

*République Algérienne Démocratiques et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique*

*Université de Ghardaïa*



N° d'ordre:

N° de série:

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'Automatique et Électromécanique  
**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine** :Sciences et Technologies

**Filière**: Automatique

**Spécialité** :Automatique et systèmes

**Par** :DJOUADI Tayeb

**SIRADJ Yassine**

## **Thème**

**Contrôle d'une Machine Asynchrone à Double  
Alimentation utilisée dans un Système à Energie  
Renouvelable**

**Soutenu publiquement le ..../2021**

**Devant le jury :**

**R.SADOUNI**

**M. ALLALI**

**DJELLOULI Tahar**

**MCA**

**MAA**

**MAA**

**Univ. Ghardaïa**

**Univ. Ghardaïa**

**Univ. Ghardaïa**

**Président**

**Examineur**

**Encadrant**

**Année universitaire 2020/2021**



## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions ALLAH pour nous avoir donné le pouvoir de réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons ensuite à remercier notre encadrant Monsieur T.DJELLOULI pour son soutien, ses conseils et son encadrement qui nous ont été bénéfique pour mener à bien ce travail*

*Nous exprimons notre reconnaissance Monsieur R.SADOUNI pour avoir voulu accepter de présider le jury.*

*Nous tenons également à remercier Monsieur M.ALLALI d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous voudrions également remercier tous les enseignants que nous avons eu l'honneur d'avoir de connaître et d'apprécier durant notre scolarité.*

*Nous tenons également à remercier nos parents, pour tout le soutien moral, financier, psychologique et particulièrement pour l'amour qu'ils nous portent.*

*Enfin, Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.*





# Dédicace

*Dans ce humble travail*

*Surtout pour ceux qui ont*

*Il m'a appris le sens de la vie et m'a encouragé et*

*soutenu pendant mes études*

*Cher père*

*Ma chère mère*

*Pour mes frères.*

*A tous les membres de ma famille.*

*Je veux vous remercier tous*

*Mes amis qui m'ont aidé de loin*

*Ou de près dans la réalisation de ce travail*

**DJOUADI Tayeb**





# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma Mère et mon Père, qui M'ont beaucoup soutenu durant mon cursus*

*d'étude et à qui je serai*

*Éternellement reconnaissant ;*

*à mon frère et mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur Soutien moral.*

*- A mon binôme Tayeb et toute la famille DJOUADI.*

*- à toute ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours Universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*



**SIRADJ Yassine**

## **Résumé :**

L'objectif principal de ce travail de recherche est un aperçu général sur l'étude d'un système éolien à la base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) en fonctionnement génératrice (GADA) pour la production d'énergie électrique, dans le cadre de la recherche des ressources d'énergie renouvelables, non polluantes et sans conséquences indésirables pour l'homme et l'environnement à la fois .

Après la présentation des différentes sources d'énergie renouvelables et leurs caractéristiques :avantages et inconvénients, l'éolienne est choisie pour la conversion d'énergie cinétique du vent à la conversion électromécanique du GADA à vitesse variable utilisé dans le système aérogénérateur. La modélisation et la commande vectorielle appliquée à la (GADA) pour la régulation de la puissance active et réactive statorique ainsi que la simulation ont été effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink, et les résultats de simulation obtenus du contrôle vectoriel de la GADA entraînée par une éolienne en puissance sont considérablement acceptables.

**Mots clés:** Machine asynchrone à double alimentation (MADA), GADA, éolienne ,Contrôle vectoriel, Matlab/Simulink.

## **ملخص :**

الهدف الرئيسي من هذا العمل البحثي هو نظرة عامة على دراسة نظام طاقة الرياح على أساس آلة غير متزامنة مع مصدر طاقة مزدوج (MADA) في تشغيل المولد (GADA) لإنتاج الطاقة الكهربائية ، كجزء من البحث عن مصادر الطاقة المتجددة ، غير الملوثة وبدون عواقب غير مرغوب فيها للإنسان والبيئة في نفس الوقت. بعد عرض مصادر الطاقة المتجددة المختلفة وخصائصها: المزايا والعيوب ، يتم اختيار توربينات الرياح لتحويل الطاقة الحركية للرياح إلى التحويل الكهروميكانيكي للسرعة المتغيرة (GADA) المستخدمة في نظام توربينات الرياح. تم تنفيذ النمذجة والتحكم في النواقل المطبقة على (GADA) لتنظيم قوة الجزء الثابت النشطة والمتفاعلة بالإضافة إلى المحاكاة في بيئة Matlab / Simulink ، وتم الحصول على نتائج المحاكاة من التحكم الشعاعي لـ (GADA) بواسطة توربينات طاقة الرياح وتعتبر مقبولة إلى حد كبير.

**الكلمات المفتاحية:** آلة غير متزامنة مع مصدر طاقة مزدوج (MADA ، GADA) ، توربينات الرياح ، التحكم في القوة الموجهة Matlab / Simulink .

