



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

**R**épublique **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA  
Faculté De Technologie  
Département de Génie Électrique  
Spécialité : Électrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique  
Options : Commandes électriques  
Électrotechnique industrielle

### Thème

**ETUDE ET COMMANDE D'UN  
AEROGENERATEUR A BASE D'UNE  
MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE  
ALIMENTATION**

**Réalisé par :**

- ❖ M<sup>elle</sup> ZIANI YOUNA
- ❖ M<sup>elle</sup> TOULOUM AMINA

**Encadré par :**

Mr. B.FELLA

Promotion 2022/2023

# REMERCIEMENT

*D'abords nous remerciant le bon dieu de nous avoir donné la force et la volonté à accomplir ce travail.*

*On tient à remercier ainsi notre promoteur monsieur B. Fella enseignant à l'université de Bejaïa, d'avoir accepté de diriger notre travail, pour sa confiance, sa disponibilité et de nous avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail.*

*Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères au corps administratif de l'Université, pour la richesse et la qualité de leur enseignement pour assurer à leurs étudiants une formation qualifiante.*



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à mon cher PAPA, grâce à  
toi j'ai appris le sens du travail et de la  
responsabilité avec l'amour, la générosité, et tous  
les sacrifices que tu as déployés pour ma  
formation. À ma chère mère qui m'a doté d'une  
éducation digne, son amour et son soutien ont fait  
de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*À mes frères, mes neveux et mes nièces  
À mes amies et mes camarades plus particulièrement  
Kenza*

*Et à ma chère binôme Amina.*

*Youna Fiani*



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à mon Père, grâce à toi j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité avec l'amour, la générosité, et tous les sacrifices que tu as déployés pour ma formation. À ma chère mère qui m'a doté d'une éducation digne, son amour et son soutien ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*À mes frères, Mon neveu aylan*

*À mes amies et mes camarades plus particulièrement*

*Yasmine, Kamelia, Lyticia, Kahina*

*Et à ma chère binôme Youna.*

*Amina Fouloum*

### Table des matières

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale.....                                          | 1  |
| Chapitre I: Généralités sur les éoliennes                           |    |
| Introduction .....                                                  | 2  |
| I.1.Définition d'une éolienne .....                                 | 2  |
| I.2.Constitution et principe de fonctionnement d'une éolienne ..... | 2  |
| I.3. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne .....        | 4  |
| I.3.1. Avantages.....                                               | 4  |
| I.3.2. Les inconvénients.....                                       | 4  |
| I.4.Classification des éoliennes .....                              | 4  |
| I.4.1. Selon la structure de l'axe.....                             | 5  |
| I.4.1.1. Eolienne à axe vertical .....                              | 5  |
| I.4.1.1.1. Les avantages d'une éolienne à axe vertical .....        | 6  |
| I.4.1.1.2 Inconvénients d'une éolienne à axe vertical .....         | 6  |
| I.4.1.2. Eolienne à axe horizontale .....                           | 7  |
| I.4.1.2.1. Les avantages d'une éolienne à axe horizontale .....     | 8  |
| I.4.1.2.2. Les inconvénients d'une éolienne à axe horizontale.....  | 8  |
| I.4.2. Selon la connexion au réseau.....                            | 8  |
| I.4.2.1. Les éoliennes connectées au réseau .....                   | 8  |
| I.4.2.1.1 L'éolienne à vitesse fixe .....                           | 8  |
| I.4.2.1.2. L'éolienne à vitesse variable.....                       | 8  |
| I.4.2.2. Les éoliennes autonomes .....                              | 9  |
| I.4.3. Classification selon le mode de régulation .....             | 10 |
| I.4.3.1. Système à Décrochage Aérodynamique Pitch .....             | 10 |
| I.4.3.2. Système à Décrochage Aérodynamique Stall .....             | 10 |
| I.4.4. Classification des éoliennes selon la machine .....          | 10 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.5.1. Définition d'une machine asynchrone .....                                              | 10 |
| I.5.2. Constitution de la machine asynchrone .....                                            | 11 |
| I.5.3. La machine asynchrone double alimentation (MADA).....                                  | 11 |
| I.5.3.1 Définition et constitution d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)..... | 11 |
| I.5.3.2 Application et intérêt de la MADA.....                                                | 12 |
| I.5.3.3. Principe de fonctionnement .....                                                     | 12 |
| I.5.3.3.1. Stationnaire .....                                                                 | 13 |
| I.5.3.3.2. Hyposynchrone .....                                                                | 13 |
| I.5.3.3.3. Synchrone .....                                                                    | 13 |
| I.5.3.3.4. Hyper synchrone .....                                                              | 13 |
| I.5.3.4. Fonctionnement à quatre quadrants .....                                              | 13 |
| I.5.3.4.1. Moteur.....                                                                        | 13 |
| I.5.3.4.2. Générateur.....                                                                    | 13 |
| I.5.3.5. La MADA type brushless .....                                                         | 14 |
| I.5.3.6. La MADA à énergie rotorique dissipée.....                                            | 14 |
| I.5.3.7. La MADA- structure de kramer.....                                                    | 15 |
| Conclusion.....                                                                               | 15 |

## Chapitre II: Étude de la chaîne éolienne

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                      | 16 |
| II.1. Choix de la structure à modéliser .....           | 16 |
| II.2. Modélisation de la partie mécanique .....         | 17 |
| II.2.1. Hypothèses simplificatrices.....                | 17 |
| II.2.2. Modélisation de Profil du vent .....            | 17 |
| II.2.3. Choix et modèle de la turbine.....              | 18 |
| II.2.4. Modélisation du multiplicateur de vitesse ..... | 20 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.5. Équation dynamique de l'arbre de transmission .....          | 21 |
| II.2.6. Stratégies de commande de la turbine éolienne.....           | 23 |
| II.2.6.1.Extraction du maximum de puissance (MPPT) .....             | 23 |
| II.2.6.2. Schéma bloc de la turbine en MPPT .....                    | 25 |
| II.2.6.3. Différentes zones de fonctionnement .....                  | 26 |
| II.2.7. Système d'orientation des pales .....                        | 27 |
| II.3. Modélisation de la partie électrique .....                     | 27 |
| II.3.1. Hypothèses simplificatrices .....                            | 27 |
| II.3.2. Modèle de la machine (MADA) dans le plan ABC.....            | 28 |
| II.3.2.1. Equations électriques de la machine.....                   | 28 |
| II.3.2.2. Equations magnétiques.....                                 | 29 |
| II.3.2.3. Equations mécanique de la machine.....                     | 30 |
| II.3.3. Modèle de la (MADA) dans le plan dq .....                    | 30 |
| II.3.3.1. La transformation de Park .....                            | 30 |
| II.3.4. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....          | 32 |
| II.3.4.1. Les équations des tensions.....                            | 32 |
| II.3.4.2. Les équations de flux.....                                 | 32 |
| II.3.4.3. Expression du couple électromagnétique .....               | 33 |
| II.3.5. Choix de référentiel .....                                   | 33 |
| II.3.5.1. Référentiel lié au stator.....                             | 33 |
| II.3.5.2. Référentiel lié au rotor.....                              | 34 |
| II.3.5.3. Référentiel lié au champ tournant.....                     | 34 |
| II.3.6. Modélisation de l'interface d'électronique de puissance..... | 34 |
| II.3.6.1. Modèle des convertisseurs statiques.....                   | 34 |
| II.3.6.2. La commande MLI de l'onduleur.....                         | 36 |
| II.3.7. Modélisation du bus continu.....                             | 37 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| II.4. Les expressions des puissances ..... | 38 |
| Conclusion .....                           | 38 |

### Chapitre III: Stratégie de commande et simulation

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                                                                              | 39 |
| III.1. Principe de contrôle vectoriel à flux orienté .....                                                      | 39 |
| III.2. Stratégie de commande de la MADA .....                                                                   | 40 |
| III.2.1. Schéma de la commande .....                                                                            | 40 |
| III.2.2. Choix du référentiel pour le modèle diphasé .....                                                      | 40 |
| III.3. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....                                              | 41 |
| III.4. les expressions des courants statoriques en fonction des courants rotoriques .....                       | 43 |
| III.5. les expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques .....                        | 43 |
| III.6. Les expressions des puissances actives et réactive statoriques en fonction des courants rotoriques ..... | 43 |
| III.7. Reconstitution des tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature .....                       | 44 |
| III.8. Mise en place de la régulation .....                                                                     | 46 |
| III.8.1. Synthèse de régulateur PI .....                                                                        | 46 |
| III.10. Résultats de la simulation .....                                                                        | 49 |
| Conclusion .....                                                                                                | 56 |
| Conclusion générale .....                                                                                       | 57 |

## Liste des figures

### Chapitre I

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure.I.1: constitution d'une centrale éolienne.....                                                    | 3  |
| Figure.I.2: les structure d'une éolienne.....                                                            | 5  |
| Figure.I.3: Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius et Turbine Darrieus et Darrieus en H.            | 6  |
| Figure.I.4: Composants d'une éolienne à axe horizontale.....                                             | 7  |
| Figure.I.5: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable..... | 9  |
| Figure.I.6: Structure de la chaîne de conversion éolienne.....                                           | 11 |
| Figure.I.7: Structure du rotor de la MADA.....                                                           | 12 |
| Figure.I.8: Les modes de fonctionnement de la MADA.....                                                  | 14 |

### Chapitre II

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure.II.1 : structure à modéliser.....                                                                  | 16 |
| Figure.II.2 : Schéma de la turbine éolienne.....                                                          | 18 |
| Figure.II.3 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse et de l'angle d'orientation..... | 19 |
| Figure.II.4 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....                                           | 20 |
| Figure.II.5: Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne.....                                     | 22 |
| Figure.II.6: Schéma bloc du modèle de la turbine.....                                                     | 22 |
| Figure.II.7: Schéma bloc de maximisation de la puissance extrait.....                                     | 25 |
| Figure.II.8: Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT.....                                         | 25 |
| Figure.II.9: les quartes zones de fonctionnement de la turbine.....                                       | 26 |
| Figure.II.10: Représentation schématique de la MADA.....                                                  | 28 |
| Figure.II.11. Représentation de la MADA dans le repère (dq).....                                          | 31 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure.II.12 : Représentation de la machine dans le repère diphasé. .... | 32 |
| Figure.II.13.schéma d'un onduleur de tension triphasé. ....              | 35 |
| Figure.II.14: Schéma synoptique de la MLI. ....                          | 36 |
| Figure.II.15 : Schéma de principe de principe de la MLI. ....            | 37 |
| Figure II.16 : Schéma du bus continu. ....                               | 37 |

### **Chapitre III**

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure.III.1 : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.....          | 39 |
| Figure.III.2 : Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA. ....                          | 40 |
| Figure.III.3 : Schéma bloc du système à réguler du modèle simplifié de la MADA.....                     | 45 |
| Figure III.4 : Schéma bloc de la commande directe.....                                                  | 46 |
| Figure III.5 : Schéma bloc du système à réguler en boucle ouverte .....                                 | 47 |
| Figure III.6 : Schéma bloc du système à réguler en boucle fermée .....                                  | 48 |
| Figure III.7 : variation de la vitesse du vent en fonction du temps.....                                | 49 |
| Figure III.8 : la vitesse mécanique en fonction du temps.....                                           | 50 |
| Figure III.9 : Allure du glissement .....                                                               | 50 |
| Figure III.10 : les puissances réactives de référence et mesurée en fonction du temps. ....             | 51 |
| Figure III.12 : coefficient de puissance en fonction du temps .....                                     | 52 |
| Figure III.13 : courant statorique en fonction de temps .....                                           | 52 |
| Figure III.14 : courant statorique en fonction de temps (zoom).....                                     | 53 |
| Figure III.15: courant rotorique en fonction du temps .....                                             | 53 |
| Figure III.16 : courant rotorique en fonction du temps (zoom). ....                                     | 54 |
| Figure III.17 : Zoom de l'allure de la tension de l'onduleur deux niveaux .....                         | 54 |
| Figure III.18 : les puissances réactives de référence et mesurée avec variation de $f' = 10*f$<br>..... | 55 |

---

Figure III.19 : les puissances actives de référence et mesurée avec variation de  $f' = 10*f$   
..... 55

### Nomenclatures :

#### Notations

MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation

MSAP: Machine Asynchrone à Aiment Permanent

Matlab: Matrix Laboratory

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PI : Proportionnel Intégral

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

#### Symboles

F : La fréquence du réseau.

$f_r$  : La fréquence du rotor.

$n_s$  : La fréquence de synchronisme.

P : nombre de paire de pole.

g : glissement.

$\Omega$  : Vitesse mécanique

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme.

$\beta$ : Angle de l'orientation de pale.

$C_p$  : Coefficient de puissance.

$C_{p,max}$ : Coefficient de puissance maximal.

$C_{turb}$ : Couple de la turbine.

$C_g$ : Couple du générateur.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$C_m$ : Couple mécanique.

$C_r$ : Couple résistant.

$\rho$  : Densité d'air.

G : Gain du multiplicateur.

$J_{turb}$  : Inertie de la turbine.

$J_g$  : Inertie du générateur.

$R$  : Longueur de pales.

$P_{aréo}$  : Puissance aérodynamique.

$P_{aréo\_ref}$  : Puissance aérodynamique de référence.

$P_v$  : Puissance du vent.

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine.

$\Omega_{turb}$  : Vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega_g$  : Vitesse de rotation du générateur.

$V$  : Vitesse du vent.

$V_{est}$  : Vitesse du vent estimée.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse mécanique du MADA.

$\theta_s \theta_r$  : Angle du stator et du rotor.

$\sigma$  : Coefficient de dispersion.

$f$  : Coefficient de frottement.

$G$  : Coefficient de glissement.

$P$  : Constante de Laplace.

$\tau_s \tau_r$  : Constante de temps statorique et rotorique.

$K_i$  : Gain intégral.

$K_p$  : Gain proportionnel.

$M$  : Inductance mutuelle.

$L_s, L_r$  : Inductances propres du stator et du rotor.

$[P(\theta)]$  : Matrice de transformation de Park.

$J$  : Moment d'inertie.

$P$  : Nombre de paires de pôle.

$p_s, p_r$  : Puissance active statorique et rotorique.

$Q_s, Q_r$  : Puissance réactive statorique et rotorique.

$\omega_s, \omega_r$  : Pulsation du stator et du rotor.

$R_s, R_r$  : Résistances du stator et du rotor par phase.

$U_c$  : Tension du bus continu.

$I_{sd} I_{sq} I_{rd} I_{rq}$  : Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d q).

$\phi_{ds} \phi_{qs} \phi_{dr} \phi_{qr}$  : Flux statoriques et rotoriques dans le repère (d q).

$V_{sd} V_{sq} V_{rd} V_{rq}$  : tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d q).

$[I_{ar} I_{br} I_{cr}]^T$  : Vecteurs des courants rotoriques dans le repère (a b c).

$[I_{as} I_{bs} I_{cs}]^T$  : Vecteurs des courants statoriques dans le repère (a b c).

$[\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T$  : Vecteurs des flux rotoriques dans le repère (a b c)

$[\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T$  : Vecteurs des flux statoriques dans le repère (a b c)

$[V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T$  : Vecteurs des tensions rotoriques dans le repère (a b c)

$[V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T$  : Vecteurs des tensions statoriques dans le repère (a b c)

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Introduction générale

De nos jours, l'augmentation démesurée de l'activité industrielle dans le monde entier, y compris les pays moins développés (coûts de production attractifs), a accru rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à ce problème, l'homme a spontanément augmenté l'exploitation des sources fossiles (charbon, pétrole, gaz...) dans les centrales thermiques, ce qui a engendré des conséquences désastreuses pour la planète (émission de CO<sub>2</sub>, déforestation accrue, pollution...). Cela a contraint l'être humain à chercher d'autres sources propres et surtout durables pour le futur, d'où l'apparition de l'industrie des énergies renouvelables.

On peut parler d'énergies renouvelables lorsque qu'il s'agit d'énergies extraites à partir de sources ou de ressources naturelles abondantes et illimitées citant parmi elles : l'énergie solaire (les rayons du soleil), l'énergie éolienne (le vent), l'énergie hydraulique (l'eau des fleuves, barrages, courants marins, marées...), la biomasse (le biogaz...).

Dans ce mémoire, notre étude se base sur l'une de ces énergies qui est l'énergie éolienne. Notre travail a comme objectif l'étude et la commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) qui équipe une grande partie des éoliennes dans le but d'une meilleure exploitation de ces ressources pour différentes conditions du vent.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les systèmes éoliens où on a décrit le processus et son principe de fonctionnement après on les a classifié selon quelques critères pour arriver à la présentation de la MADA en citant son principe ainsi que son mode de fonctionnement et les différents types de MADA.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne qui englobe la turbine, le multiplicateur, la MADA, les convertisseurs côté machine et réseau et la mise en équation du système en vue de sa commande.

Le troisième chapitre va mettre en œuvre la technique de la commande vectorielle de la MADA en réalisant un schéma structurel du système global que nous simulerons sous l'environnement Matlab/Simulink en présentant les résultats et commentaires.

Enfin le travail sera clôturé par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR**  
**LES ÉOLIENNES**

## Introduction

L'industrie est un secteur qui ne cesse jamais de se développer de plus en plus ce qui fait toujours appel à une énorme consommation d'énergie électrique c'est pour cela que les industriels optent pour l'exploitation des énergies renouvelables afin de produire cette électricité comme l'énergie éolienne car elle est la moins chère et de stock non limité et pas du tout polluante.

Dans ce chapitre nous allons présenter en détails la construction ainsi que le mode de fonctionnement d'une éolienne appelé aussi aérogénérateur.

### I.1.Définition d'une éolienne

Le mot « éolienne » vient d'Éole, nom du dieu des vents dans la mythologie grecque [1].

L'énergie éolienne c'est l'énergie directement extraite du vent, autrement dit c'est la conversion de l'énergie cinétique du vent capté à travers soit un capteur à axe vertical ou à axe horizontale en énergie mécanique pour faire tourner les pales du dispositif appelée aérogénérateur puis en énergie électrique via une génératrice.

Selon leurs puissances nominales les éoliennes sont divisées en trois catégories [2] :

- ✓ Eoliennes à petite puissance (moins de 40kw)
- ✓ Eoliennes à moyenne puissance (de 40 à quelques centaines de kW)
- ✓ Eoliennes à grande puissance (plus de 1 MW)

Plus le diamètre du rotor est important plus l'éolienne est puissante.

### I.2.Constitution et principe de fonctionnement d'une éolienne [3][4]

Le rotor de la turbine est composé de trois pales (lames) il entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un générateur. A l'aide du vent suffisamment soufflant cela va faire tourner les pales qui disposent d'une structure aérodynamique formé de plusieurs tailles de la base à la pointe cela signifie qu'une force de poussée est créée par le déplacement d'un fluide sur la surface d'une pale de cette façon l'éolienne éteint la rotation normale.

Ces pales doivent faire face au vent pour une extraction d'énergie maximal mais la direction et la vitesse du vent peuvent changer alors on installe un capteur de vitesse au-dessus de la nacelle qui va mesurer ces variations, l'écart est envoyé à un contrôleur électronique qui envoie un signal au mécanisme d'inclinaison embarqué des pales pour garantir leurs alignements corrects avec la vitesse relative du vent et elles sont toujours placées selon l'angle

d'attaque optimal par rapport au flux relatif du vent afin de la corriger, en conséquence, l'éolienne sera toujours aligné avec la direction du vent.

La rotation ne peut pas être directement relié au générateur car les pales tourne à un très faible régime à cause du bruit et de la résistance mécanique ce qui est impossible de produire une fréquence électrique suffisante pour le générateur c'est pour cela qu'on l'accord d'abord à une boite de vitesse qui utilise un multiplicateur de force pour obtenir un grand rapport de vitesse. Un frein se trouve dans la nacelle pour arrêter la rotation des pales ou cas de vent excessif.

Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. L'électricité produite est transférée par des câbles qui sont à l'intérieur du mat vers la base où se trouve un transformateur élévateur du courant qui va circuler dans le réseau de distribution.

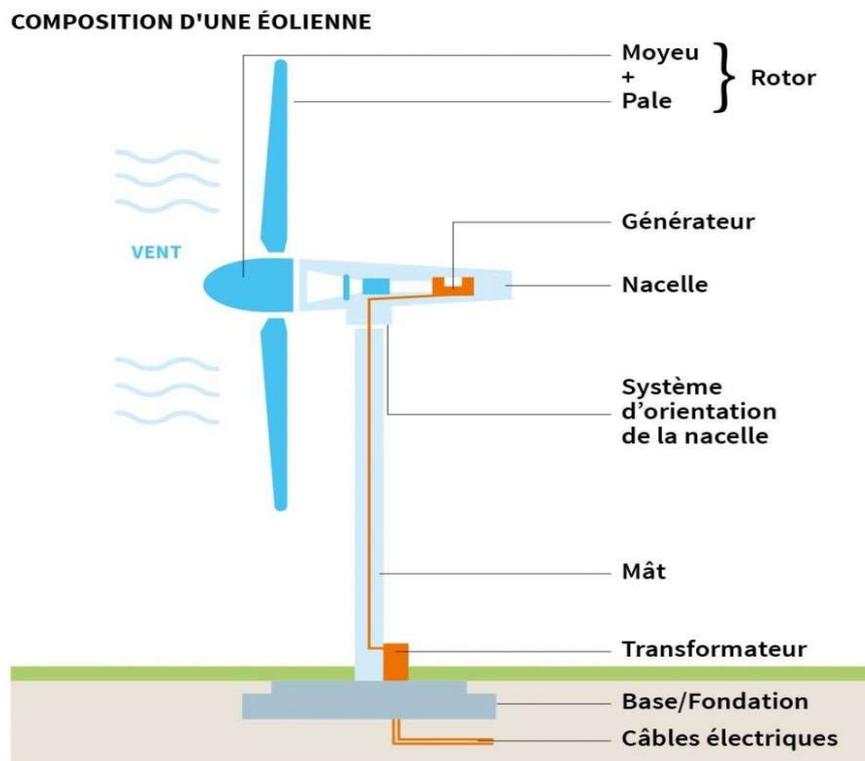


Figure.I.1 : constitution d'une centrale éolienne

## I.3. Les avantages et les inconvénients d'une éolienne [5]

### I.3.1. Avantages

- De point de vue écologique l'énergie éolienne est une énergie verte durable et propre qui ne nécessite aucun carburant et qui ne dégage pas de gaz toxique ou radioactive ni à effet de serre.
- Economiquement elles sont moins coûteuses par rapport à sa construction et qui ne nécessite pas trop d'entretien.
- Ces éoliennes peuvent alimenter des sites isolés et non raccordés au réseau électrique.

### I.3.2. Inconvénients

- La variation de la puissance fournie qui est due au changement de vitesse du vent ainsi que sa direction ce qui nécessite l'ajout d'autres sources de puissance et de systèmes de régulation.
- Le coût d'achat et d'installation élevé
- la perturbation de l'écologie locale des sites.

## I.4. Classification des éoliennes [4]

Elles sont classées selon :

1. Le type de capteur : structure de l'axe (à axe horizontale ou vertical).
2. Selon la connexion au réseau : Connecté au réseau ou autonome.
3. Le mode de fonctionnement : vitesse fixe ou variable.
4. Le mode de régulation : pitch ou stall contrôle.
5. La nature de convertisseur électromécanique : machine synchrone ou asynchrone.

### I.4.1. Selon la structure de l'axe

On distingue deux technologies des systèmes éoliens : éolienne à axe horizontale et à axe vertical.

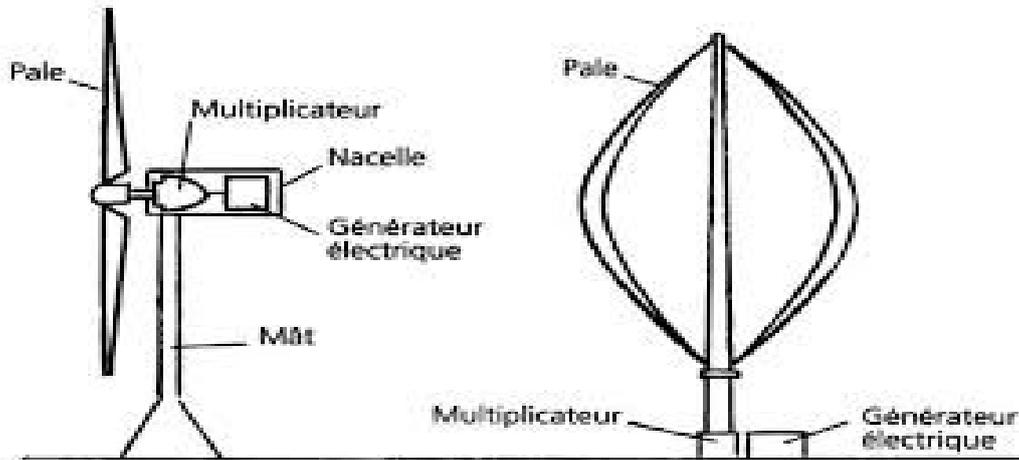


Figure I.2: les structure d'une éolienne

#### I.4.1.1. Eolienne à axe vertical [7]

Appelée aussi VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) [6].

Les éoliennes verticales permettent de produire une électricité verte (énergie extraite de ressources renouvelables [6]), elle est muni de pâles ou de cylindres positionnés verticalement et qui tournent aussi autour d'un axe vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent qui peuvent recevoir ce dernier de n'importe quelle direction (pas besoin d'un capteur). L'énergie cinétique du vent est transformée en énergie électrique à l'aide du couple rotor/générateur situés au niveau du sol ou on trouve aussi un multiplicateur, une boîte d'engrenage ainsi que des organes de commandes.

Cette énergie peut être immédiatement exploitée sinon elle sera stockée dans une batterie ou bien elle sera injectée dans le réseau public de distribution .

Il existe trois types d'éolienne vertical : savonius, darrieus et à voile tournante.

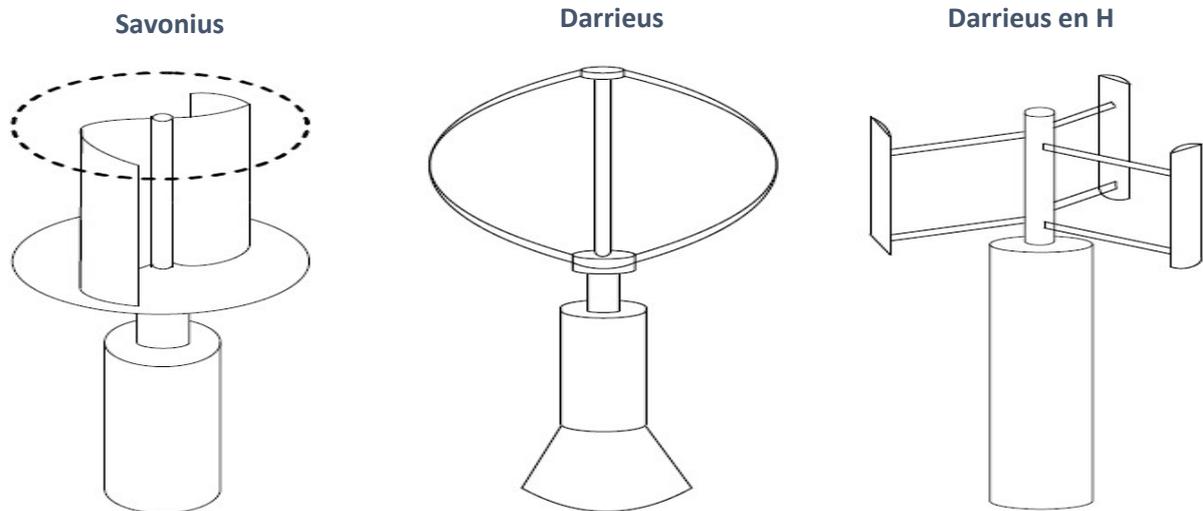


Figure.I.3 : Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius et Turbine Darrieus et Darrieus en H

#### I.4.1.1.1. Les avantages d'une éolienne à axe vertical [8]

- Facilité d'accès à ces composants (multiplicateur, génératrice...) Puisqu'ils sont installés au sol.
- Simplicité de conception et d'entretien.
- L'avantage de Savonius c'est qu'elle est une éolienne discrète et silencieuse qui demande moins d'espace, sa capacité à capter des vents faibles et peut fonctionner quel que soit le sens du vent.
- Darrieus offre un meilleur rendement par vent moyen en plus à sa simplicité à l'installer.
- De point de vue économique ces éoliennes consomment moins d'électricité sur le réseau et écologiquement elles ne consomment pas d'énergies fossiles (non polluante)

#### I.4.1.1.2 Inconvénients d'une éolienne à axe vertical

- Moins productive en terme de quantité d'énergie et moins performante qu'une éolienne horizontale.
- Le poids du rotor d'une éolienne de type Darrieus sur son stator pose un problème lors de démarrage.
- Sa production est entrecoupée donc on aura toujours à stocker l'électricité produite, ou de consacrer sa production à des activités qui s'en accommodent : électrolyse de l'aluminium, fabrication de combustibles verts [7].

### I.4.1.2. Eolienne à axe horizontale

Son nom est tiré de sa nacelle qui est fixée à l'horizontale, elle se compose de plusieurs éléments :

- Un rotor constitué d'un moyeu et de trois pales.
- Une nacelle où se trouve le générateur, la boîte de vitesse, le multiplicateur et le frein,
- Le mât (pour un maximum d'énergie l'éolienne il doit être placée le plus haut possible)
- La base (fondation) qui assure la stabilité de l'éolienne au sol.

Ce type est mené d'un système d'orientation pour les pales puisque la direction et la vitesse du vent peuvent changer.

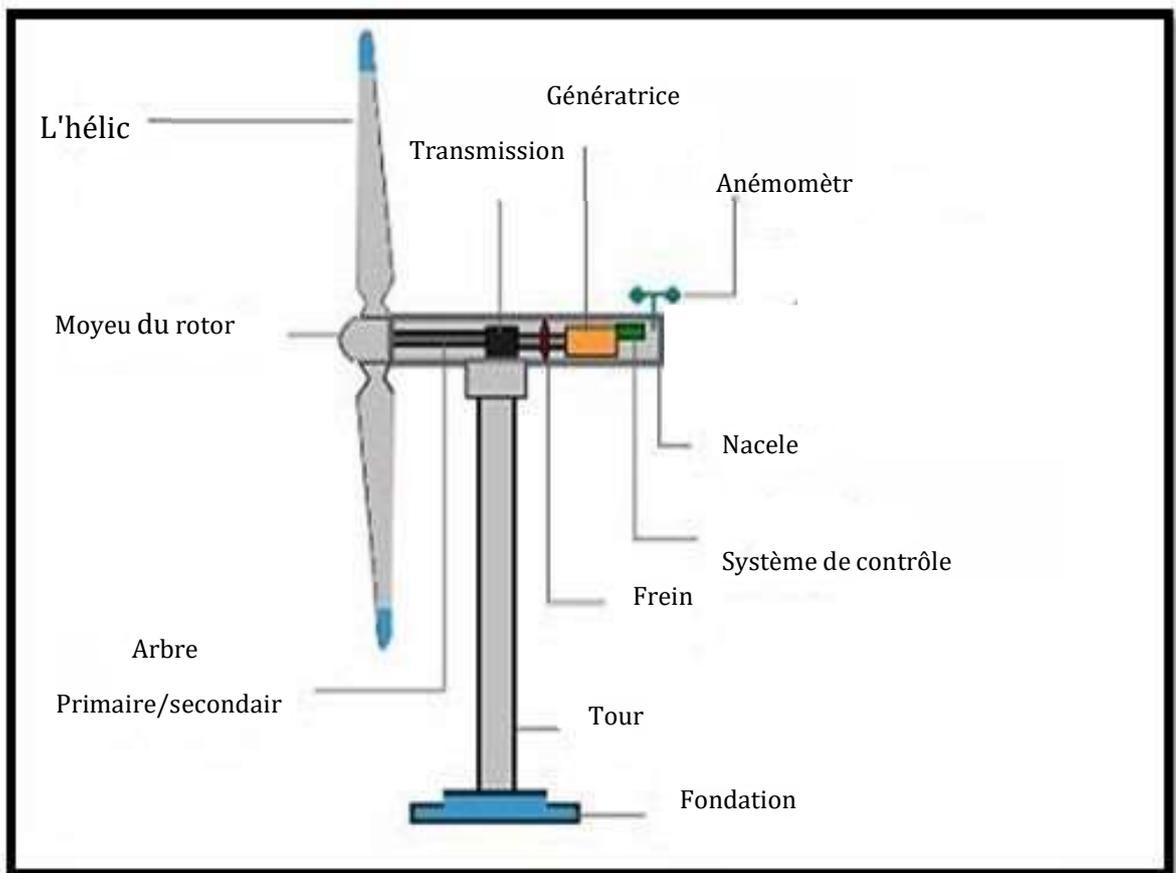


Figure I.4: Composants d'une éolienne à axe horizontale

#### **I.4.1.2.1. Les avantages d'une éolienne à axe horizontale**

- Performante, fiable et moins couteuse.
- Pas trop encombrante au sol.
- Offre un haut rendement en exploitant le maximum d'énergie puisqu'elle peut s'orienter selon le sens du vent grâce au positionnement de ses pales.
- Lorsque le vent est trop fort le rotor s'arrête automatiquement grâce à un frein connecté à un détecteur de vitesse.

#### **I.4.1.2.2. Les inconvénients d'une éolienne à axe horizontale**

- Temps de démarrage élevé (en cherchant la direction du vent pour trouver sa position idéale).
- Elle est fragile aux intempéries, tempêtes et aux vents trop forts ce qui peut diminuer son rendement.

### **I.4.2. Selon la connexion au réseau**

#### **I.4.2.1. Les éoliennes connectées au réseau**

La connexion ou le couplage de l'éolienne au réseau électrique peut exiger une synchronisation des deux systèmes (éolienne/réseau électrique) vue que ce dernier fonctionne avec une fréquence constante (50Hz ou 60Hz) et le fait que l'éolienne peut fonctionner à vitesse fixe ou variable, alors on parle de types de connexion d'une éolienne au réseau électrique [9].

##### **I.4.2.1.1 L'éolienne à vitesse fixe [9] [10] [11]**

Sa machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en générateur est directement couplée au réseau, sa vitesse de rotation et réguler par l'orientation des pales (pitch control) qui maintient la vitesse de rotation de la machine constante via un multiplicateur et imposée par son nombre de paire de pole et par la fréquence du réseau, ce système est généralement accompagné d'une batterie de condensateur pour compenser la puissance réactive.

Cette technologie offre l'avantage de la simplicité de son système électrique et sa grande fiabilité avec un cout optimisé. Alors que sa puissance est non optimale et son couple mécanique variable du au mouvement des pales engendre un bruit.

##### **I.4.2.1.2. L'éolienne à vitesse variable**

La fréquence des tensions d'un telle type est variable ce qui nécessite l'intermédiaire d'un dispositif d'électronique de puissance (convertisseur statique) situé au circuit rotorique,

pour une extraction optimale de puissance on doit rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent.

On distingue trois structures des éoliennes à vitesse variable l'une est basée sur la machine asynchrone à cage d'écurie l'autre sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) la troisième est la machine synchrone.

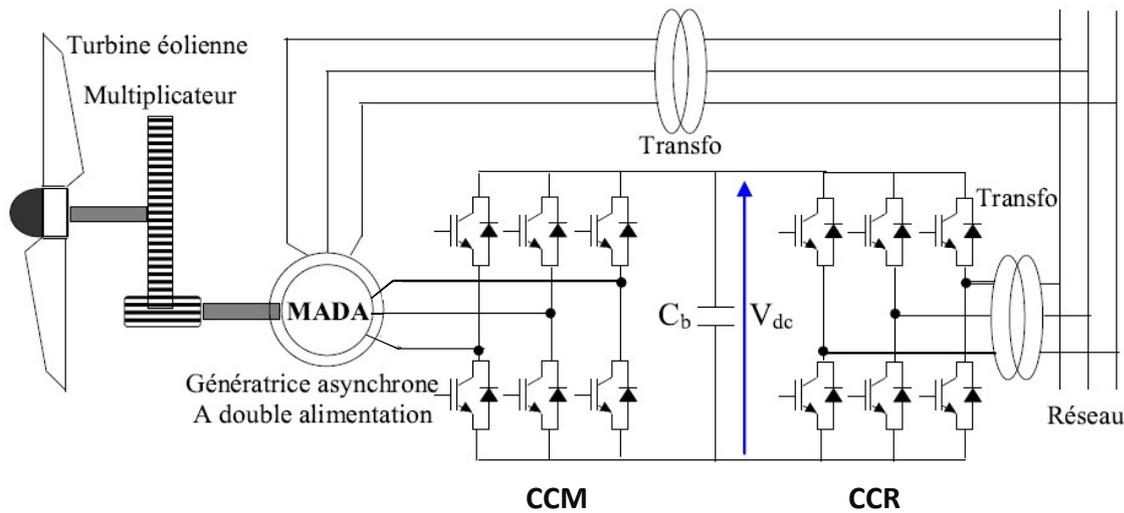


Figure I.5: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés aux générateurs à vitesse fixe sont les suivants : [3]

- L'augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

#### I.4.2.2. Les éoliennes autonomes

Dans les régions isolées à accès difficile ou les systèmes de production d'électricité alimentent des installations électriques non raccordées au réseau de distribution, on utilise des éoliennes autonomes qui permettent de leur fournir de l'électricité avec le maximum de conversion de puissance en produisant une grande quantité d'énergie avec un coût optimal d'installation et de maintenance.

### I.4.3. Classification selon le mode de régulation [2]

Vu que la direction et la vitesse du vent peuvent changer cela nécessite l'ajout d'un système de régulation de la vitesse de la turbine au-dessus de la nacelle qui va contrôler ces variations. On distingue deux modes de régulations :

#### I.4.3.1. Système à Décrochage Aérodynamique Pitch

Cette technique est utilisée dans les systèmes à vitesse variable de moyenne et forte puissance qui doivent être limité au-delà d'une vitesse de vent supérieure à la vitesse nominale donc à chaque variation les pales sont pivoté automatiquement de quelques degrés d'une façon qu'elle soit toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent pour une extraction maximale de puissance.

#### I.4.3.2. Système à Décrochage Aérodynamique Stall

C'est un système simple qui ne nécessite pas de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor car Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu qui s'arrête lors d'un vent violent mais qui conduit à des pertes énormes ce qui ne permet pas l'optimisation de la puissance.

### I.4.4. Classification des éoliennes selon la machine

On distingue deux types principaux des machines :

**Machine synchrone:** -machine synchrone a rotor bobiné.  
-machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

**Machine asynchrone:** - machine asynchrone à cage d'écureuil.  
- machine asynchrone à double stator.  
- machine asynchrone à double alimentation stator-rotor (MADA).

On a retenu la machine asynchrone à double alimentation qui fera l'objet de la suite de notre travail.

### I.5.1. Définition d'une machine asynchrone

La machine asynchrone (machine à induction) est une machine électrique tournante à courant alternatif ayant deux paires de pôles et relia à un réseau de fréquence  $F$  qui réalise la transformation de la puissance électrique reçue en puissance mécanique. Cette

machine tourne à une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de synchronisme  $n_s$  définie par :  $n_s = F/p$

### I.5.2. Constitution de la machine asynchrone

- **Le circuit magnétique** : composé de deux armatures cylindriques concentriques (l'une creuse l'autre est pleine) séparées par un entrefer étroit.
- **Le stator** : c'est la partie immobile, elle porte un enroulement triphasé à paire de pôle relié au réseau d'alimentation.
- **Rotor** : la partie tournante qui n'est pas relié électriquement à aucune source d'énergie. Constitué d'un enroulement polyphasé mis en court-circuit. Cette armature peut être de différente forme : bobinée, à cage, massive.

