples d'entrée plus élevés nécessitent des modules de courant plus élevés. On peut également remarquer que la magnétisation de la machine à travers le stator ( $i_{dr} = 0$ ) nécessite des courants statoriques plus élevés et des courants rotoriques plus faibles que la magnétisation de la machine à travers le rotor ( $Q_s = 0$ ). Par conséquent, comme le montre la figure IV.20h, pour cette machine spécifique, cela implique une meilleure efficacité en magnétisant à travers le stator. Enfin, l'amplitude de tension du rotor requise est représentée sur la figure IV.20g. De manière générale, on constate que plus le glissement dans le module est élevé, plus l'amplitude de tension rotorique requise est élevée, étant presque nulle en synchronisme ( $s \cong 0$ ). Aucune des deux stratégies de magnétisation ne produit une grande différence de demande de tension du rotor ; cependant, pour cet exemple précis, le dimensionnement du convertisseur en termes de tension est établi par le point de fonctionnement au glissement  $s = 0,4$ .

#### **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. 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

La modélisation et le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans la conversion de l'énergie éolienne ont donné des résultats impressionnants. À travers des simulations rigoureuses il a été démontré que la MADA présente une performance exceptionnelle dans l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité.

Les stratégies de contrôle mises en œuvre permettent un réglage précis du couple et de la vitesse, assurant une extraction optimale de la puissance à partir des conditions de vent variables.

La MADA présente des caractéristiques de réponse transitoire robustes, indiquant sa pertinence pour les applications avec des vitesses de vent changeantes. Cela se traduit par une stabilité du réseau et une alimentation électrique fiable.

De plus, les améliorations d'efficacité de la MADA, notamment dans des conditions de charge partielle, en font un candidat prometteur pour la production d'énergie durable à partir de sources éoliennes.

Globalement, la modélisation et le contrôle réussis de la MADA marquent une avancée significative vers des systèmes de conversion d'énergie éolienne plus efficaces et fiables.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] 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.
- [2] ABDERRAHIM TELLI « Etude et Commande d'une Eolienne à Vitesse Variable Intégrée au Réseau MT. » Mémoire De Magister En Electrotechnique d'Université D'ORAN, Algérie, 2012.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] OMAR BOUHALI « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse de doctorat- Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [7] NAOUEL HAMDY «Modélisation Et Commande Des Génératrices Eoliennes» Mémoire de Magister de Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2008.
- [8] <http://www.ilr.tu-berlin.de/wka/aletape>
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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 ? » Bulletin de l'Energie Renouvelable CDER, N°14, Déc. 2008, p.6-7
- [14] NOUAR. ALLAL « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne » Document de cours, Faculté de Technologie de Université Laghouat, Algérie, 2020.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] J. CHATELAIN, « Machines Electriques », Tomes 1,2, Edition Dunod, 1989
- [18] R. ABDESSEMED, "Modélisation et simulation des machines électriques", Edition Ellipses 2011. ISBN10 : 2-7298-6495-4.
- [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.
- [23] GONZALO ABAD, GRZEGORZ IWANSKI « Power Electronics for Renewable Energy Systems - Chapter 10: Properties and Control of a Doubly Fed Induction Machine », Transportation and Industrial, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. ProQuest EBook Central.