## **Abstract:**

The main objective of this research work is a general overview on the study of a wind power system based on an asynchronous machine with dual power supply (MADA) in generator operation (GADA) for the production of electrical energy, as part of the search for renewable energy resources, non-polluting and without undesirable consequences for man and the environment at the same time.

After the presentation of the different renewable energy sources and their characteristics: advantages and disadvantages, the wind turbine is chosen for the kinetic energy conversion of

the wind to the electromechanical conversion of the variable speed GADA used in the wind generator system. The modeling and vector control applied to the (GADA) for the regulation of the active and reactive stator power as well as the simulation were carried out under the Matlab / Simulink environment, and the simulation results obtained from the vector control of the driven GADA by a power wind turbine are considerably acceptable.

**Key words:** Asynchronous double feed machine (MADA), GADA, wind turbine, Vector control, Matlab / Simulink.

**Remerciements** ..... I  
**Dédicace** ..... II

<b>Dédicace</b> .....	III
<b>Résumé</b> .....	VI
<b>Sommaire</b> .....	V
<b>Liste Des Figures</b> .....	IV
<b>Liste Des Symboles</b> .....	IIV
<b>Introduction Générale</b> .....	IIIV

## **Chapitre I : Généralités Sur Les Energies Renouvelables**

I.1 Introduction .....	5
I.2 Les Energies renouvelables .....	5
I.2.1 Définition des énergies renouvelables .....	5
I.2.2 Les principales sources d'énergies renouvelables .....	5
I.3 Aperçu Sur L'énergie Eolienne .....	8
I.3.1 Définition De L'énergie Eolienne .....	9
I.3.2 Développement De L'énergie Eolienne En Algérie .....	9
I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	10
I.5 Les applications des éoliennes .....	11
I.6.1 Eolienne A Axe Vertical .....	12
I.6.2 Eoliennes à axe horizontal .....	12
I.7 Structure Des Systemes Eoliens .....	13
I.7.1 Eolienne A Vitesse Fixe .....	13
I.7.2 Les éoliennes à vitesse variables .....	14
I.8 Avantages Et Inconvénients De L'énergie Eolienne .....	14
I.8.1 Avantages .....	14
I.8.2 Inconvénients .....	15
I.9 Conclusion .....	15

## **Chapitre II : Modélisation De La Turbine Eolienne**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Description Du Système Eolienne .....	17
II.3 Modélisation De La Turbine Eolienne .....	18
II.3.1 Modélisation De La Turbine.....	18
II.3.2 La Puissance D'une Eolienne .....	18
II.3.3 Coefficient De Puissance .....	19
II.3.4 Modèle Du Multiplicateur .....	20
II.3.5 Equation Dynamique De L'arbre .....	20

II.4 Stratégie De Commande De La Turbine Eolienne .....	21
II.4.1 Maximisation De La Puissance Avec Asservissement De La Vitesse.....	21
II.5 Systèmes De Régulation De La Vitesse De Rotation De L'éolienne.....	22
II.5.1 Système A Décrochage Aérodynamique "Stall" .....	23
II.5.2 Système D'orientation De Pales « Pitch » .....	23
II.6 Conclusion.....	24

### **Chapitre III : Machine Asynchronen A Double Alimentation**

III.1 Introduction .....	26
III.2 Constitution de la Machine Asynchrone à Double Alimentation(MADA).....	26
III.3 Principe De Fonctionnement .....	26
III.4 Structure De La mada .....	27
III.5 Classification des machines à double alimentation .....	27
III.5.1 Mada A Rotor Bobinée .....	28
III.5.2 Mada Sans Balais .....	28
III.5.3 Mada En Cascade.....	28
III.6 LesAvantages Et Inconvénients De La MADA .....	29
III.6.1 LesAvantages .....	29
III.6.2 Les Inconvénients .....	30
III.7 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) .....	30
III.7.1 Hypothèses simplificatrices .....	31
III.7.2 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) .....	36
III.7.3 Application de la Transformation de Park à la MADA .....	38
III.8 Choix du référentiel .....	39
III.9 Résultats de simulation .....	41
III.10 Conclusion .....	44

### **ChapitreIV : Commande vectorielle des puissances de la GADA**

IV .1 Introduction .....	46
IV .2 Commande vectorielle de la MADA .....	46
IV.2.1 Principe de la commande vectorielle de la MADA.....	46
IV.2.2 Les types de la commande vectorielle .....	48
IV.2.2.1 La commande vectorielle directe .....	48
IV.2.2.2 La commande vectorielle indirecte .....	48
IV.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....	48

IV.4 Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA .....	49
IV.4.1 Relations entre courants statoriques et courants rotoriques .....	49
IV.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques .....	50
IV.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques .....	51
IV.5 Commande vectorielle de la MADA en génératrice .....	52
IV.5.1 Commande directe en puissance active et réactive de la GADA .....	52
IV.5.2 Commande indirecte des puissances active et réactive .....	52
IV.5.3 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI) .....	53
IV.6 Résultats de Simulation .....	54
IV.6.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe .....	55
IV.7 Conclusion .....	59