### I.5.3. La machine asynchrone double alimentation (MADA)

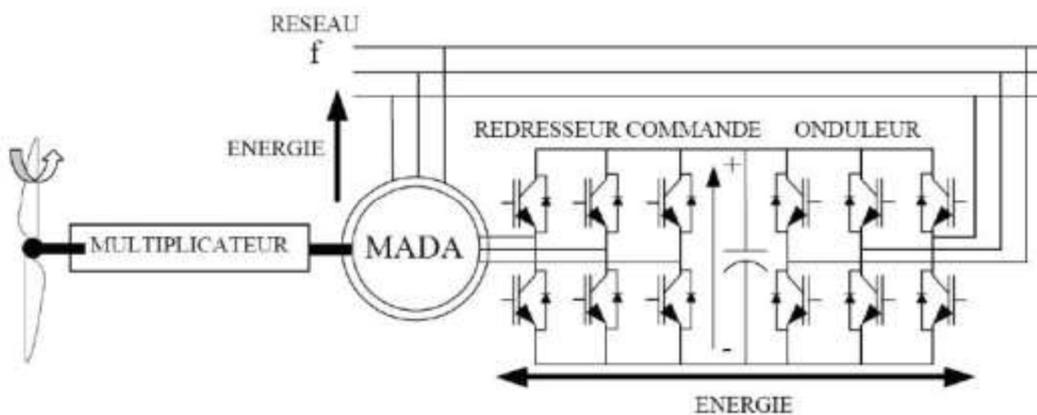


Figure I.6: Structure de la chaîne de conversion éolienne.

#### I.5.3.1 Définition et constitution d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) [14]

C'est une machine asynchrone triphasée pilotée constituant un rotor bobiné (trois bobinages) placés en étoile et alimenté en alternatif, leurs extrémités sont reliés à des bagues conductrices avec un système de balais et de bagues. Son stator est constitué de tôles magnétiques empilées munies d'encoches où on insère des enroulements. Cette machine peut être alimentée par deux sources différentes branchées respectivement au stator et au rotor où le stator est directement connecté au réseau électrique par contre le rotor est raccordé à ce dernier

via un convertisseur de fréquence à l'intermédiaire d'un bus continu ce qui permet le découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine.

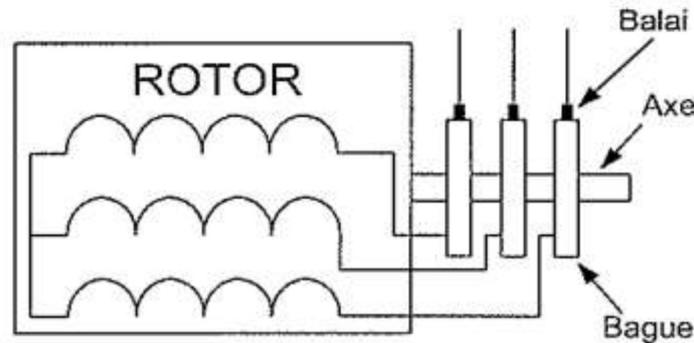


Figure I.7: Structure du rotor de la MADA.

### I.5.3.2 Application et intérêt de la MADA [12]

La MADA est généralement appliquée dans les systèmes fonctionnent à vitesse variable comme les éoliennes auxquelles la vitesse de rotation du rotor est réglée en fonction de la vitesse du vent, elle peut fonctionner en moteur comme elle peut fonctionner comme génératrice (hyposynchrone ou hypersynchrone).

La génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent elle offre aussi la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice.

### I.5.3.3. Principe de fonctionnement

La puissance  $p$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance  $(1 - g)p$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste  $gp$  sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence variable  $gf$  transformées en énergie ayant la même fréquence que celle du réseau, qui est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1 - g)p$ . Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [14].

la différence entre la vitesse mécanique  $\Omega$  et la vitesse dite de synchronisme (imposée par la fréquence du réseau),  $\Omega_s$  est définie par le glissement :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Selon le glissement, les différents modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés comme suit [13] :

#### **I.5.3.3.1. Stationnaire ( $g=1$ )**

C'est le cas où la MADA a un fonctionnement similaire à celui d'un transformateur, le circuit rotorique est la source d'une force électromotrice dont la fréquence est égale à celle du stator qui est directement alimenté par le réseau.

#### **I.5.3.3.2. Hyposynchrone ( $0 < g < 1$ )**

Dans cette cascade, si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme alors la vitesse du glissement sera renvoyée sur le réseau et une partie de la puissance circulant dans le stator sera réabsorbée par le rotor. Et si on fait tourner le rotor dans le même sens que le flux statorique la fréquence varie inversement par rapport à la vitesse du rotor.

#### **I.5.3.3.3. Synchrone ( $g=0$ )**

Dans ce cas la fréquence  $f_r$  du rotor est nulle car sa vitesse mécanique est égale à celle du champ tournant donc il ne y'aura aucune tension induite au rotor.

#### **I.5.3.3.4. Hyper synchrone ( $g < 0$ )**

Une partie de la puissance absorbé par le réseau est convertie en puissance mécanique au niveau du rotor et qui sera transmise au réseau, dans ce cas,  $f_r$  devient négative d'où l'inversion de l'ordre de phase du rotor se qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor.

### **I.5.3.4. Fonctionnement à quatre quadrants [13]**

#### **I.5.3.4.1. Moteur**

- Mode hypo synchrone : la puissance de stator est constante et la puissance du glissement est fournie par le rotor.
- Mode hyper synchrone : la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor qui l'absorbe.

#### **I.5.3.4.2. Générateur**

- Mode hypo synchrone: le stator fourni de l'énergie au réseau et le rotor absorbe la puissance de glissement.

- mode hyper synchrone: le stator fournit une puissance au réseau et la puissance de glissement est récupérée via le rotor qui sera réinjectée au réseau.

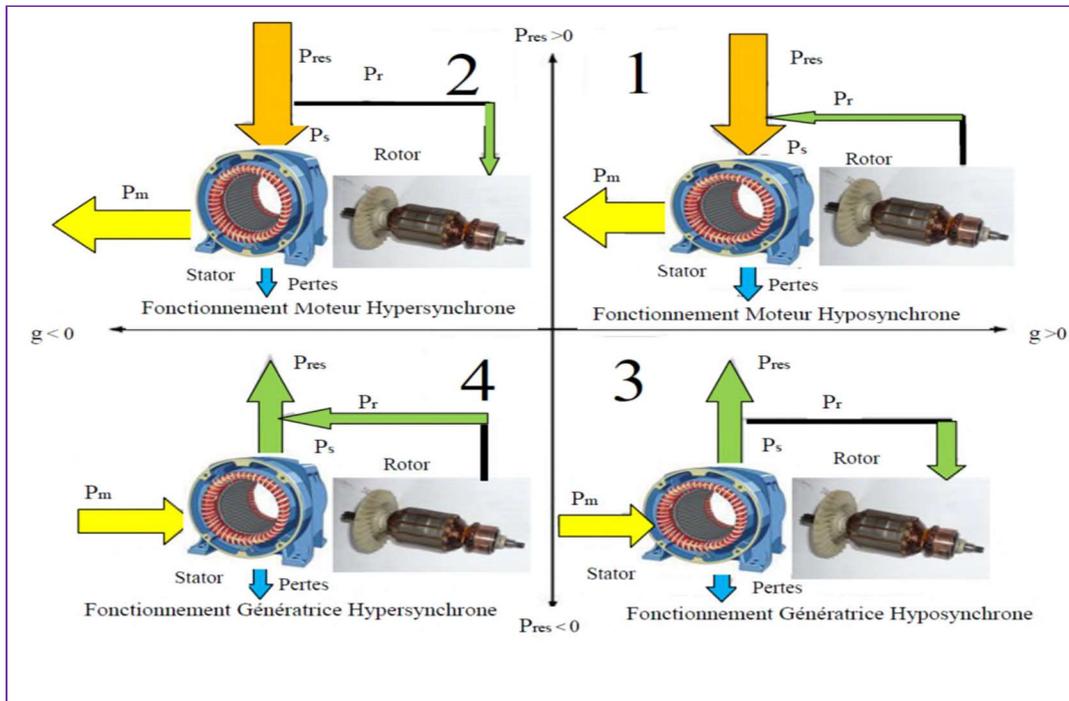


Figure. I.8 : Les modes de fonctionnement de la MADA.

### I.5.3.5. La MADA type brushless [2]

C'est un type qui possède deux sources d'alimentation : une principale triphasée et une auxiliaire monophasée. elle a deux ensembles d'enroulements sur le stator alimentés en courant alternatif et deux enroulements sur le rotor qui sont court-circuités, ce type de moteur ne contient aucun contact glissant (collecteurs/balais ou bagues/balais) donc aucun contact physique entre le stator et le rotor alors pour assurer le transfert de puissance le moteur utilise un système de commutation électronique afin d'alimenter ces enroulements, son fonctionnement est similaire à celui d'un moteur asynchrone standard auquel le circuit électronique permet de contrôler la fréquence et la tension d'alimentation secondaire ce qui permet au moteur de fonctionner à des vitesses variables et de fournir un couple de sortie constant.

### **I.5.3.6. La MADA à énergie rotorique dissipée**

Dans ce cas la source d'alimentation auxiliaire est connectée au rotor via un système de résistance placé à la sortie du redresseur ce qui permet de faire varier l'énergie dissipée qui permet de contrôler la vitesse de rotation de la machine.

### **I.5.3.7. La MADA- structure de kramer**

Cette machine fournit un contrôle amélioré de la vitesse de rotation car la structure de Cramer utilise deux bobines statoriques identiques alimentées par deux sources de courant alternatif et deux bobines rotoriques identiques connectées à une source de courant alternatif distincte, les bobines statoriques et rotoriques sont disposées de manière symétrique. Cette configuration est utilisée afin de réduire les pertes d'énergie dues à la structure des autres systèmes et réduit également les pertes par effet Joule et les pertes magnétiques, ce qui améliore l'efficacité de la machine.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné en premier lieu une description sur les éoliennes auquel et leurs chaînes de conversion d'énergie tout en précisant ses différents composants et leur principe de fonctionnement tout en citant leurs avantages et inconvénients. En second lieu nous avons donné un aperçu sur la classification de ces éoliennes selon quelques critères (Le type de capteur, la connexion au réseau, le mode de fonctionnement, le mode de régulation et la nature de convertisseur électromécanique). Ensuite nous avons directement abordé la notion d'un aérogénérateur à base d'une MADA qui fait l'intérêt de ce travail en donnant une description et l'intérêt ainsi que ces applications dans le domaine des énergies renouvelables ainsi que son principe et ces modes de fonctionnement.

En résumé on peut dire que l'aérogénérateur à base d'une MADA est la technologie la plus utilisée dans les éoliennes modernes puisqu'elle permet l'augmentation de leurs puissances qui offre une meilleure capacité de contrôle de la vitesse de rotation.

Ce type d'éolienne est à la base du travail de modélisation qui va suivre.

**CHAPITRE II**  
**ÉTUDE DE LA CHAÎNE**  
**ÉOLIENNE**

## Introduction

La modélisation d'une éolienne constituée principalement d'une MADA, une turbine et de convertisseurs de puissances est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement surtout lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière, où on considère la partie mécanique et la partie électrique.

Pour la partie mécanique (les pales, le rotor, l'arbre de transmission, le multiplicateur et le générateur) on tient en compte leur géométrie, leur masse, leur flexibilité et leur résistance au vent. Pour le multiplicateur on doit prendre en compte les pertes de transmission et la résistance du système et pour le générateur sa capacité à réguler sa propre vitesse de rotation et les pertes de conversion d'énergie.

Dans ce qui suit on va présenter la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée par un convertisseur et un onduleur commandé en MLI l'un alimente le stator et l'autre le rotor à travers un transformateur, afin de contrôler l'alimentation électrique du rotor on prenant compte leur capacité à convertir l'énergie électrique de courant continu à courant alternatif, et leur capacité à réguler la tension et la fréquence du système.

Le système comprend deux circuits magnétiques couplés, l'un pour le rotor alimenté par la source d'alimentation fixe et l'autre pour le rotor alimenté par le convertisseur à semi-conducteurs qui fournit une alimentation électrique variable à la machine.

Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, les équations de circuit servent à modéliser le flux d'énergie électrique dans le système.

### II.1. Choix de la structure à modéliser

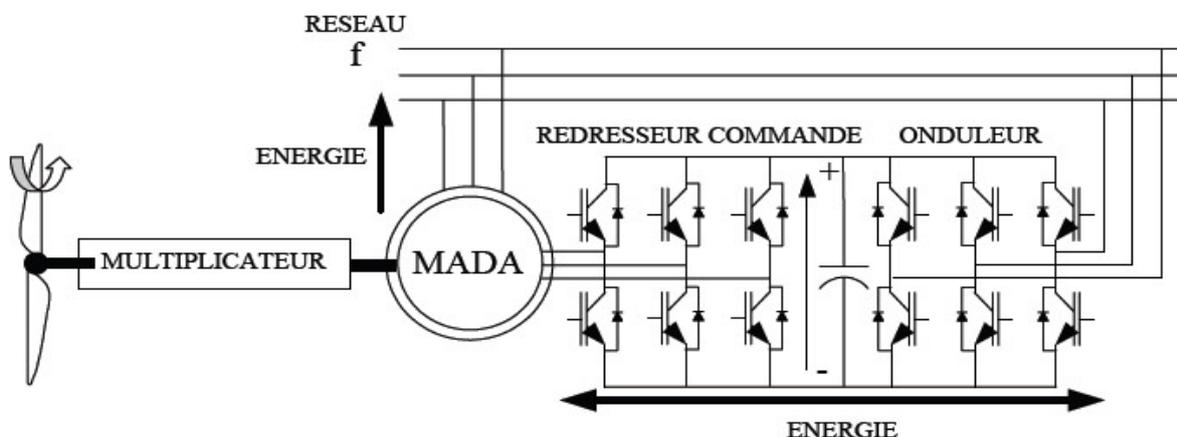


Figure.II.1 : structure à modéliser.

Le schéma représente les différentes étapes de conversion et de contrôle de l'énergie électrique. La partie statorique de la machine est alimentée directement par le réseau électrique et la partie rotorique est alimentée par le convertisseur statique commandé en MLI pour générer une tension alternative triphasée à fréquence variable, le premier est appelé pont diode utilisé pour redresser la tension alternative (AC) du réseau électrique en tension continue (DC). Le deuxième c'est un convertisseur onduleur qui est utilisé pour convertir la tension continue (DC) en tension alternative (AC) variable pour alimenter la partie rotorique de la machine.

## II.2. Modélisation de la partie mécanique

### II.2.1. Hypothèses simplificatrices [15]

On considère que

- Les pâles ont une conception identique et que la vitesse du vent est de répartition uniforme sur toutes les pâles alors nous pouvons les considérer comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- La vitesse de la turbine étant très faible alors les pertes par frottement du rotor sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

### II.2.2. Modélisation de Profil du vent

La modélisation des aérogénérateurs nécessite une connaissance de la variation de la vitesse du vent au cours du temps car ce dernier représente l'entrée du système qu'on étudie et puisqu'il est de nature aléatoire, nous l'avons donc modélisé par une fonction variable dans le temps, donnant une vitesse moyenne de la turbine éolienne de 50km/h, en choisissant les deux modes hyper et hyposynchrone tout en restant dans le régime nominal de la MADA [13].

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps  $V = f(t)$ .

L'équation du vent est donnée comme suit :

$$V(t) = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

$V_0$  : est la composante moyenne.

$A_i, \omega_i, \varphi_i$  : sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

### II.2.3. Choix et modèle de la turbine

La modélisation de la turbine éolienne peut être effectuée à l'aide de différents modèles selon ces aspects et son environnement (modèle de puissance de sortie, modèle aérodynamique, modèle de dynamique des structures, modèle de contrôle de la puissance). Ces modèles peuvent être utilisés individuellement ou en combinaison pour fournir une représentation complète de la turbine éolienne et de son fonctionnement.

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables de longueur  $R$  qui pivotent sur leurs axes d'un angle  $\beta$  et qui sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turb}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$  qui entraîne une MADA [16].

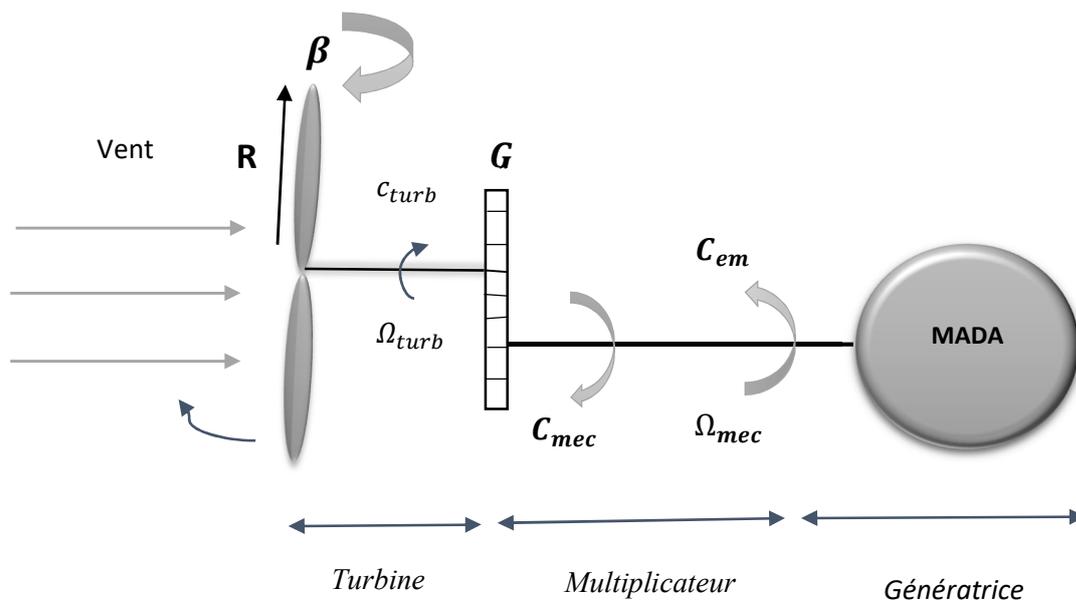


Figure.II.2 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance cinétique du vent incident d'une vitesse  $v$  traversant une surface  $S$  est donnée par [16] :

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

Avec :  $S = \pi R^2$

$\rho$  : est la densité de l'air  $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ .