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Bibliographie

Annexes

## ***LISTE DES FIGURES***

### **Chapitre I**

<b>Figure I.1:</b> Source photovoltaïque.....	6
<b>Figure I.2:</b> Parc Eolien .....	6
<b>Figure I.3:</b> Centrale hydraulique.....	7
<b>Figure I.4:</b> Énergie Biomasse .....	8
<b>Figure I.5:</b> Energie de la mer .....	8
<b>Figure I.6:</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	9
<b>Figure I.7:</b> Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	10
<b>Figure I.8:</b> deux types des éoliennes .....	11
<b>Figure I.9:</b> éoliennes à axes Vertical .....	12
<b>Figure I.10:</b> éoliennes à axe horizontal.....	13
<b>Figure I.11:</b> Éolienne à vitesse fixe .....	14

### **Chapitre II**

<b>Figure II.1 :</b> Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA .....	17
<b>Figure II.2 :</b> Schéma de la turbine éolienne .....	18
<b>Figure II.3 :</b> Coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	19
<b>Figure II.4:</b> Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.....	21
<b>Figure II.5:</b> Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec	

asservissement de la vitesse.....	22
<b>Figure II.6 :</b> Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique.....	23
<b>Figure II.7 :</b> caractéristiques de puissance.....	24

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1:</b> Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	27
<b>Figure III.2:</b> schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné .....	28
<b>Figure III.3:</b> Structure de la MADA sans balais .....	28
<b>Figure III.4:</b> Structure en cascade de deux machines asynchrones .....	29
<b>Figure III.5:</b> Représentation schématique de la MADA .....	31
<b>Figure III.6:</b> Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA .....	38
<b>Figure III.7:</b> Choix du référentiel .....	40
<b>Figure III.8:</b> Courant statorique avec zoom.....	41
<b>Figure III.9:</b> Courants et rotoriques avec zoom.....	42
<b>Figure III.10:</b> Puissance active statoriques.....	42
<b>Figure III.11:</b> Puissance réactive statoriques.....	43
<b>Figure III.12:</b> Le couple électromagnétique $C_{em}$ .....	43

### **Chapitre IV :**

<b>Figure IV.1 :</b> Schéma de principe du découplage de la GADA par analogie avec la machine à courant continu.....	47
<b>Figure IV.2:</b> Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	50
<b>Figure IV.3:</b> Schéma bloc de la GADA.....	51
<b>Figure IV.4:</b> Système régulé par un PI.....	53
<b>Figure IV.5:</b> Courants statoriques de la commande directe .....	55
<b>Figure IV.6:</b> Courants rotoriques de la commande directe.....	55
<b>Figure IV.7:</b> puissance active direct avec zoom.....	56
<b>Figure IV.8:</b> puissance réactive statorique direct.....	56
<b>Figure IV.9:</b> Le couple électromagnétique $C_{em}$ .....	57

### **LISTE DES SYMBOLES**

**GADA :** Machine asynchrone à double alimentation.

**GADA** : Génératrice asynchrone à double alimentation.

**M.L.I** : Modulation de largeur d'impulsions

**r** : Densité de l'air  $1.225 \text{ kg.m}^{-3}$ .

**S** : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

**R** : Rayon du rotor éolien.

**G** : Gain du multiplicateur.

**m** : Masse d'air traversant le rotor éolien.

**C** : Coefficient de puissance de l'éolienne.

**Cem, Cr, Cf**: Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.

**V** : Tension aux bornes du capacité du filtre.

**Vred**: Tension redressé.

**$\omega_s, \omega_r, \omega_g$**  : Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques et de glissement.

**$\theta_s, \theta_r, \theta_l$**  : Angles relatifs aux pulsations : statorique, rotorique et de glissement.

**L** : Inductance du filtre LC.

**Cf**: Capacité du filtre LC.

**fs**:Fréquence des grandeurs statorique

**fr**:Fréquence des grandeurs rotorique

**fp**:Fréquence de la porteuse

**a, b, c** : Indice correspondants aux trois phases a, b, c

**C.V** : Commande vectorielle

**s,r** : Indice du stator, du rotor

**d,q**: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

**Rs** : Résistance des enroulements statoriques.

**Rr** : Résistance des enroulements rotoriques

**Ls** : Inductance propre d'une phase statorique

**Lr** : Inductance propre d'une phase rotorique

**Tr** : Constante de temps rotorique

**Ts** : Constante de temps statorique

**Msr** : Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor

**Ms** : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

**Mr** : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

**$\phi_s, \phi_r$**  : Respectivement flux statorique et rotorique

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$  : Les flux statorique directes et en quadrature

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  : Les flux rotorique directes et en quadrature

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : Courants triphasés statoriques.

$I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$  : Courants triphasés rotoriques

$k_{isa}, V_{sc}$  : Tensions simples triphasées statoriques.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions rotoriques triphasées

$V_{sd}$  : Tension statorique directes et en quadrature

$V_{rd}$  : Tension rotorique directes et en quadrature

$P$  : Nombre de paires de pôles.

$g$  : Glissement

$L_r$  : Inductance cyclique d'un phase rotorique

$L_s$  : Inductance cyclique d'un phase statorique

$L_m$  : L'inductance mutuelle.

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

$[P(\theta)]^{-1}$  : Matrice inverse de PARK.

$J$  : Moment d'inertie.

$P_s$  : La puissance statorique active.

$Q_s$  : La puissance statorique réactive.

$P_{ref}, Q_{ref}$  : Puissances électriques de références de la GADA.

$v_2, v_3$  : Termes de couplage entre les axes d et q.

$v_1, v_4$  : Perturbations à rejeter.

$PI$  : Proportionnel – Intégrale.

$k_p$  : Gain de l'action proportionnel du régulateur PI.

$k_i$  : Gain de l'action intégrale du régulateur PI.

# Introduction Générale

# Introduction Générale

---

Les machines asynchrones (MAS) sont les machines électriques les plus utilisées dans les applications industrielles. Cela est dû, en grande partie, à leur simplicité de construction, leur robustesse, faible coût, facilité d'entretien et leurs performances. Sachant que la machine asynchrone à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour fonctionner en moteur et au-dessus pour fonctionner en générateur. Par contre dans le cas de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) ou à rotor bobiné ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur, C'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur, elle a donc deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelque soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

La MADA a pour diverses applications: en tant que génératrice pour les énergies renouvelables (largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable).

Les (MADA) est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor, le raccordement de cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau (génératrice non autonome), ou avec des batteries de condensateurs (fonctionnement dit autonome), alors que le rotor est alimenté à travers le convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont variables reçues sur son arbre. Grâce au progrès de l'électronique de puissance, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux et des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. L'apparition de la commande vectorielle constitue une évolution pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ce qu'on peut effectuer un découplage artificiel entre le flux et le couple électromagnétique.[4]

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées par des génératrices asynchrones à double alimentation (GADA).

L'avantage que présente ce type des génératrices est qu'elles permettent une production d'énergie électrique à vitesse variable, ce qui nous amène à dire qu'elles nous permettent aussi d'avoir une meilleure exploitation des ressources éolienne sous des conditions de vent différentes, ce que veut dire pour une plage de fonctionnement intégrant à la fois le mode hypo et hyper-synchrone de la vitesse de la MADA.

# Introduction Générale

---

L'objectif principal de ce mémoire est la commande vectorielle en puissance de la MADA entraînée par turbine éolienne à vitesse variable pour la production de l'énergie électrique, pour ce fait, notre mémoire est organisé en quatre chapitres :

-Le premier chapitre sera consacré aux Généralités sur Les énergies renouvelables

nous avons présenterons les concepts et principes des énergies renouvelables: solaire, éolienne , hydraulique, l'énergie marine , ainsi que la biomasse ainsi que des généralités principalement sur les turbines éoliennes.

✓ -Dans le second chapitre, on présentera la modélisation de la turbine éolienne, a partir de la constitution de la turbine on déduira ses équations : cinétique du vent , mécanique de l'éolienne et celle du multiplicateur afin de modéliser et simuler la turbine éolienne sous le logiciel MALAB/SIMILINK.

-Le troisième chapitre concerne la modélisation de la MADA en présentant ses circuits et ses équations afin de la modéliser et simuler sous MALAB/SIMILINK toujours .

Dans le quatrième chapitre, une commande vectorielle de la MADA qui sera représentée en étude et en schémas blocs sous l'environnement Matlab/Simulink, en utilisant la stratégie de commande directe de la puissance active et réactive statorique.

Ce dernier chapitre tiendra en compte le système qui est constitué d'une MADA entraînée par une turbine éolienne afin de produire l'énergie électrique. ce système sera validé par une série de simulation. En fin notre mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :  
**Généralités**  
Sur Les Energies  
Renouvelables

**I.1 Introduction :**

La production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable.

L'apport des nouveaux systèmes de production d'énergies renouvelables a été décisif pour freiner l'augmentation de la part des sources conventionnelles dans le tout mondial, et ainsi réduire la production des gaz à effet de serre.

Compte tenu de la dynamique actuelle des filières éolienne, solaire et biomasse, la croissance de la production d'électricité renouvelable devrait rester soutenue dans les prochaines années et sa part dans la production mondiale devrait continuer à augmenter.

**I.2. Les Energies renouvelables :****I.2.1 Définition des énergies renouvelables :**

Les énergies renouvelables (EnR) sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est à-dire une source qui se renouvelle assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'a pas d'impact sur la disponibilité future. Elles présentent des énergies de flux puisqu'elles se régénèrent d'une manière permanente (les flux solaires, le vent, etc.). Par conséquent, elles ont des caractéristiques différentes des énergies fossiles qui sont plutôt des énergies de stock. La notion d'EnR est souvent confondue avec celle d'énergie propre. Or, même si une énergie peut être à la fois renouvelable et propre, toutes les ER ne sont pas nécessairement propres. Mais, généralement les ER n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de GES. Ainsi, elles sont l'un des facteurs de lutte contre le changement climatique. En plus, ces énergies présentent un potentiel très important pour la production de l'électricité à grande échelle. [1]

**I.2.2 Les principales sources d'énergies renouvelables:**

- **L'énergie solaire :** L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés du rayonnement du soleil. Elle peut être convertie en électricité, et son exploitation peut se faire en thermique (une vapeur d'eau qui entraîne des turboalternateurs pour l'obtention de l'énergie électrique), thermodynamique, ou photovoltaïque (énergie transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques). [2]



**Figure I.1 : Source photovoltaïque**

- **Énergie Éolienne** : L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières.

- Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [3]



**Figure I.2 :Parc Eolien**

- **L'énergie hydraulique :** De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité ou' L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique comme il est illustré dans la Figure (I.3).



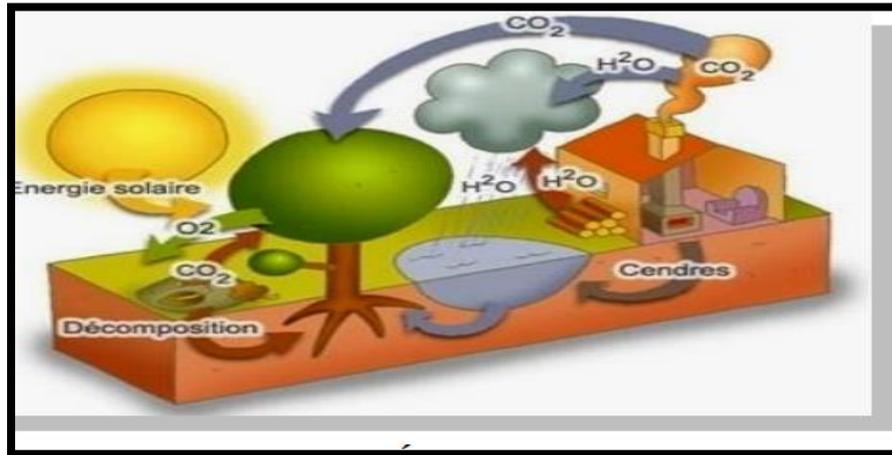
**Figure I.3 : Centrale hydraulique**

- **Energie de La biomasse:** Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante.

Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques. La biomasse désigne donc l'ensemble des végétaux capables par le biais de diverses transformations, de restituer l'énergie solaire qu'ils ont stockés, cette énergie solaire est convertie en différentes sources énergétiques tel que :

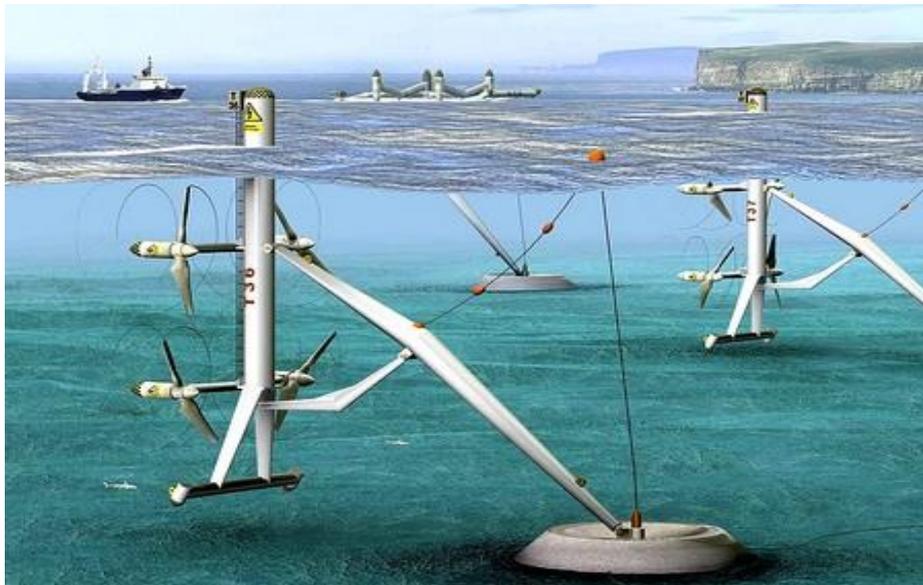
- ❖ Chaleur et électricité

Cette énergie est produite par le bois et déchets agricoles (paille), déchets urbains ordures ménagères et déchet industriels du secteur agroalimentaire. Ces déchets subissent des transformations thermochimiques (combustion, pyrolyse, Gazéification) permettant principalement de créer de la chaleur et de l'électricité.