Le coefficient de puissance  $C_p$  dépend des caractéristiques de la turbine: les dimensions des pales, le ratio (rapport) de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , il caractérise le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. L'expression approximée de ce coefficient a été rapprochée pour une éolienne de 1.5 MW par l'équation suivante [17] :

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14 - 0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.3})$$

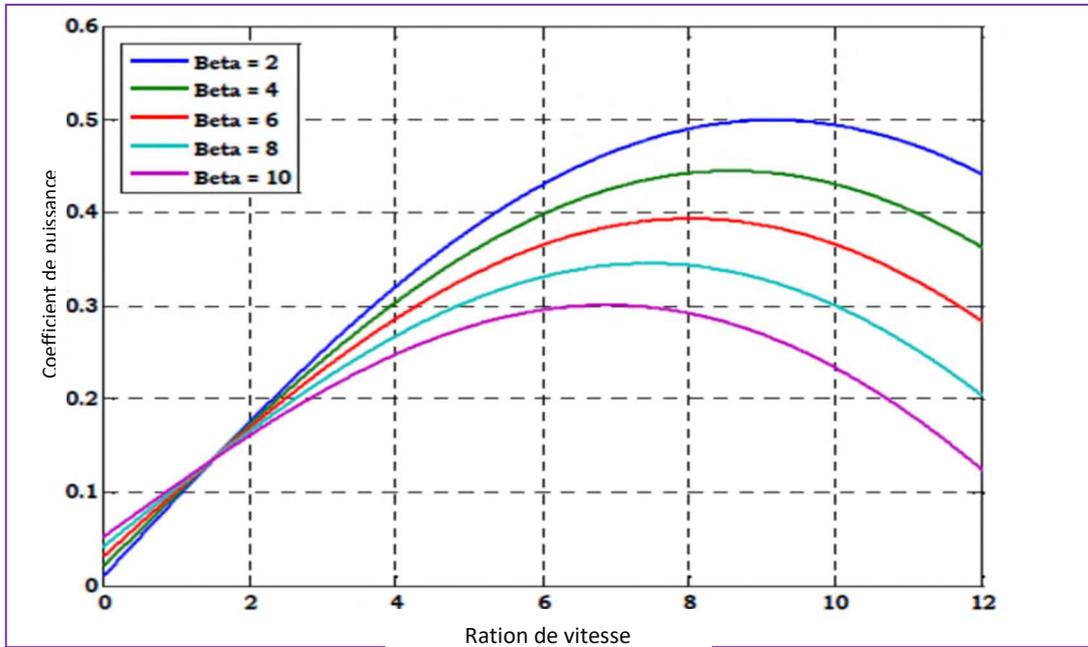


Figure. II. 3 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse et de l'angle d'orientation.

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turb}} \cdot R}{v} \quad (\text{II.4})$$

On définit également le coefficient du couple  $C_m$ , plus pratique pour élaborer les stratégies de commande d'une éolienne, par l'expression suivante [18] [19] :

$$C_m = \frac{C_{\text{turb}}}{\frac{1}{2} \rho S R v^2} \quad (\text{II.5})$$

Où  $C_{\text{turb}}$  est le couple de la turbine éolienne de vitesse  $\Omega_{\text{turb}}$ .

Sachant que la puissance  $P_t$  captée par la turbine est:

$$P_t = C_{turb} * \Omega_{turb} \tag{II.6}$$

Les coefficients  $C_p$  et  $C_{turb}$  sont liés par :

$$C_p = \lambda C_{turb} \tag{II.7}$$

La turbine est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent, sous forme aérodynamique, en énergie mécanique. Le couple aérodynamique, noté  $C_{turb}$  de la turbine est calculé à l'aide de l'expression suivante [20] [21] :

$$C_{turb} = \frac{1}{2\Omega_{turb}} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \tag{II.8}$$

$\Omega_{turb}$  : est la vitesse de la turbine.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine dépend du coefficient de puissance  $C_p$ [16].

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \tag{II.9}$$

### II.2.4. Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur c'est une boîte de vitesse qui permet de multiplier la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée en une vitesse plus élevée à l'arbre de sortie de l'éolienne pour atteindre la vitesse optimale de la génératrice tout en réduisant le couple. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain de vitesse  $G$  [16].

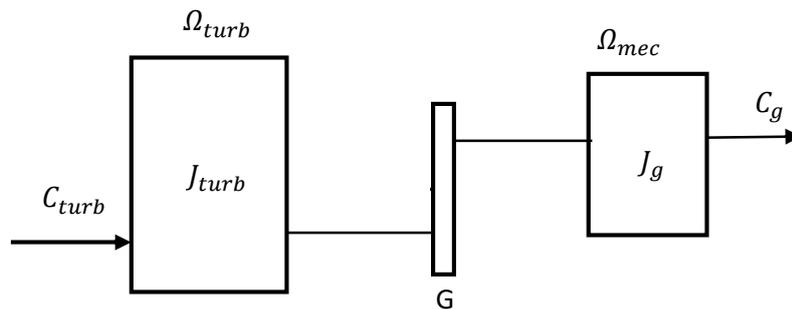


Figure. II. 4 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

Les équations suivantes permettent de modéliser mathématiquement le multiplicateur de vitesse en utilisant le principe de conservation des puissances mécaniques échangées entre la turbine et la génératrice :

$$C_g = \frac{C_{turb}}{G} \quad (II.10)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turb} \quad (II.11)$$

Avec :

$C_g$  : Couple moteur issu du multiplicateur.

$C_{turb}$  : Couple de la turbine.

$G$  : Gain du multiplicateur.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation du générateur.

$\Omega_{turb}$  : Vitesse de rotation de la turbine.

### II.2.5. Équation dynamique de l'arbre de transmission

L'inertie totale du modèle mécanique proposé est composée de deux parties : l'inertie de la turbine, qui inclut la masse des pales et la masse du rotor de la turbine, et l'inertie de la génératrice. Cette inertie totale est représentée par  $J_{total}$  et elle est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turb}$ .

$$J_{total} = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_g \quad (II.12)$$

On suppose que l'inertie de l'arbre de la génératrice est insignifiante par rapport à l'inertie de la turbine réduite à son axe de rotation. En utilisant le principe fondamental de la dynamique, on étudie l'évolution de la vitesse mécanique de la génératrice en fonction du couple mécanique appliqué au rotor.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.13)$$

Le couple mécanique  $C_{mec}$  est exprimé en fonction du couple électromagnétique  $C_{em}$  généré par la génératrice, du couple de frottement visqueux  $C_{vis}$  et du couple moteur provenant du multiplicateur  $C_g$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.14)$$

Tel que :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.15)$$

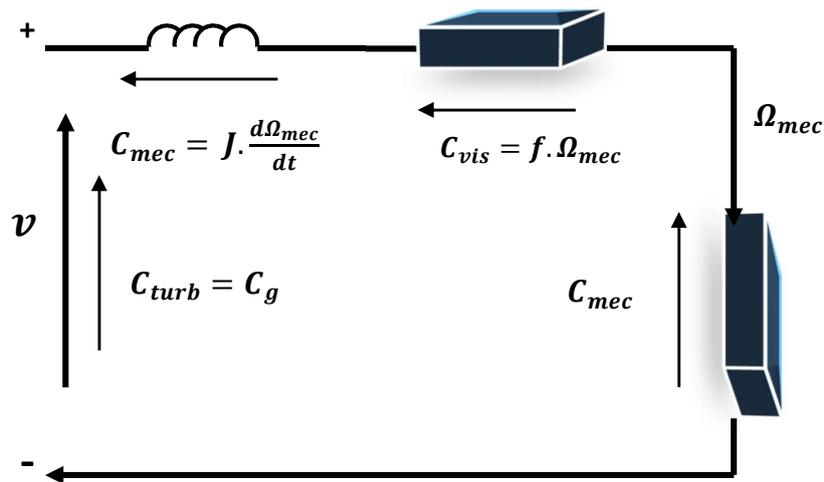


Figure II.5: Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne [22]

L'équation dynamique de l'arbre est donné par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + F\Omega_{mec} = C_g - C_{em} \quad \rightarrow \quad (JS + F)\Omega_{mec} = C_g - C_{em} \quad (II.16)$$

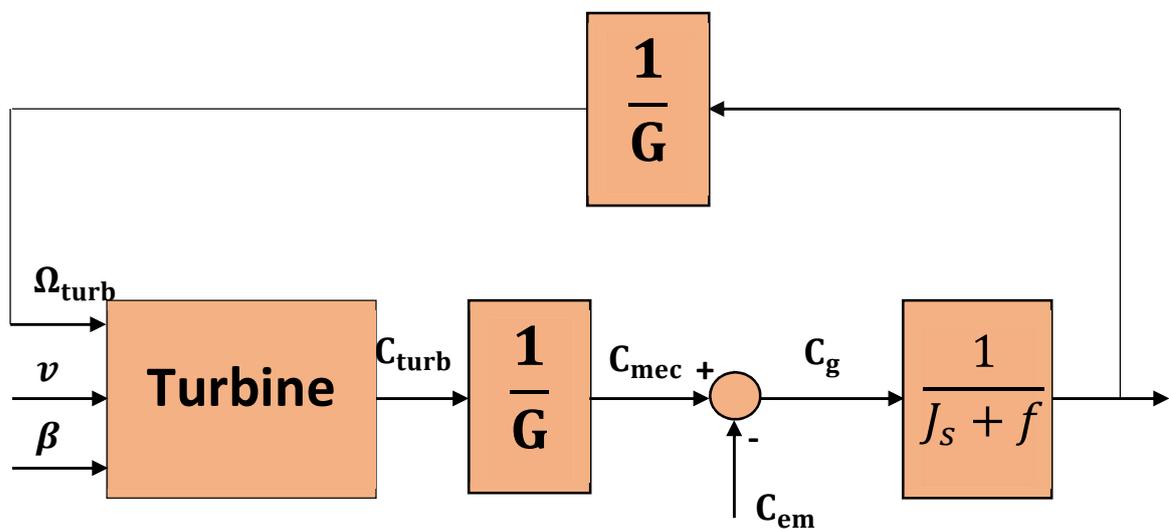


Figure II.6. Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la

génératrice. Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle d'orientation des pales.
- Le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système [22].

## II.2.6. Stratégies de commande de la turbine éolienne

La variabilité de la vitesse du vent a pour conséquence une variation de la puissance extraite, ainsi pour optimiser le captage de l'énergie éolienne on a eu recours à l'ajustement de la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent en modifiant l'angle de calage en permanence pour avoir un angle d'incidence optimal.

### II.2.6.1. Extraction du maximum de puissance (MPPT) [13]

Une éolienne doit permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela qu'on parle de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT: Maximum Power Point Tracking).

Cette méthode consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir la puissance générée maximale et cela à travers le contrôle du couple électromagnétique et, par conséquent, la puissance électromagnétique afin de réguler la vitesse mécanique.

Il existe deux principales stratégies de contrôle :

- La stratégie de contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.
- La stratégie de contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique : cette stratégie est la plus utilisée, elle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent puisqu'il est difficile de mesurer avec précision la vitesse du vent dans la pratique. Ceci s'explique par deux raisons :
  - L'anémomètre est généralement positionné à l'arrière du rotor de la turbine, ce qui fausse la mesure de la vitesse du vent.
  - En raison du grand diamètre de la surface balayée par les pales (typiquement 70 m pour une éolienne de 1,5 MW), le vent peut varier considérablement en fonction de la hauteur à laquelle se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à une mesure locale de la vitesse du vent qui ne

représente pas de manière adéquate sa valeur moyenne sur l'ensemble des pales [13].

Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, nous obtenons une équation statique décrivant le régime permanent de la turbine

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.17)$$

En considérant le couple mécanique développé comme étant nul, cela revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} = 0$ ). Par conséquent, nous obtenons :

$$C_{em} = C_g \quad (II.18)$$

Le réglage du couple électromagnétique de référence est calculé en se basant sur une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{turb-est}}{G} \quad (II.19)$$

On calcule une estimation de la vitesse de la turbine,  $\Omega_{turb-est}$  en se basant sur la mesure de la vitesse mécanique.

$$C_{turb-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turb-est}} \cdot v_{vent-est}^3 \quad (II.20)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{turb-est}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turb-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.21)$$

La mesure de la vitesse de vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent-est} = \frac{\Omega_{turb-est} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (II.22)$$

L'expression du couple de référence peut se mettre donc sous la forme suivante :

$$C_{em-r} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.23)$$

Tel que :

$$A = \frac{C_{p-m}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2G^3} \quad (II.24)$$

La représentation sous forme de schéma blocs est montrée à la figure suivante :

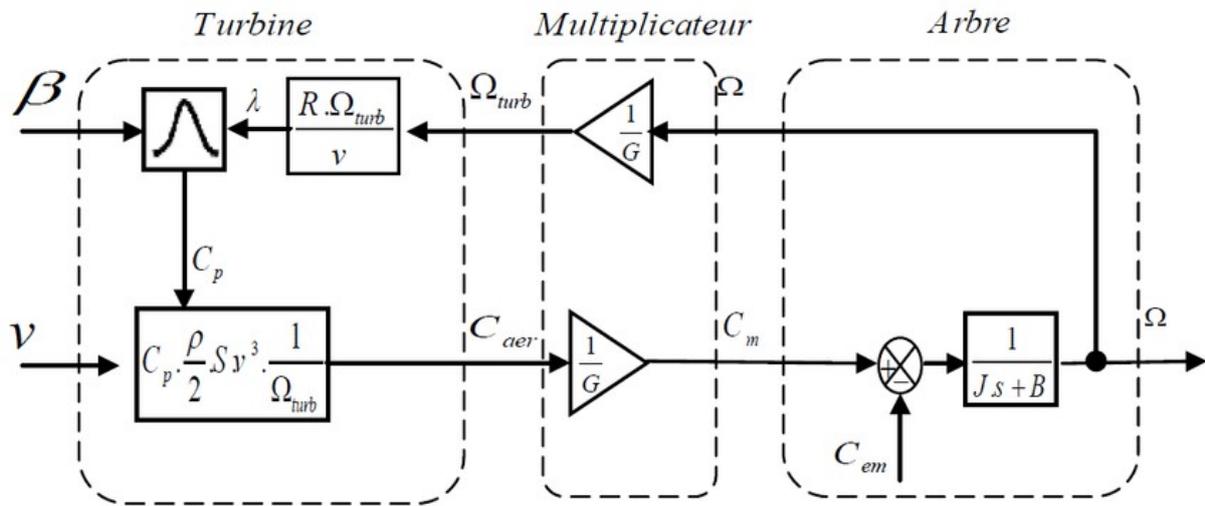


Figure II.7: Schéma bloc de maximisation de la puissance extrait

### II.2.6.2. Schéma bloc de la turbine en MPPT

En utilisant les équations précédentes, on peut déduire le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine avec MPPT. Ce schéma est représenté sur la figure suivante.

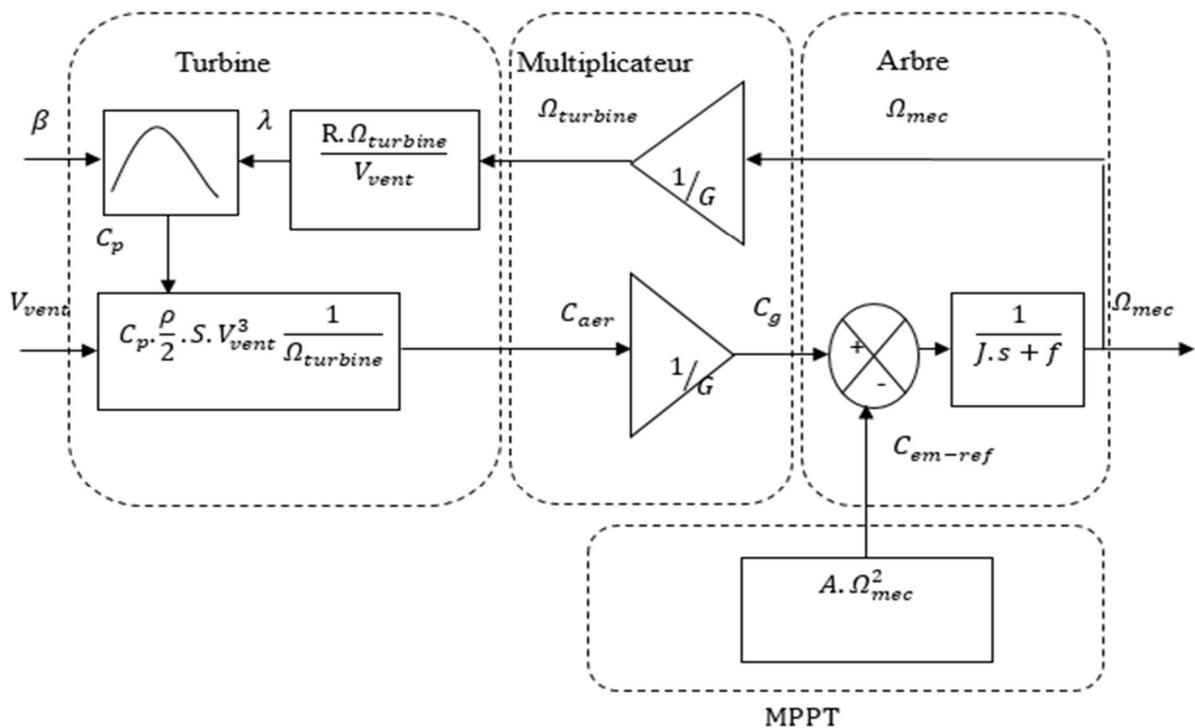


Figure II.8: Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT

## II.2.6.3. Différentes zones de fonctionnement

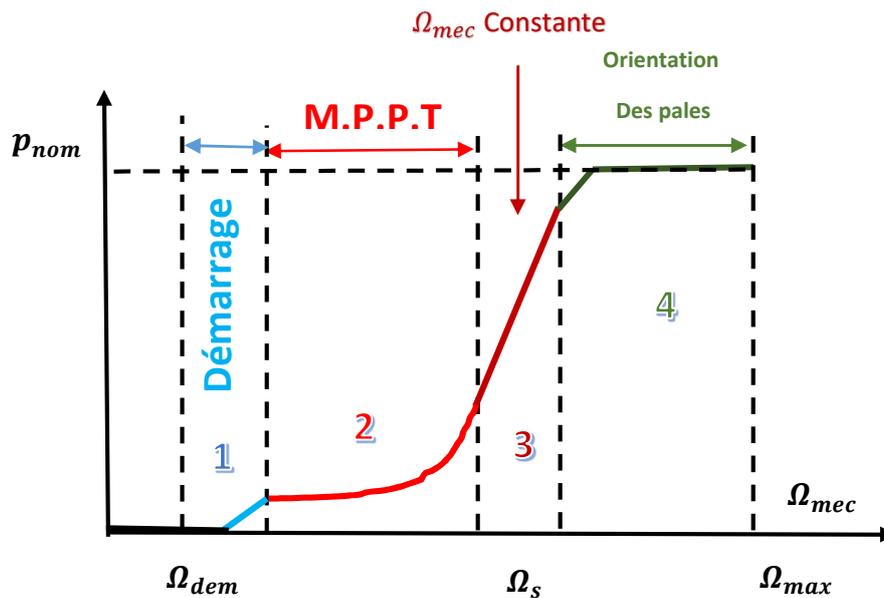


Figure.II.9 : les quatre zones de fonctionnement de la turbine

- La première zone (phase de démarrage): dans cette phase la vitesse du vent est insuffisante pour faire tourner les pales à leur vitesse nominale. L'éolienne utilise alors un moteur électrique pour amorcer la rotation des pales jusqu'à ce que la vitesse mécanique soit supérieure à un certain seuil [16].
- Dans la deuxième zone l'angle des pales reste constant, tandis que le contrôle de la production d'énergie électrique est ajusté pour maximiser la production d'énergie en fonction de la vitesse du vent. Ceci est réalisé grâce au principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Dans cet intervalle, la courbe de production d'énergie électrique suit une augmentation rapide et continue [23].
- Dans la troisième zone, lorsque la vitesse du vent atteint une valeur optimale, l'éolienne tourne à sa vitesse nominale constante et la production d'énergie est maximale. À ce stade, la génératrice de l'éolienne est capable de produire jusqu'à 90% de sa puissance nominale, ce qui permet une production d'énergie stable et efficace [16].
- La quatrième zone, correspond à la phase où l'éolienne atteint sa puissance nominale  $p_{nom}$  et où une limitation de la puissance générée est mise en place à l'aide du système d'orientation des pales (pitch control). Si la vitesse du vent dépasse la limite de sécurité de l'éolienne, appelée  $\Omega_{max}$ , un dispositif d'urgence est activé pour éviter toute rupture mécanique [16].

### II.2.7. Système d'orientation des pales

Les éoliennes à vitesse variable utilisent un système d'orientation des pales qui sert à limiter la puissance générée tel que la pale se fait tourner par le dispositif de commande 'pitch control' et cela modifie les performances de la turbine (le coefficient de puissance). Les pales sont face au vent en basses vitesses et qui s'inclinent après à des fortes vitesses du vent pour dégrader le coefficient de puissance et qui atteignent la position en drapeau à vitesse maximale [24].

Pour un système de conversion plus efficace et pour un maximum de rendement de l'hélice l'angle de calage des pales  $\beta$  est adapté en permanence.

## II.3. Modélisation de la partie électrique

### II.3.1. Hypothèses simplificatrices

La répartition des enroulements et la géométrie propre de la MADA sont très complexes, donc pour l'analyser on doit prendre en compte sa configuration exacte. En effet, pour établir un modèle simple la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices qui sont [25] :

- La machine est de constitution symétrique, elle est connectée à un système de tension triphasée équilibrée d'où les grandeurs homopolaires seront considérées nulles.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Les pertes par hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé pour considérer les courants et les flux comme fonctions linéaires, et qu'il est parfaitement feuilleté au stator et au rotor et que la densité du courant est considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases au stator et au rotor est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes du rotor et du stator.

**II.3.2. Modèle de la machine (MADA) dans le plan ABC**

Dans une machine asynchrone à rotor bobiné ou les tensions triphasées rotoriques ne sont pas nulles, les enroulements du stator (A, B, C) sont parallèles à ceux du rotor et déphasés l'un par rapport à l'autre de 120°

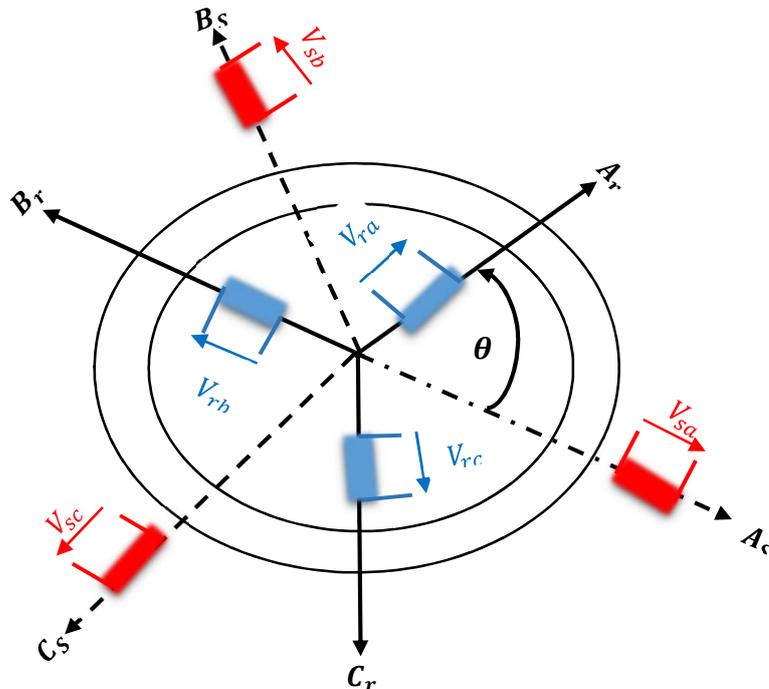


Figure. II. 10 : Représentation schématique de la MADA.

**II.3.2.1. Equations électriques de la machine**

Pour l'obtention des équations de la machine nous allons appliquer la loi de Faraday aux bornes des enroulements du stator et du rotor, et en utilisant la notation matricielle les équations des tensions électriques peuvent être exprimées comme suit :

$$[V_s] = [R_s] * [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{II.25}$$

$$[V_r] = [R_r] * [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \tag{II.26}$$

Tel que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec :

$[V_s], [V_r]$ : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[R_s], [R_r]$  : Matrices de Résistances du stator et du rotor.

$[I_s], [I_r]$  : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[\varphi_s], [\varphi_r]$  : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

### II.3.2.2. Equations magnétiques

Il est possible d'exprimer les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Tel que :

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

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$L_s, L_r$  : Inductances propres d'une phase du stator et du rotor respectivement.

$M_s M_r$ : Inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

$M_{sr}, [M_{sr}]^t$ : Maximum des inductances mutuelles entre une phase du stator et rotor.

En remplaçant les équations des flux statoriques et rotoriques respectivement dans les équations des tensions électriques, nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_s] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (\text{II.29})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_r] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (\text{II.30})$$

### II.3.2.3. Équation mécanique de la machine

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.31})$$

Il est extrêmement difficile d'effectuer une résolution analytique dans ce repère car le système d'équations présente des coefficients qui varient en fonction de  $\theta$ , qui est l'angle de rotation de la machine.

### II.3.3. Modèle de la (MADA) dans le plan dq

La résolution analytique dans le repère (abc) est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$  (angle de rotation électrique de la machine) on applique alors une transformation de Park pour la résolution d'un tel système qui permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

#### II.3.3.1. La transformation de Park

La méthode de Park est une technique de transformation de coordonnées qui consiste en une conversion triphasée-biphasée suivie d'une rotation. Cette technique permet de passer d'un système de coordonnées fixes (abc) à un système de coordonnées mobiles (dq), en utilisant un angle de rotation appelé "angle de Park". Le système de coordonnées fixes (abc) est immobile par rapport au système des coordonnées initiales (abc), tandis que le système des coordonnées mobiles (dq) forme un angle avec le système de coordonnées fixes (abc) [25].

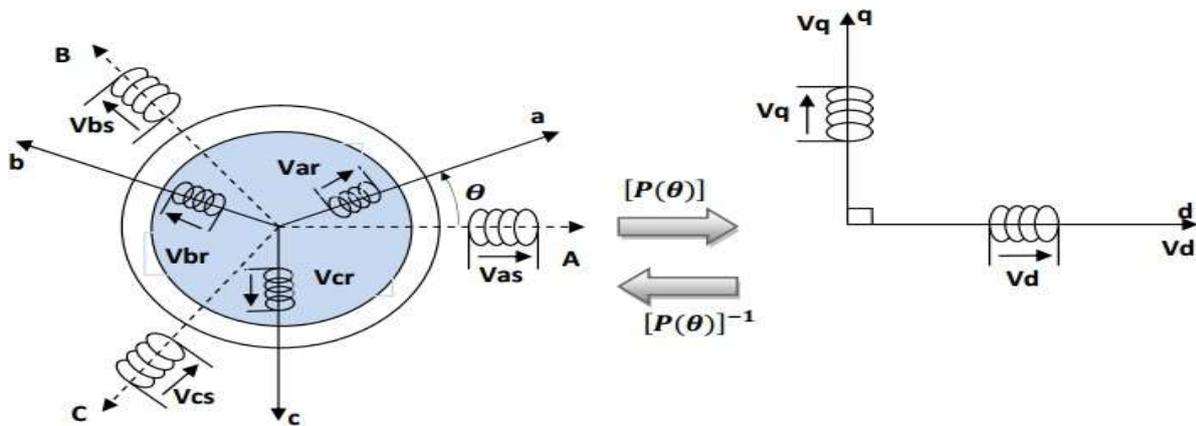


Figure. II.11: Représentation de la MADA dans le repère (dq)

On utilise la matrice de passage direct (matrice de Park) pour arriver aux équations précédentes dans le plan dq en appliquant la relation :

$$[X]_{dq} = [P(\theta)][X]_{abc} \tag{II.32}$$

Tel que :

$$P[(\theta)] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.33}$$

$[P(\theta)]$  : matrice de transformation de Park.

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons  $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$ .

Pour les grandeurs statoriques:  $\theta = \theta_s$ .

Et pour les grandeurs rotorique :  $\theta = \theta_s - \theta_r$ .

On utilise maintenant la matrice de passage indirect (matrice de Park inverse) pour arriver aux équations précédentes dans le plan abc en appliquant la relation ci-après :

$$[X]_{abc} = [P^{-1}(\theta)][X]_{dq} \quad (\text{II.34})$$

Tel que :

$$P[(\theta)]^{-1} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

### II.3.4. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

La modélisation dans le repère de Park est basée sur les équations de flux et de tension de la machine. Les équations de flux sont exprimées dans le repère dq, tandis que les équations de tension sont exprimées dans le repère triphasé.

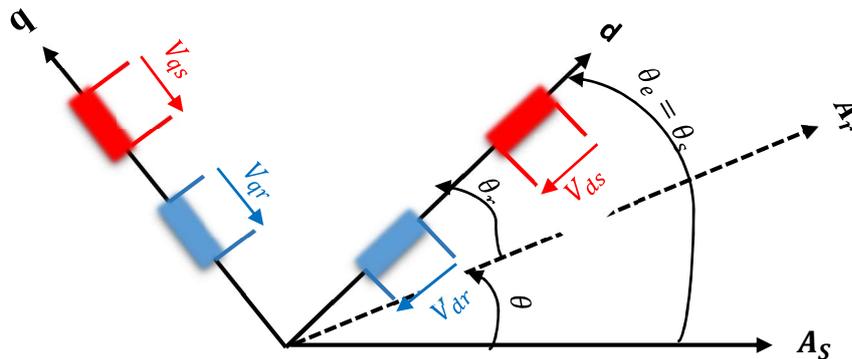


Figure.II.12 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

Le modèle de la MADA dans le repère de Park est donc exprimé par les équations suivantes :

#### II.3.4.1. Les équations des tensions

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

### II.3.4.2. Les équations de flux

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

$l_s = L_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique de la machine.

$l_r = L_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : Inductance magnétisante la machine.

$M_{rs}$  : Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

### II.3.4.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction des inductances cycliques, des flux et du nombre de paires de pôles  $p$  de la machine par la relation :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{l_s} \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qr} - \Phi_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (\text{II.39})$$

### II.3.5. Choix du référentiel

Les équations de la machine peuvent être formulées dans trois référentiels différents en fonction de la position des axes par rapport à la machine elle-même. On peut distinguer trois référentiels [26] :

#### II.3.5.1. Référentiel lié au stator

Ce référentiel est utilisé lors d'une grande variation de la vitesse de rotation :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \omega_m \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \omega_m \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

### II.3.5.2. Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est utilisé dans le cas des régimes transitoires où la vitesse de rotation reste constante.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

### II.3.5.3. Référentiel lié au champ tournant

Nous avons choisi ce référentiel en supposant que la fréquence d'alimentation est constante, c'est pourquoi nous l'avons retenu.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Dans notre cas, nous avons opté pour le système d'axe (dq) lié au champ tournant, car il est particulièrement adapté aux machines asynchrones à double alimentation. Ce choix nous permet de transformer les grandeurs variables en grandeurs continues, ce qui simplifie les calculs. De plus, le choix du référentiel est basé sur la stratégie de commande et les grandeurs à contrôler.

## II.3.6. Modélisation de l'interface d'électronique de puissance

### II.3.6.1. Modèle des convertisseurs statiques

Les convertisseurs examinés dans notre étude sont des convertisseurs parallèles double PD3, qui sont composés des IGBT et des diodes montées en antiparallèle, et qui sont commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales [27] :

- Ils permettent le transfert bidirectionnel de la puissance du glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet un fonctionnement en mode hyposynchrone ou hypersynchrone de la machine.
- Ils génèrent moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique en termes de propagation de courants harmoniques.

Pour simplifier le modèle de ces convertisseurs, on peut supposer que les interrupteurs (IGBT et diode) sont parfaits. La figure (II.13) représente un onduleur de tension alimenté par une tension continue  $u$ .

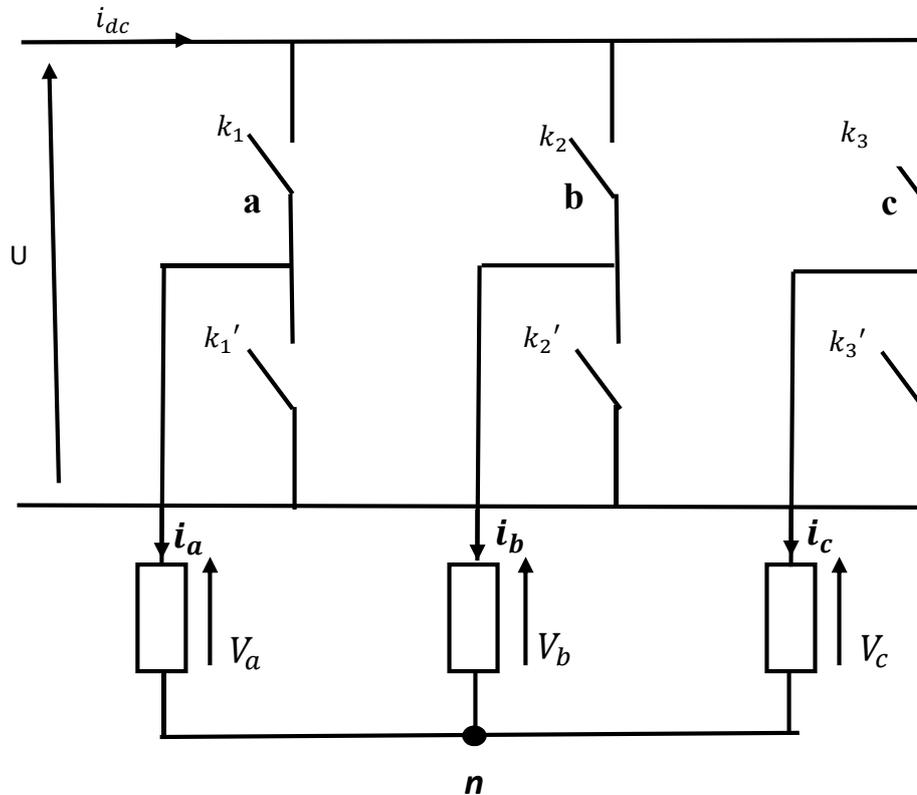


Figure.II.13. Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } K_i \text{ est fermé} \\ S_i = 0 \text{ si } K_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$\begin{cases} S'_i = 1 \text{ si } K'_i \text{ est fermé} \\ S'_i = 0 \text{ si } K'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction  $F_i$ , avec ( $i=1,2,3$ ) tel que :

$$F_i = (S_i - S'_i) = \begin{cases} +1 \text{ si } S_i = 1 (S'_i = 0) \\ -1 \text{ si } S_i = 0 (S'_i = 1) \end{cases}$$

Les tensions  $V_a, V_b, V_c$  sont exprimées par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Avec  $F_1, F_2, F_3$  : les fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

### II.3.6.2. La commande MLI de l'onduleur

L'objectif de la commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI) consiste à réduire les harmoniques dans les courants produits par le convertisseur [28]. La technique la plus courante pour générer un signal MLI est de comparer un signal triangulaire, appelé porteuse de haute fréquence, à un signal de référence, appelé signal modulant, qui représente l'énergie du signal à la sortie de l'onduleur [29].

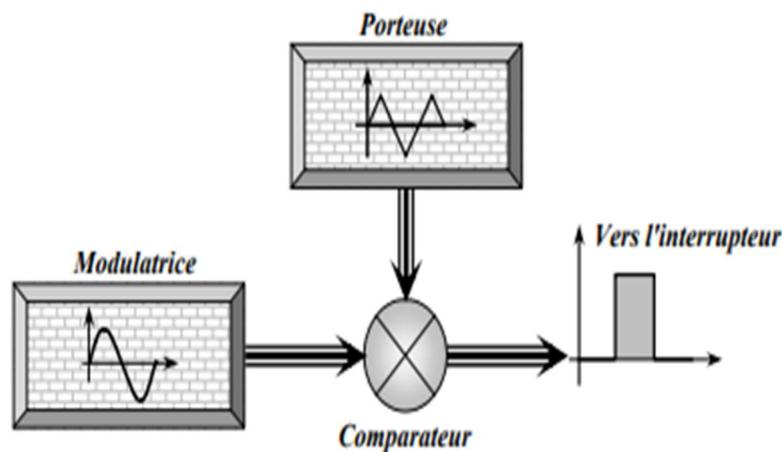


Figure.II.14 : Schéma synoptique de la MLI.

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) implique deux paramètres principaux :

- **L'indice de modulation** : c'est la division de la fréquence de l'onde porteuse par celle de l'onde modulante :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.44})$$

- **Le coefficient de réglage** : est la proportion entre l'amplitude de l'onde modulante et celle de l'onde porteuse. En utilisant ce coefficient, il est possible de calculer l'amplitude du signal fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion.

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.45})$$

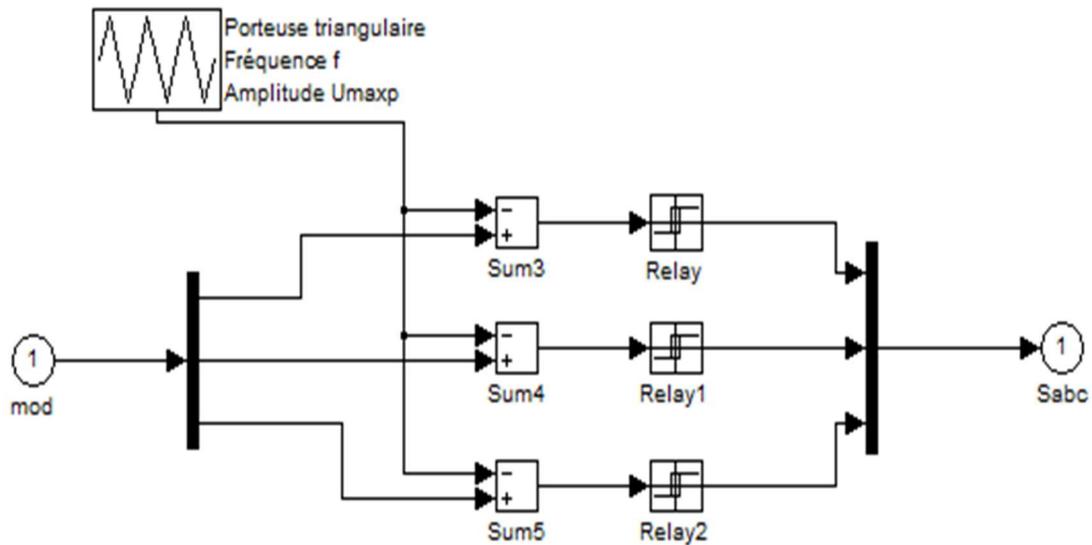


Figure. II.15 : Schéma de principe de principe de la MLI.

### II.3.7. Modélisation du bus continu

Les deux convertisseurs statistiques sont reliés à l'intermédiaire d'un bus continu comme illustré dans la figure suivante [30].

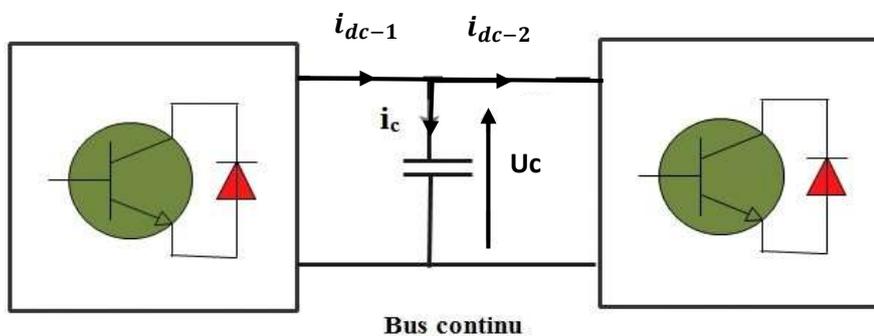


Figure. II.16 : Schéma du bus continu.

La tension du bus continu est obtenue par l'intégration du courant circulant dans le condensateur. On a [30]:

$$\frac{duc}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_c \tag{II.46}$$

Avec :  $i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2}$

On obtient :

$$U_c(t) = U_0 + \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \tag{II.47}$$

Avec :

$U_0$  : la tension initiale de condensateur.