**Figure I.4 :Énergie Biomasse**

- **L'énergie Marine :** La filière des énergies marines appelées aussi énergie des océans ou thalasso-énergies, comprend le développement des technologies et la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergies naturelles fournies par les mers et les océans. On recense : la houle, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'énergie thermique des mers (ETM) qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des Profondeurs . [4]



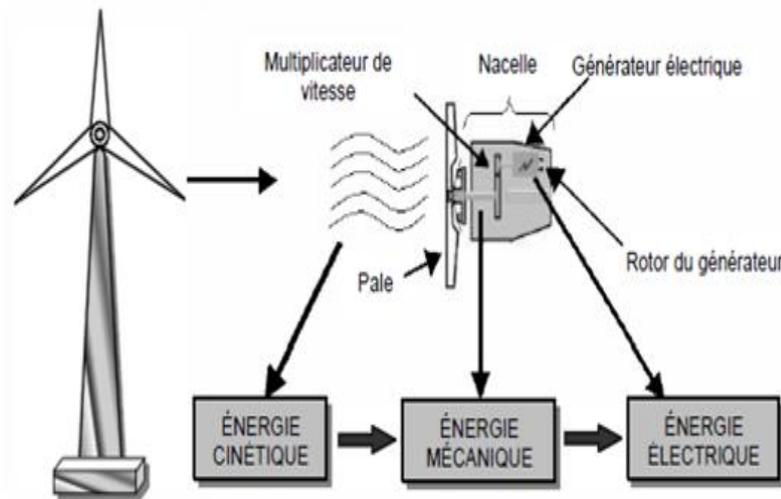
**Figure I.5 :Energie de la mer**

### I.3 Aperçu Sur L'énergie Eolienne :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent change selon les zones géographiques et les saisons, elle est élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers, le vent est défini par sa direction et sa vitesse. [5]

### I.3.1 Définition De L'énergie Eolienne :

Un aérogénérateur, couramment appelé éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La conversion de l'énergie se fait en deux étapes : Au niveau de la turbine (rotor) : extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique. Au niveau de la génératrice : reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.



**Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.**

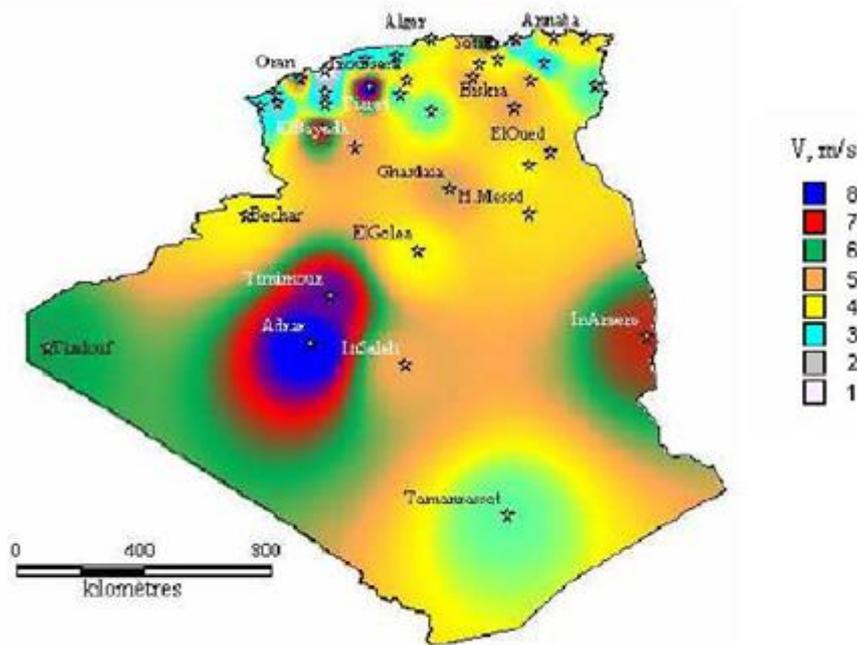
Système de Conversion Eolien est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. [6]

### I.3.2 Développement De L'énergie Eolienne En Algérie :

L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production de la vitesse du vent des atlas et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [18]. Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- deux zones sur le littoral .
- trois zones sur les hauts plateaux .
- quatre zones en sites sahariens.

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW À Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ. [7]



**Figure I.7 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.**

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

Le vent, une des premières ressources naturelles, utilisée pour faciliter la vie au quotidien de l'homme. Maîtriser la force du vent, permet aujourd'hui de produire de l'électricité, grâce à l'énergie éolienne.

Le principe est le même que celui d'une bonne dynamo de vélo. Les pâles, elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice, tournent grâce au vent et entraînent la génératrice qui produit l'électricité. L'éolienne est donc ni plus ni moins qu'un aérogénérateur, s'inspirant du procédé des moulins à vent.

L'éolienne est généralement composée de trois pâles, qui sont portées par un rotor et fixées en haut d'un mat. C'est un moteur électrique qui permettra d'orienter les pâles de manière à ce qu'elles se trouvent continuellement face au vent.

Le mouvement des pâles transforme l'énergie cinétique (énergie que possède un corps par son mouvement et s'exprime en joule) du vent en énergie mécanique (quantité d'énergie emmagasinée). La vitesse de rotation se trouve être en fonction de la taille des pâles. Plus les pâles sont petites et plus elles tournent rapidement. En moyenne on peut dire qu'elles tournent entre 10 et 25 tours/minutes.