#### II.4. Les expressions des puissances

Les expressions des puissances active et réactive sont données comme suit :

$$\begin{cases} P_{\text{res}} = P_s + P_r \\ Q_{\text{res}} = Q_s + Q_r \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

La puissance mécanique optimale de la turbine est donnée par :

$$P_{\text{mec-opt}} = C_{\text{em-ref}} \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II.49})$$

La référence de puissance est donnée comme suit :

$$P_{\text{res-ref}} = -\eta \cdot P_{\text{mec-opt}} \quad (\text{II.50})$$

$\eta$  : le rendement de la MADA.

#### Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation du système éolien plus précisément le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation avec les modèles du vent, la turbine, le multiplicateur et l'arbre de transmission. Par la suite on a introduit le modèle de la MADA dans le repère ABC et puis dans le repère dq ou on a appliqué la transformation de Park pour rendre le système linéaire et plus adapté à la commande. Ensuite, on a modélisé le redresseur. Pour lequel, on a appliqué la technique de la MLI pour le commander. L'étude va traiter la commande vectorielle de la machine et exploiter au mieux l'énergie disponible par le vent en cherchant le point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT).

**CHAPITRE III**  
**STRATÉGIE DE COMMANDE**  
**ET SIMULATION**

**Introduction**

Nous nous attachons dans ce chapitre à présenter en premier lieu la commande vectorielle de la MADA basée sur l'orientation du flux statorique avec le contrôle des puissances active et réactive statoriques. Les enroulements rotoriques sont alimentés par un convertisseur d'électronique de puissance qui permet de donner différentes stratégies de commande.

La Commande d'une telle machine est difficile à cause de couplage existant entre les paramètres. Sachant que la machine à courant continu à excitation séparée présente l'avantage de la simplicité de sa commande et pour obtenir un comportement semblable de notre machine, il est nécessaire d'assurer le découplage entre les grandeurs statoriques et rotoriques. C'est l'idée de l'apparition de la technique de la commande vectorielle.

**III.1. Principe de contrôle vectoriel à flux orienté [32][13]**

En parlant d'orientation du flux, c'est plutôt le système d'axe (dq) que l'on oriente de manière à ce que l'axe (d) soit en phase avec le flux, Pour cela, on peut régler ce dernier par une composante du courant statorique ou rotorique ( $i_{ds}$  ou  $i_{dr}$ ), et le couple par l'autre composante ( $i_{qs}$  ou  $i_{qr}$ ). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

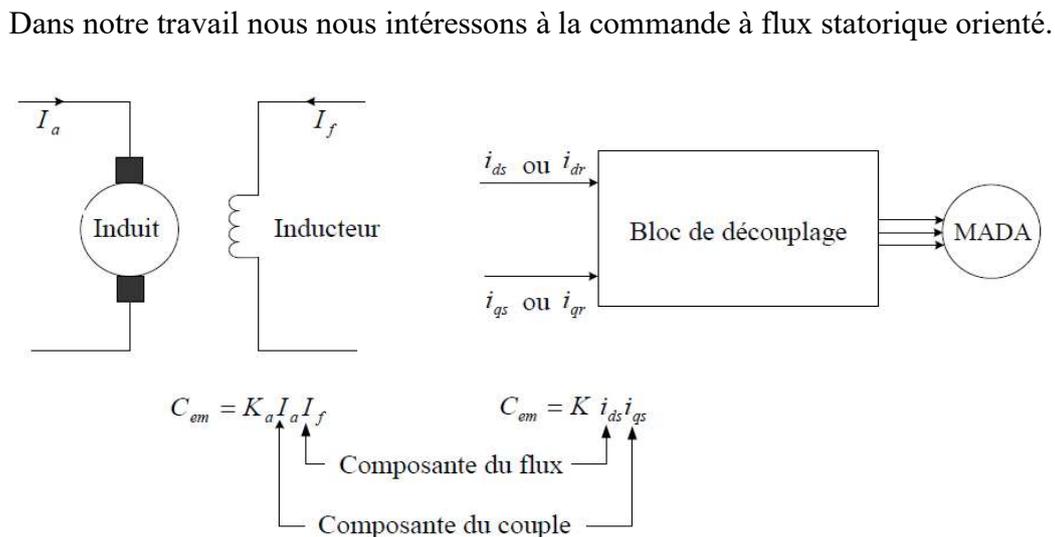


Figure.III.1 : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.



$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

### III.3. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique[2]

On rappelle d'abord l'ensemble d'équations différentielles du système de la machine sans orientation du flux statorique du chapitre II.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d(\varphi_{ds})}{dt} - \omega_s (l_s I_{sq} + M I_{rq}) \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d(\varphi_{qs})}{dt} + \omega_s (l_s I_{sd} + M I_{rd}) \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d(\varphi_{dr})}{dt} - (\omega_s - \omega_m) (l_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d(\varphi_{qr})}{dt} + (\omega_s - \omega_m) (l_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

On s'aperçoit que si on élimine le deuxième produit ( $\varphi_{qs} I_{dr}$ ) de l'expression du  $C_{em}$  alors le Couple ressemblerait fort à celui d'une MCC. L'expression du couple électromagnétique de l'équation (II.39) devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{l_s} \cdot (\varphi_s \cdot I_{qr}) \quad (\text{III.3})$$

Les puissances actives et réactives statoriques sont données par :

$$\begin{cases} p_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Dans l'hypothèse où le flux  $\varphi_{sd}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q.

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

$$\omega_r = \omega_s - p\omega \quad (\text{III-5})$$

Dans le repère triphasé abc la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad (\text{III-6})$$

Ou :  $n = a, b, \text{ ou } c$

Pour les machines de moyenne et de forte puissance utilisées dans les éoliennes on met en évidence l'hypothèse simplificatrice auquel on néglige la résistance statorique la relation devient donc :

$$V_{sn} = \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad (\text{III-7})$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur des tensions statoriques et qu'il est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  sur ce même vecteur.

Dans l'hypothèse d'un réseau stable ayant pour tension  $v_s$ , le flux  $\varphi_s$  est constant.

Les équations électriques au stator s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}$$

Puisque la résistance statorique est négligée l'équation devient donc :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}$$

Ce qui montre que le vecteur tension statorique est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au flux.

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

### III.4. les expressions des courants statoriques en fonction des courants rotoriques

On peut écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{l_s} - \frac{M}{l_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{l_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

### III.5. les expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques

A partir des équations (II.36) et (II.38) nous avons :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

A partir de cette dernière équation et l'équation (II-33) il en découle alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les tensions à imposer au rotor de la machine pour obtenir les courants voulus et par conséquent les puissances à commander. Les expressions trouvées nous renseignent sur l'existence d'un couplage entre les deux axes d et q. Afin d'aboutir à une commande performante, il faut au préalable réaliser un découplage entre les deux axes.

### III.6. Les expressions des puissances actives et réactive statoriques en fonction des courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Les simplifications effectuées dans notre cas ( $V_{ds} = 0$ ) donne :

$$\begin{cases} p_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

En remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions données par l'équation (III-10) dans ces équations des puissances on aboutit à :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{MV_s}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

On a :  $V_s = \omega_s \varphi_s$

Donc :  $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$

L'expression de la puissance active et réactive devient alors :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

### III.7. Reconstitution des tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature

Il existe plusieurs techniques pour éliminer l'effet de l'entrée à une sortie

- ✓ Découplage par compensation.
- ✓ Découplage utilisant un régulateur.
- ✓ Découplage par retour d'état.

Nous nous intéressons au découplage par compensation pour cela on définit deux nouvelles variables de commande  $V_{dr1}$  et  $V_{qr1}$  avec :

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{dr1} - e_{dr} \\ V_{qr} = V_{qr1} - e_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

$e_{dr}, e_{qr}$  sont des tensions de compensation sur les axes d et q d'expressions :

$$\begin{cases} e_{dr} = \omega_r I_{rq} \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) \\ e_{qr} = -g \frac{M}{l_s} V_s - \omega_r I_{rd} \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) \end{cases} \quad \text{(III-18)}$$

Les expressions précédentes peuvent être utilisées directement pour effectuer la commande vectorielle à flux statorique orienté des machines asynchrones alimentées en tension. Il est important de noter que les variables  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  ont une influence sur à la fois  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$ , ce qui affecte la puissance active et réactive du stator. Le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation est représenté dans la figure ci-dessous :

Les équations (III-12) permettent d'établir le schéma bloc du système à réguler

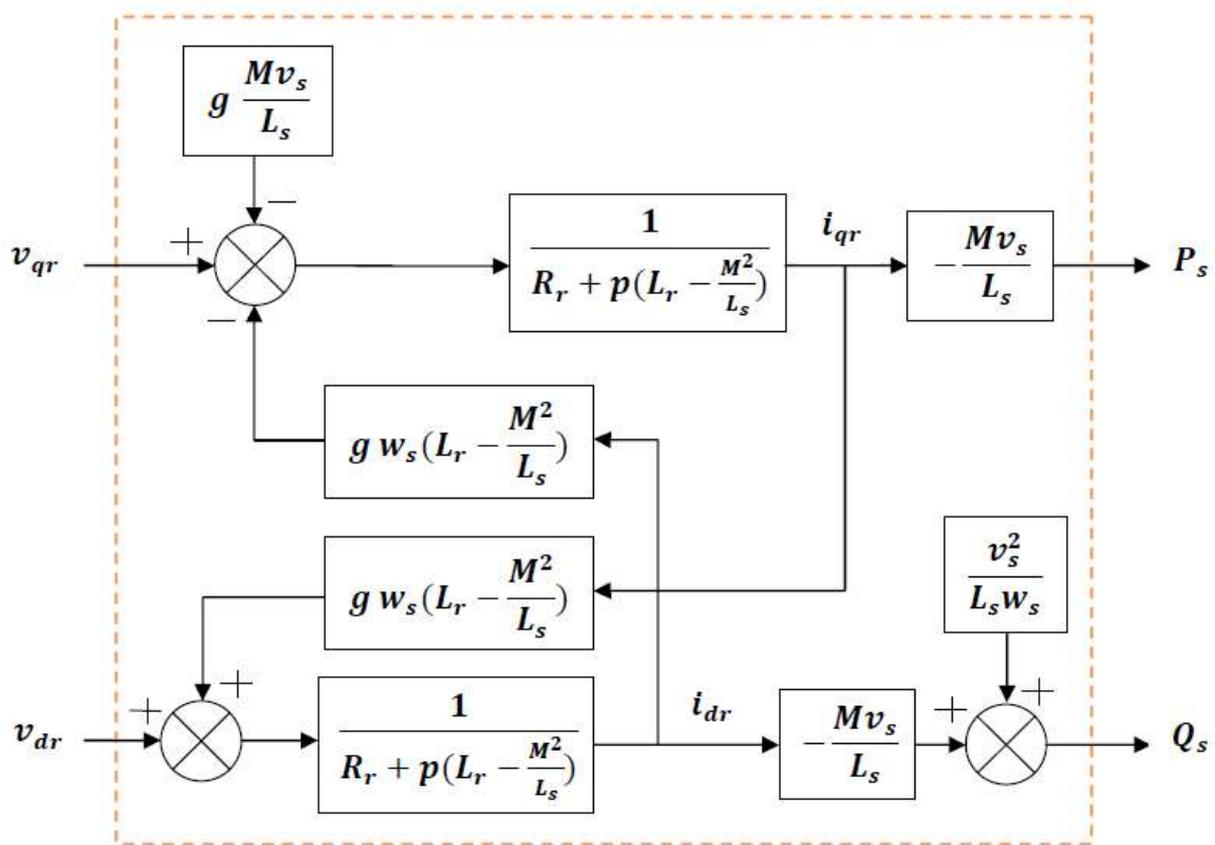


Figure.III.3 : Schéma bloc du système à réguler du modèle simplifié de la MADA.

Ce schéma présente des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes qui relient les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. De plus, il démontre la possibilité de mettre en place une commande vectorielle en raison de la capacité à contrôler chaque axe indépendamment, avec son propre régulateur, en tenant compte des influences des couplages. Les références de ces régulateurs seront les suivantes : la puissance active pour l'axe

q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue à zéro afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire du côté du stator, ce qui optimisera la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra être ajustée pour maintenir le coefficient de puissance de l'éolienne à son niveau optimal [2].

### III.8. Mise en place de la régulation

Dans cette section, nous allons présenter la régulation des puissances actives et réactives, en utilisant les équations précédentes, il a été mis en évidence le lien entre la puissance active et la tension  $V_{qr}$  et entre la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$ . Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbations qui sont présent dans le schéma suivant :

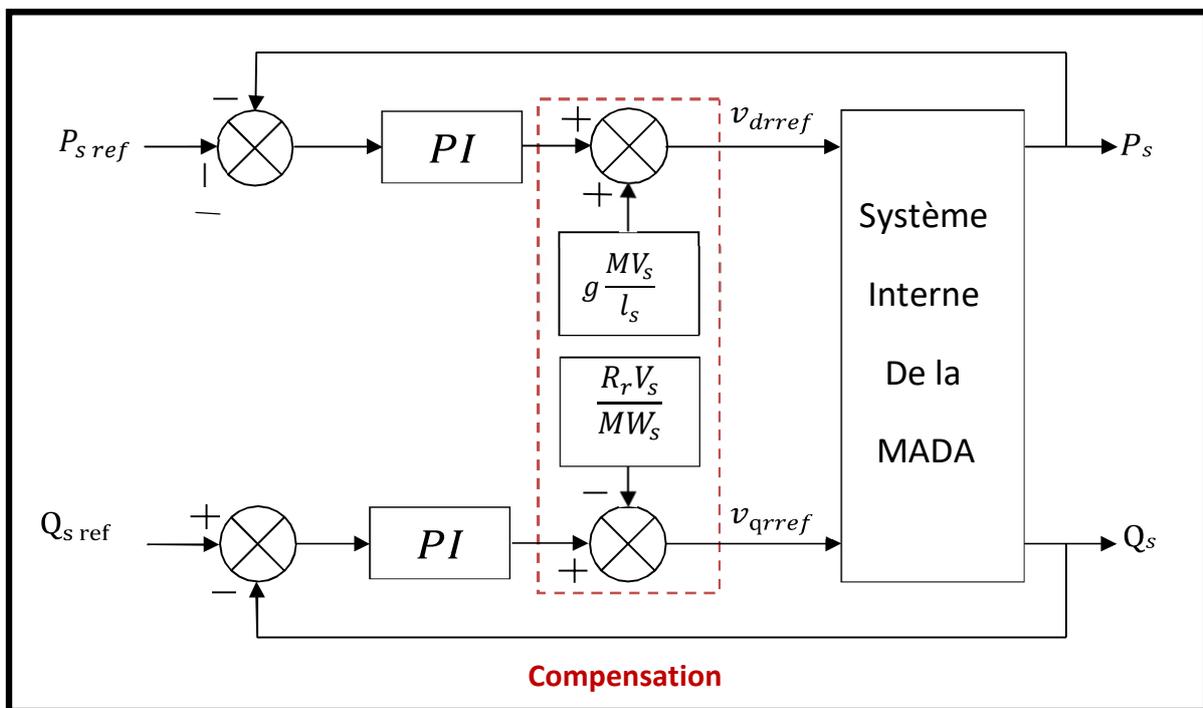


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande directe.

#### III.8.1.Synthèse de régulateur PI [34] [2]

Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) est défini par deux paramètres ( $Kp$ ,  $Ki$ ) et qui sert à diminuer l'erreur statique et l'asservissement de la vitesse mécanique. Cette régulation est utilisée pour commander la MADA en génératrice vue sa simplicité et sa rapidité à mettre en

œuvre tout en offrant des performances acceptables. Le schéma fonctionnel de la régulation de puissance est illustré dans la figure suivante :

$$A = M.V_s$$

$$B = L_s R_r + p l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)$$

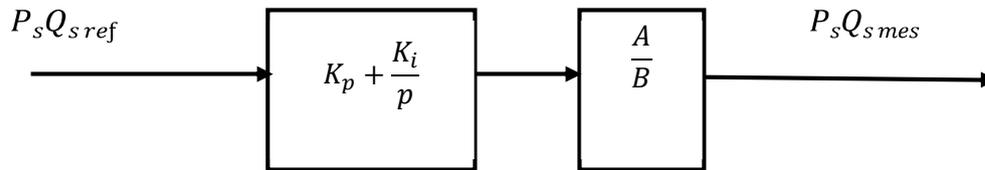


Figure III.5 : Schéma bloc du système à réguler en boucle ouverte

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs peut être exprimée de la façon suivante :

$$k_p + \frac{k_i}{p} = k_p \left( 1 + \frac{k_i}{k_p} \right) = \frac{k_p}{p} \left( p + \frac{k_i}{k_p} \right) = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}}$$

$$FTBO = \left( \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \right) \cdot \left( \frac{-M V_s}{R_s l_s + p l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)} \right)$$

$$FTBO = \left( \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \right) \cdot \left( \frac{\frac{-M V_s}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}}{p + \frac{l_s R_r}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}} \right) \quad (\text{III.19})$$

Pour supprimer le zéro de la fonction de transfert, nous optons pour la méthode de compensation des pôles lors de la synthèse du régulateur.

En remplaçant les gains du régulateur par :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{\left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}$$

on obtient :

$$FTBO = \frac{k_p}{p} * \left( \frac{MV_s}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)} \right) \quad (III.20)$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

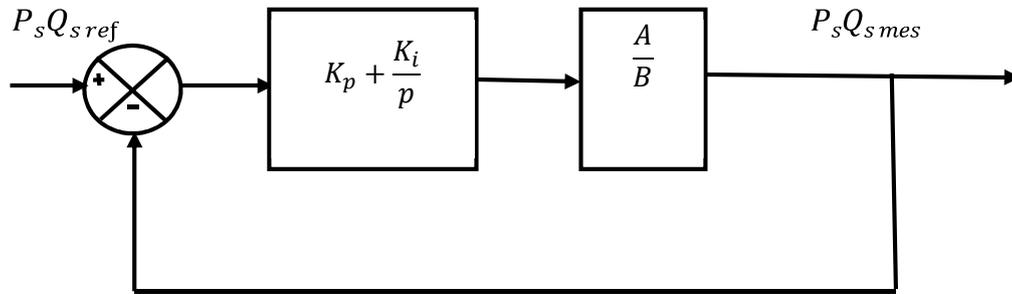


Figure III.6 : Schéma bloc du système à réguler en boucle fermée

On va refaire le même travail que celui de la boucle ouverte :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO}$$

$$FTBF = \left( \frac{\frac{k_p}{p} * \frac{-MV_s}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}}{1 + \frac{k_p}{p} * \frac{l_s R_r}{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}} \right)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{-1}{k_p} \frac{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}{MV_s} p} = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (III.21)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{-1}{k_p} \left( \frac{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}{MV_s} \right)$$

$\tau_r$  est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes [33]

Les gains des correcteurs peuvent être formulés en termes des paramètres de la machine et de la constante de temps  $\tau_r$  de la manière suivante :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{l_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}{MV_s}$$

$$k_i = k_p \frac{R_r}{\left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right)}$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{l_s R_r}{MV_s} \quad (\text{III.21})$$

### III.10. Résultats de la simulation

La commande en puissance de la MADA est à vitesse variable, dans cette configuration, la puissance active de référence est générée en utilisant l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) appliqué à la turbine.

Le système global étudié est simulé à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

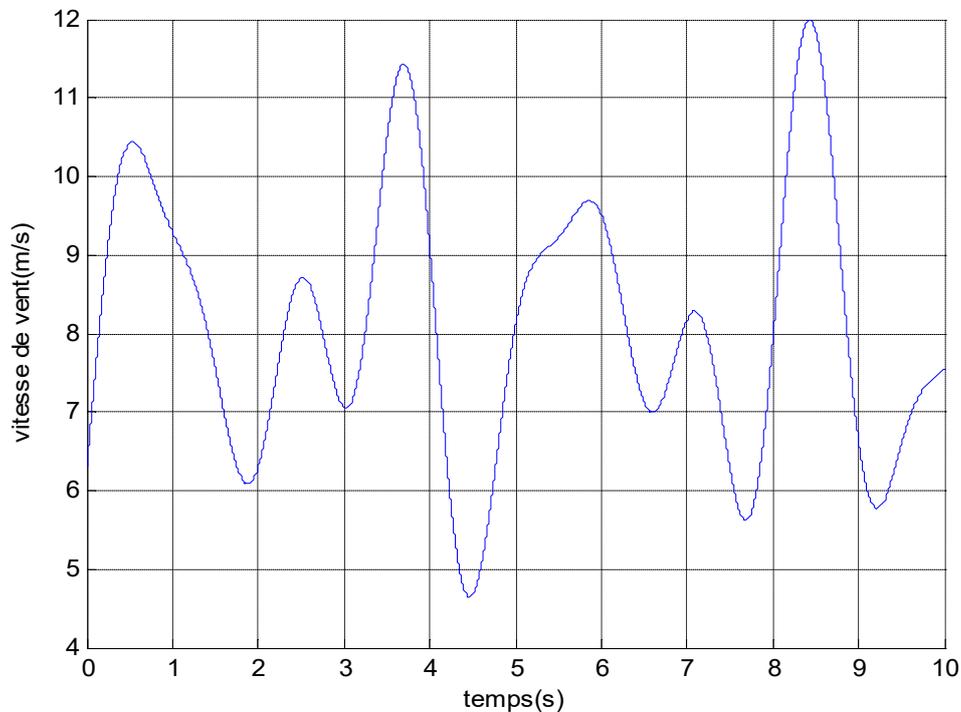


Figure. III.7 : variation de la vitesse du vent en fonction du temps.

La figure (III.7) : Le vent étant de nature aléatoire, nous avons introduit une équation de variation pour le profil de ce dernier.

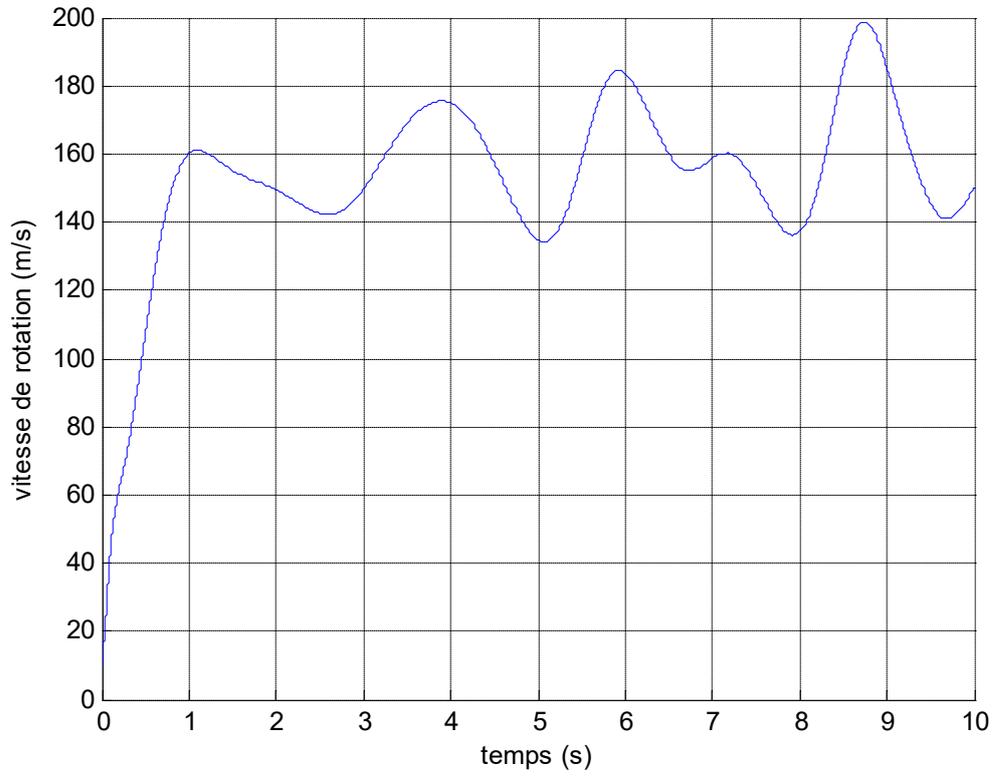


Figure.III.8 : la vitesse de rotation de la machine en fonction du temps.

La figure (III.8) : illustre la variation de la vitesse de la machine qui dépend directement de la vitesse du vent.

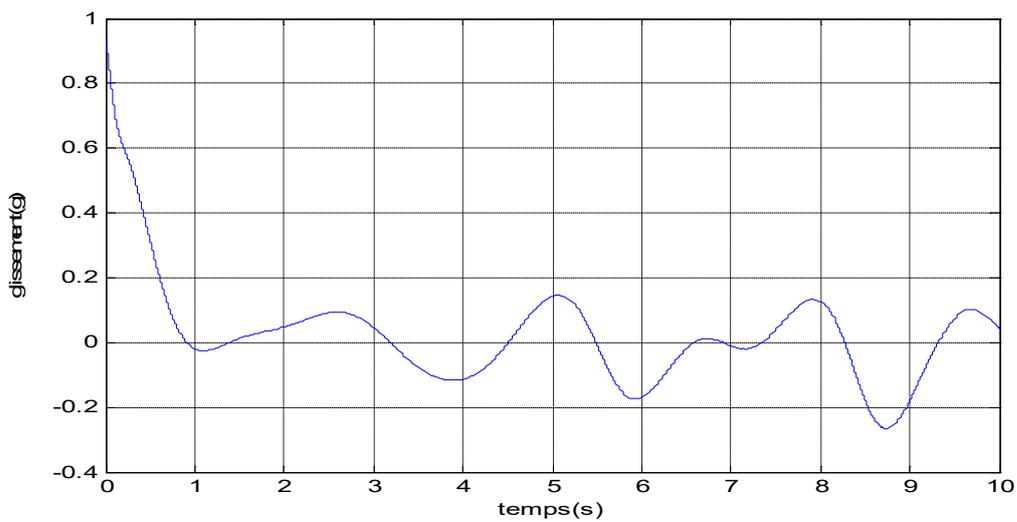


Figure.III.9. allure du glissement

La figure (III.9) : montre une variation du glissement autour de la vitesse de synchronisme, ce sont les deux régimes de fonctionnement hypo et hyper synchrones de la MADA.

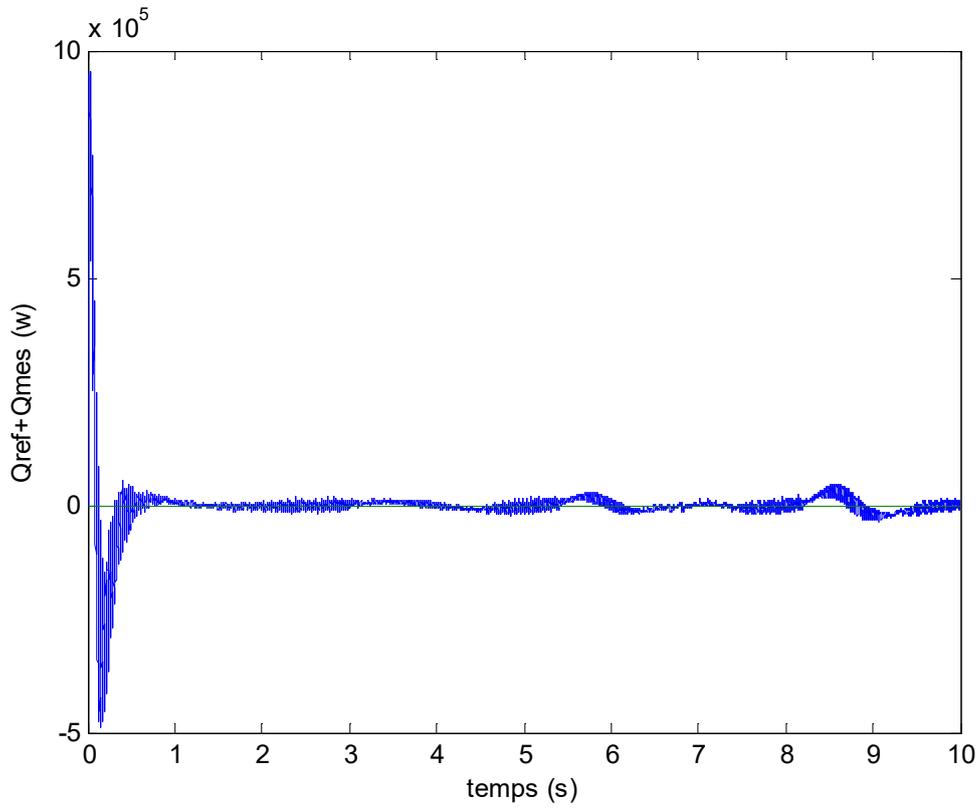


Figure. III.10 : les puissances réactives de référence et mesurée en fonction du temps.

La figure (III.10) : on a introduit une puissance réactive de référence nulle (=0) pour avoir un fonctionnement de la MADA à un facteur de puissance unitaire.

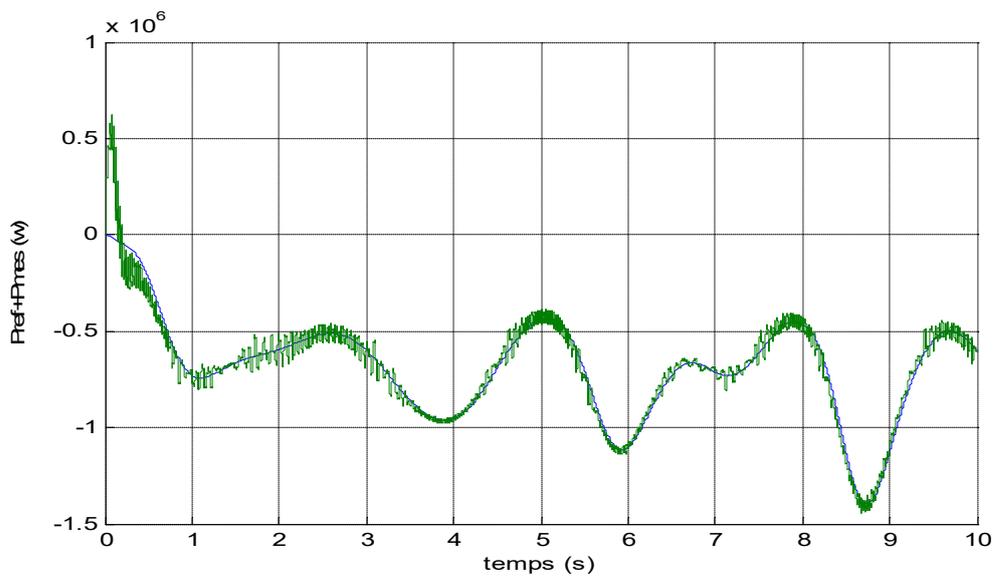


Figure. III.11: les puissances actives de référence et mesurée en fonction du temps

La figure (III.11) : montre que la puissance active du côté du stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur d'énergie fournie par la MADA.

A partir des deux figures précédentes, on voit que les puissances active et réactive de la machine suivent bien leurs références, les erreurs de poursuite sont faibles avec un dépassement acceptable.

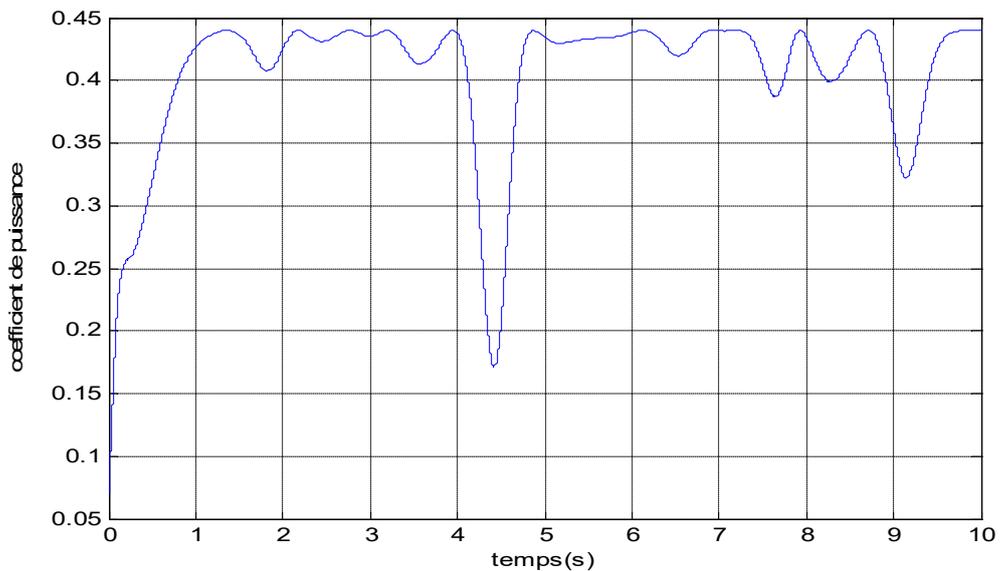


Figure. III.12 : coefficient de puissance en fonction du temps.

La figure (III.12) : illustre la variation du coefficient de puissance. On constate que la valeur moyenne de ce coefficient atteint environ 85% de la valeur maximale, ce qui est satisfaisant.

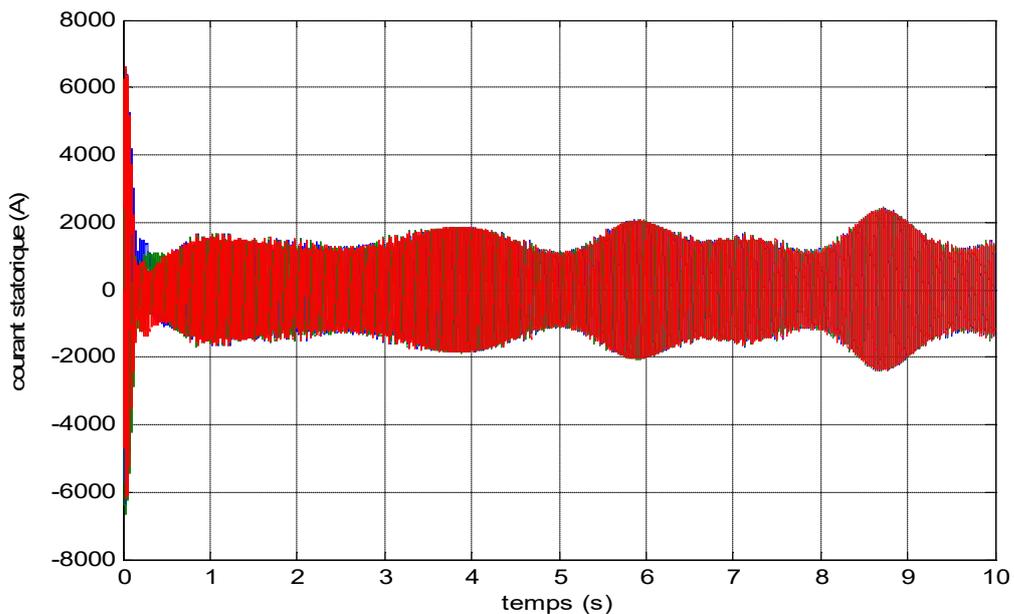


Figure. III.13 : courant statorique en fonction de temps

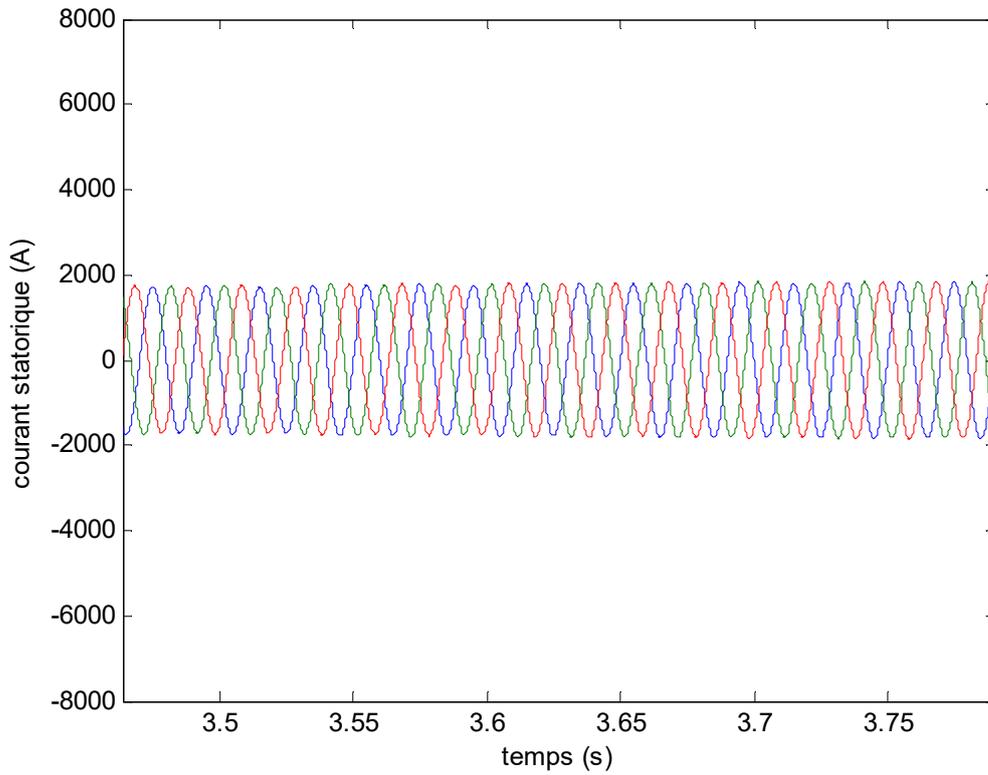


Figure.III.14 : courant statorique en fonction de temps (zoom)

Les figure (III.13) (III.14) : montre que la variation de l'amplitude des courants statoriques est en parfaite corrélation avec la puissance active. Ces courants ont une forme sinusoïdale et une fréquence constante.

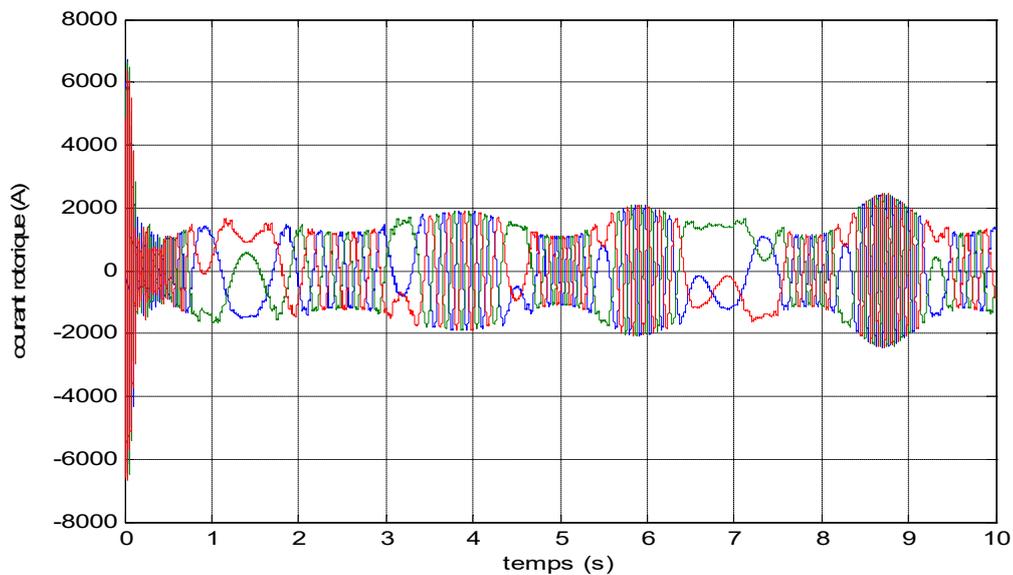


Figure. III.15: courant rotorique en fonction du temps.