Le rôle du générateur est ensuite de transformer cette énergie mécanique, en énergie électrique pour les besoins de l'homme. Les besoins d'un générateur sont d'environ 1000 à 2000 tours/minutes afin de produire une quantité d'électricité idéale. C'est la raison pour laquelle un multiplicateur est utilisé afin d'accélérer le mouvement des pâles . [19]

### I.5 Les applications des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau ;

Soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration : [20]

1. L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
2. L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

### I.6 Différents types d'éoliennes :

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de Turbines éoliennes:

- Turbines à axe vertical.
- Turbines à axe horizontal

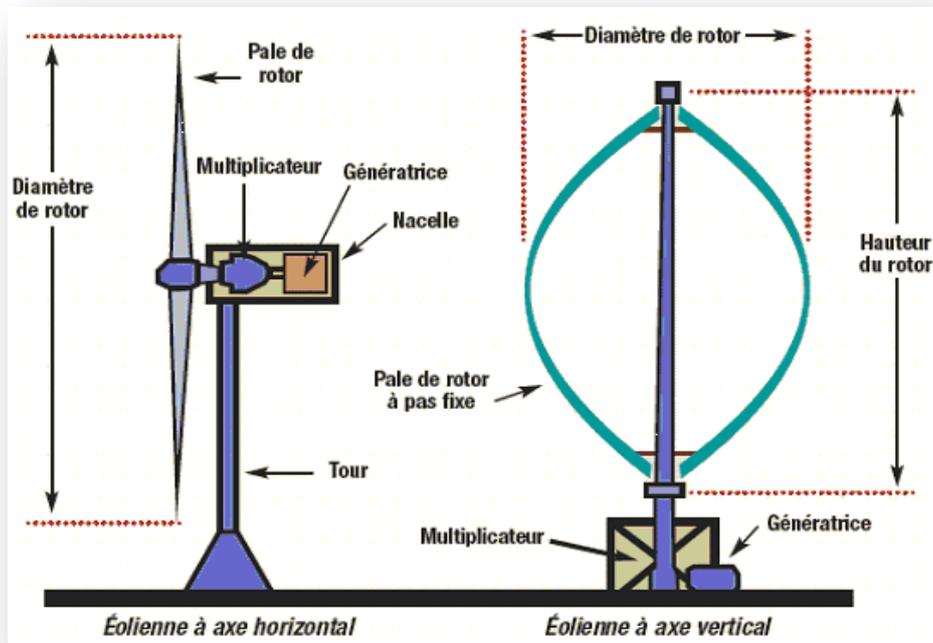


Figure I.8:deux types des éoliennes [18]

### I.6.1 Eolienne à Axe Vertical :

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. [8]

On trouve deux types :

- (a) Rotor de Darrieus.
- (b) Rotor de Savonius.



(a): Rotor de Darrieus

(b): Rotor de Savonius

**Figure I.9 : éoliennes à axes Vertical [9]**

### I.6.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ces éoliennes sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion (figure 1-7). La portance de ces ailes placées dans le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe [4]... Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de transmission est parallèle au sol. Les concepts

Abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. [10]



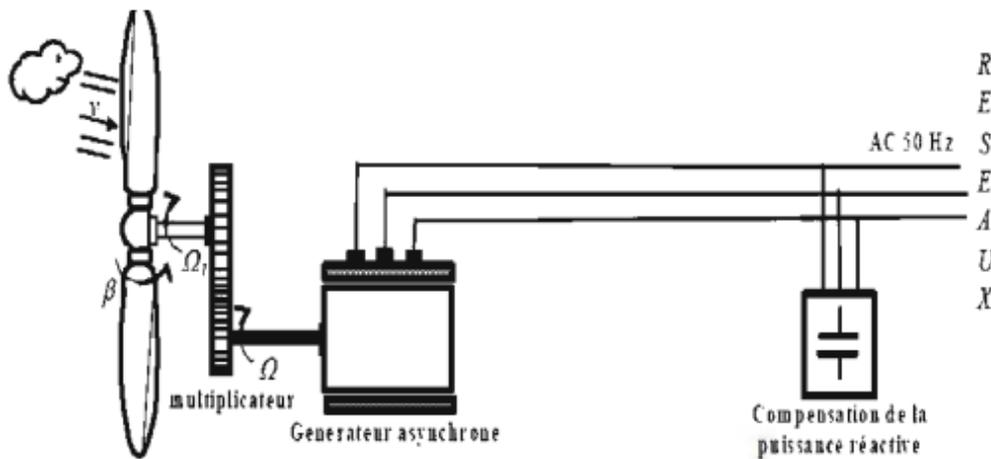
**FigureI.10: éoliennes à axe horizontal [11]**

## **I.7 Structure Des Systèmes Éoliennes :**

### **I.7.1 Eolienne A Vitesse Fixe :**

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure 2-10). Cette machine est entraînée par un multiplicateur, lorsque sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme.

Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances. Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau [12][13]



**Figure I.11: Éolienne à vitesse fixe**

### I.7.2 Les éoliennes à vitesse variables :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence [15], une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15% plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe . [14][15]

### I.8 Avantages Et Inconvénients De L'énergie Eolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après. [16][17]

#### I.8.1 Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Cette source d'énergie est peut être intéressante pour les pays en voie de développement.