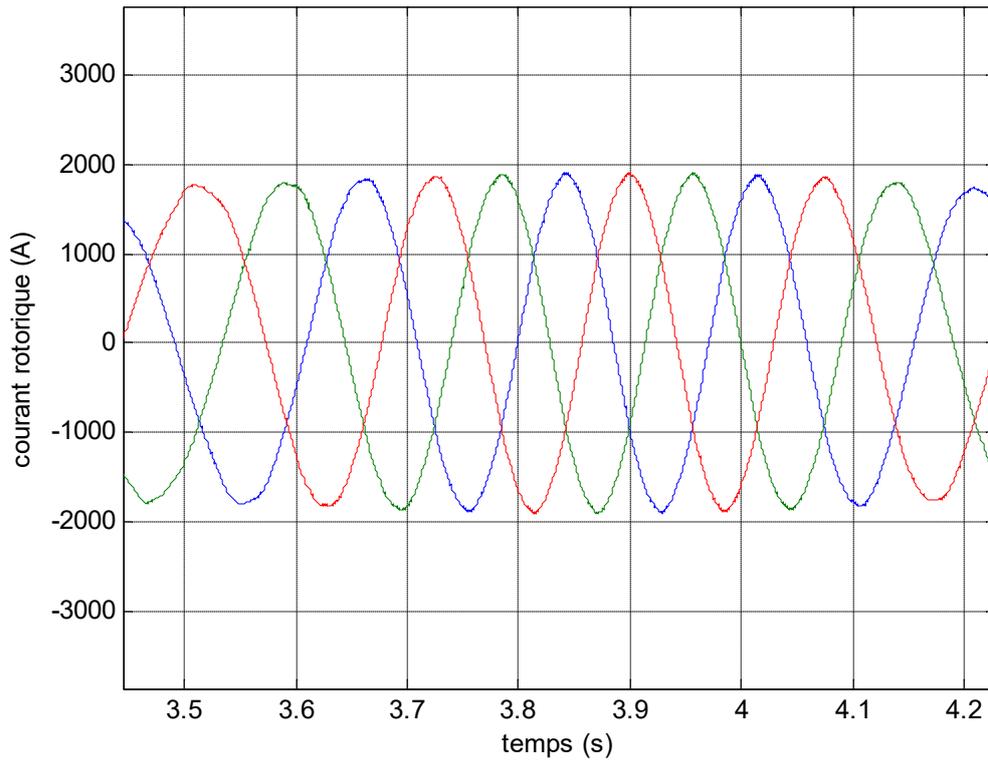


Figure.III.16 : courant rotorique en fonction du temps (zoom).  
 Les figure (III.15) (III.16) : montre aussi que la variation de l'amplitude des courants rotoriques suit parfaitement la puissance active et qui ont aussi une forme sinusoïdale mais avec une fréquence variable qui dépend de la vitesse de la génératrice.

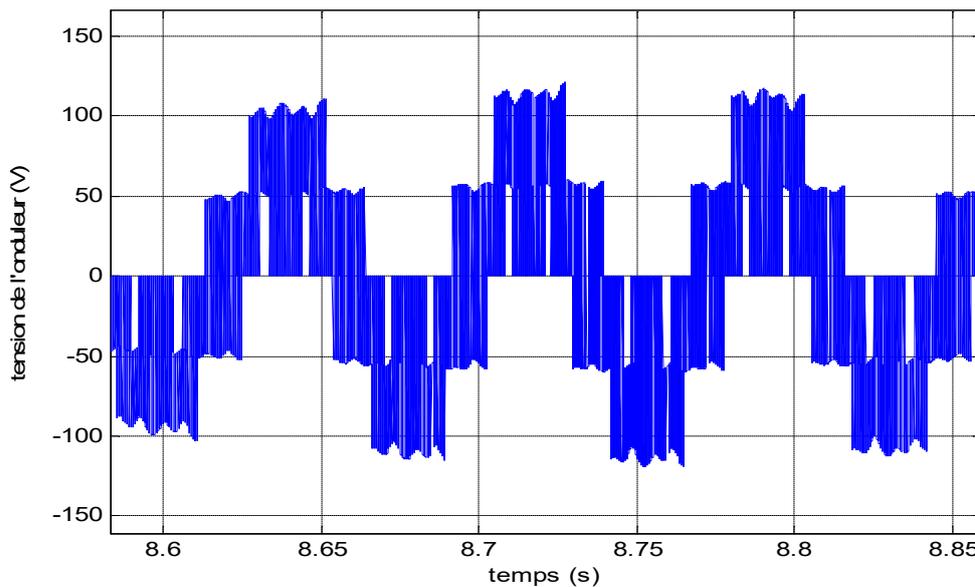


Figure III.17 : Zoom de l'allure de la tension de l'onduleur deux niveaux

La figure (III.17) représente la tension rotorique, qui traduit le fonctionnement du convertisseur de puissance ou il apparait clairement l'effet de la commande MLI.

D'après les résultats de la simulation, il a été observé qu'il existe une corrélation entre les puissances actives et réactives et la vitesse de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Il a été constaté que la MADA est capable de s'adapter aux variations de la vitesse du vent.

### Essai test de robustesse :

Le test de robustesse de notre stratégie de commande est fait vis-à-vis des variations paramétriques de la machine, il est intéressant pour évaluer la stabilité et les performances du système dans des conditions réelles de fonctionnement (échauffement, humidité, usure...).

On a choisi d'effectuer un test de variation de coefficient de frottement  $f$  de la MADA pour une valeur  $f' = 10 * f$ .

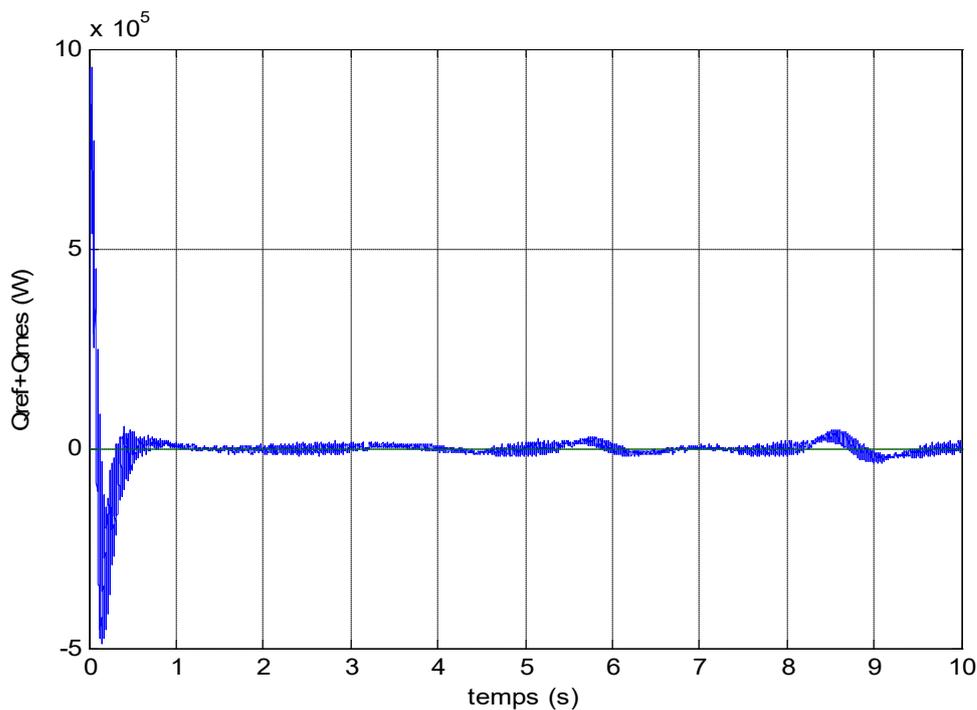


Figure.III.18. les puissances réactives de référence et mesurée avec variation de  $f' = 10 * f$

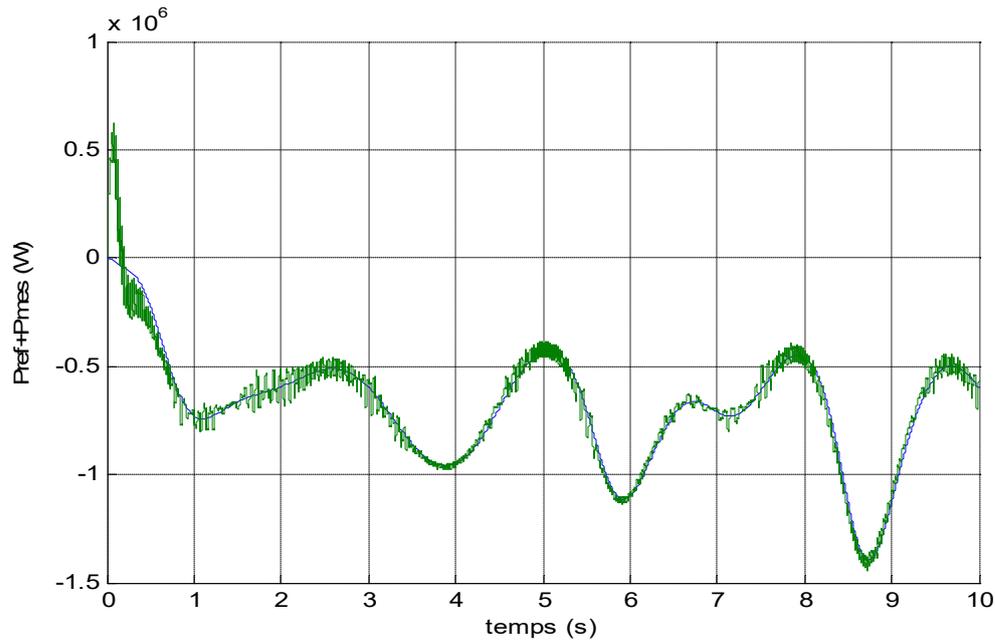


Figure.III.19. les puissances actives de référence et mesurée avec variation de  $f' = 10 * f$

### Commentaire

Les résultats du test de variation du coefficient de frottement montrent que les puissances active et réactive suivent toujours fidèlement leurs références, le système n'est que légèrement impacté et le contrôle des puissances reste efficace. Par conséquent, la stabilité du système n'est pas affectée par ces variations des paramètres.

### Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé la méthode du contrôle vectoriel à flux statorique orienté de la MADA qui sert à contrôler des puissances actives et réactive échangées avec le réseau, ceci à fin de simplifier le modèle qui présente des difficultés et complexités à cause du couplage existant entre les différentes grandeurs de la machine.

Nous avons réalisé deux boucles de régulation de puissance en utilisant des régulateurs PI pour un système stable et rapide. Ceci a montré que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

Nous avons appliqué un profil de vent aléatoire variable ainsi qu'un algorithme MPPT. Les résultats de simulation montrent un bon suivi des consignes des puissances.



**CONCLUSION**

**GÉNÉRALE**

### Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation de notre mémoire, notre travail s'est porté essentiellement sur la modélisation et la commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à double alimentation et cela à l'aide de la mise en place d'une stratégie de commande valable au fonctionnement correct de l'éolienne.

On a commencé en première partie par la présentation de l'état de l'art de la chaîne de conversion d'une éolienne, son mode de fonctionnement ces avantages et ces inconvénients, ensuite on les a classifiés et on a cité les principales machines utilisées, nous avons opté pour le système utilisant la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans la deuxième partie nous avons donc entamé la modélisation des différentes parties du système éolien d'abord dans un repère triphasé, puis dans le repère diphasé de PARK et cela dans le but de l'application d'une stratégie de commande.

Dans la troisième partie on a étudié la commande en puissance de la MADA par la méthode du contrôle vectoriel à flux statorique orienté. Ce dernier est utilisé pour avoir un modèle simple de la machine en réalisant un découplage entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Le choix de la structure du système à commander, la mise en équation des différentes relations entre les paramètres (statoriques et rotoriques) et les simplifications nécessaires à la synthèse de régulateur PI ont été présentés.

Par la suite on a simulé sous MATLAB /SIMULINK le système conçu et les résultats obtenus ont montré des performances satisfaisantes en terme de suivi des consignes de puissances à vitesse variable de la machine aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans le but d'améliorer les performances de la commande de l'éolienne en terme de flexibilité et stabilité et qualité de l'énergie des modifications peuvent être envisagées telles que :

- L'utilisation des régulateurs non linéaires dans la commande comme entre autres le mode glissant à la place des régulateurs classiques PI afin d'améliorer les performances en régime transitoire.
- L'intégration d'un système de stockage dans la chaîne éolienne étudiée.
- Le remplacement des convertisseurs à deux niveaux avec ceux à trois niveaux.

**RÉFÉRENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

### Références bibliographiques

[1]: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>.

[2]: **Frédéric POITIERS** « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation DE L'énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse Doctorat 2003, Université de Nantes.

[3]: **K. IDJDARENE** « Contribution à l'étude et la commande de génératrice asynchrone a cage dédié à des centrales électrique éolienne autonomes ». Thèse Doctorat 2010, Université de Bejaia, Algérie.

[4]: **M. LAHBIB, M. BILLAH** « Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertene ». Mémoire de master 2016, Université Ahmed Draya Adrar.

[5]: **K. Ferkous** « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de magister 2009, Université Mentouri, Constantine, Algérie.

[6]: <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-eolienne-verticale> .

[7]: <https://www.choisir.com/energie/articles/104442/leolienne-verticale>

[8]: <https://fr.quora.com/Quels-sont-les-avantages-et-les-inconv%C3%A9nients-des-%C3%A9oliennes-%C3%A0-axe-vertical>

[9]: <https://www.rapport-gratuit.com/les-differents-types-de-couplage-dune-eolienne-au-reseau-electrique>

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

[11] **T. GHENAM** « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat 2011, délivré

Conjointement par l'Ecole Centrale de Lille, France et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie.

[12] **B. TOUAL** « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable ». Mémoire magister 2010, Université de Batna, Algérie.

[13] **H. Bahlouli, R. Ghezzou** « Commande d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentation ». Mémoire Master en électrotechnique option électromécanique 2017, Université de Bejaia.

[14] :[http://electronique1.blogspot.com/2011/02/machine-asynchrone-double-alimentation\\_21.html](http://electronique1.blogspot.com/2011/02/machine-asynchrone-double-alimentation_21.html)

[15] **R. BEHLOUL, S. MOKRANI** « Etude, Modélisation Et Commande d'une Eolienne A Base d'une MADA ». Mémoire master en Electrotechnique option Energie Et Environnement 2020, HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES T L E M C E N

[16] **S EL. Aimani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologie de Lilles

[17] **M. chalali, N. khiri** « étude d'une « éolienne a vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentée par un convertisseur matriciel ». Mémoire d'ingénieur d'état 2006, université de Bejaia.

[18] **N. SMATI, S. GHEUFA** « Commande en couple d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA ». Mémoire master 2006, université Bejaia.

[19] **A. MIRECKI** « Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat 2005, Institut national de polytechnique, Toulous, France.

[20] **S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker**, « Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines ». IEEE Industry Applications Magazine, May-June 2000

[21] **A. Beugniez, T. Ghennam, B. François, E. M. Berkouk, B. Robyns**, « Centralized supervision of reactive power generation for a wind farm ». 12th European conference on power electronics and applications (EPE 2007), Aalborg, Denmark 02-05, September 2007.

## Références bibliographiques

---

- [22] **L. Khelfat, L. Maataoui**, « Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée » Mémoire de master électrotechnique option électronique de puissance 2017, Université Badji Mokhtar Annaba
- [23] **A. CHATER**, « Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation ». Mémoire en électrotechnique option : Energie et environnement, HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES T L E M C E N,2022.
- [24] **H. Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Thèse de doctorat 2003, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers.
- [25] **K. Mankour N. Bentadj**,«Étude et Simulation d'un Système de Conversion d'Énergie Éolienne basée sur une GADA». Mémoire master2015. Université Saida.
- [26] **H. Idjouadien et S. Irbah**, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». thèse d'ingénieur d'état Bejaia 2007
- [27] **A. Boyette**, « Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre2006.
- [28] **F. Abdoune, A. Idir** « Étude et simulation d'une chaine de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation ». Thèse d'ingénieur d'état en électromécanique 2007, université de Bejaia.
- [29] **N. Adjimi, W. Belaidi** « Modélisation et commande d'un onduleur MLI ». Mémoire master n Systèmes Electriques et Automatique 2009, université Oum El-Bouaghi.
- [30] **K. Belmokhtar** « Contribution à l'intégration d'un Parc éolien à un réseau électrique autonome avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois Rivières, Avril 2015.
- [31] **S. Djema, N. Nasri** « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation destinée à l'énergie éolienne » Mémoire de master académique 2015, université de mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

## Références bibliographiques

---

[32] **MIRECKI Adam** « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 2005.

# ANNEXE

# ANNEXE

## Paramètres de la turbine éolienne

- Puissance nominale :  $P_n = 1.5 \text{ MW}$
- Gain de multiplicateur :  $G = 90$
- Rayon de la turbine :  $R_t = 35 \text{ m}$
- Angle d'orientation des pales  $\beta = 0$
- Moment d'inertie totale ramené sur l'arbre :  $J = 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

## Paramètre de la machine asynchrone à double alimentation

- Tension statorique nominale :  $U_{ns} = 690\text{V}$
- Nombre de pair de pôles :  $P = 2$
- Résistance statorique :  $R_s = 0.012\Omega$
- Résistance rotorique:  $R_r = 0.021\Omega$
- Inductance rotorique :  $L_r = 0.013703\text{H}$
- Inductance statorique :  $L_s = 0.013732\text{H}$
- Coefficient de frottement :  $f = 0.0071 \text{ m} \cdot \frac{\text{s}}{\text{rd}}$
- Inductance Mutuelle:  $M = 0.013528\text{H}$

## Bus continue

- Capacité de filtrage de la tension DC :  $C = 400\mu\text{f}$

## Paramètres du régulateur des puissances

- $k_i = 710.64$
- $k_p = 8894.5$

### Résumé

Le présent mémoire traite l'étude de la machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système éolien, ainsi la synthèse d'une loi de commande linéaire pour le contrôle indépendant de la puissance active et réactive. L'objectif est de développer un modèle de simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne. Dans un premier lieu, la modélisation de la partie mécanique, qui englobe la turbine le multiplicateur et l'arbre de transmission a été effectuée, suivie par application de la technique MPPT dans le but d'adapter la vitesse de la turbine par rapport à la vitesse du vent afin de maximiser la puissance convertie. Ensuite, la MADA, le convertisseur électronique, le bus continu ont été modélisés. Lors de ce travail, la stratégie de commande développée est basée sur un contrôle vectoriel à flux statorique orienté selon un repère diphasé en appliquant des régulateurs classiques à action proportionnelle et intégrale (PI). Le modèle du système complet a été effectué dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'analyser les résultats obtenus qui nous montrent un bon comportement du système.

#### Mots-clés

Machine asynchrone à double alimentation, turbine éolienne, convertisseur Back- to -Back, MPPT, commande vectorielle.

#### Abstract

This work deals with the study of the asynchronous machine with dual power supply dedicated to a wind power system, as well as the synthesis of a linear control law for the independent control of active and reactive power. The objective is to develop a simulation model of a wind energy conversion system. In a first place, the modelling of the mechanical part, which includes the turbine, the multiplier and the transmission shaft, was carried out, followed by applying the MPPT technique for adapt the turbine speed to the wind speed in order to maximize the converted power. Then, the MADA, the electronic converter, the DC bus and the filter were modelled. During this work, the developed control strategy is based on a stator flux vector control oriented according to a twophase reference by applying conventional proportional and integral action regulators (PI). The complete system was modelled in the MATLAB / SIMULINK environment in order to analyse the results obtained which show us a good system behaviour.

#### Keywords

Double fed induction machine, wind turbine, Back-to-Back converter, MPPT, vector control.