Elle répond au besoin d'énergie qu'ont ces pays pour se développer .L'installation pour des faibles puissances dans un contexte de faible puissance d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple .Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l' énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.

- L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres gazes à effet de serre. [16][17]

### **I.8.2 Inconvénients :**

- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- Le bruit qui vient du multiplicateur.
- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. [17]

### **I.9 Conclusion :**

Le développement des énergies renouvelables ne répond pas seulement à un enjeu environnemental, mais correspond à un besoin de diversification de nos sources d'énergies. Cependant, si leurs atouts économiques et écologiques sont indéniables, leur puissance énergétique ne permettra pas de les substituer complètement aux énergies fossiles, compte-tenu de nos modes de consommations actuels. Même en exploitant toutes les sources d'énergie possibles, le passage aux énergies renouvelables implique des transformations majeures dans les modes de production, de transports ... Nous pensons que seul un mode d'organisation nouveau, fondé sur l'efficacité énergétique semble réaliste dès lors que les énergies fossiles s'épuiseront ou que les changements climatiques l'imposeront. [18]

## **Chapitre II : Modélisation de La Turbine éolienne**

## II.1 Introduction:

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 17 GW de puissance installée.

Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée qui dépassera les 160 GW. [21]

Dans ce chapitre, on présentera les différentes structures d'éoliennes existantes. Puis, les principes de conversion des énergies à partir de la source primaire (le vent) et jusqu'à arriver à une forme finale (électricité) en exposant les principales stratégies utilisées pour arriver à cela.

## II.2 description du système éolienne :

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une GADA, est illustré à la Figure (II.1). La turbine, via un multiplicateur, entraîne la GADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés par le rotor. [22]

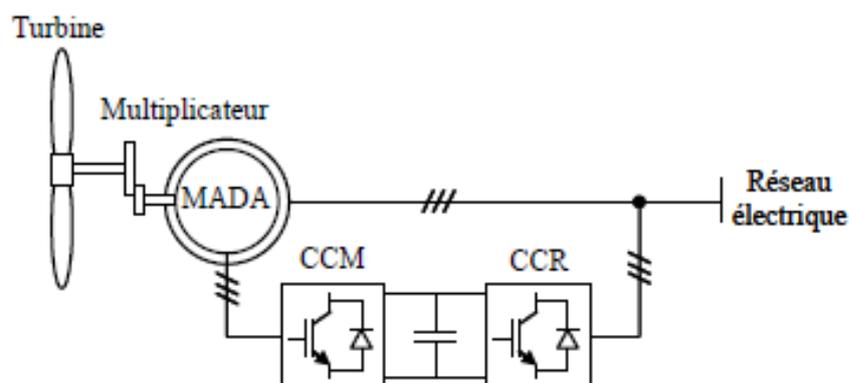


Figure II.1 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA (24)

## II.3 Modélisation de la turbine éolienne :

### II.3.1 Modélisation de la turbine:

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur éolien Figure(II.2). Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe d'un angle  $\beta$ , contrôlé par un système électromagnétique. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ . [23][24]

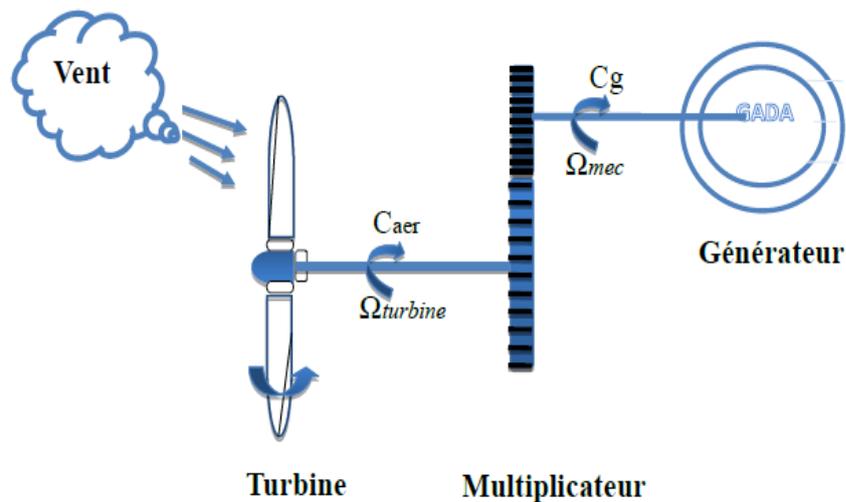


Figure. II. 2: Schéma de la turbine éolienne [24]

### II.3.2 La puissance d'une éolienne :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon  $R$ , est donnée par la relation suivante : [27] [28]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.1})$$

$\rho$ : la masse volumique de l'air ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).

$S$ : Surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la Longueur de pale).

$V$ : vitesse du vent [m/s].

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

$$P_{a\grave{e}ro} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot v^3 \quad (\text{II.2})$$

$C_p(\lambda, \beta)$ : Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend du dimensionnement de la pale, du coefficient de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ .

$\lambda$ : Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent  $V$ .

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (\text{II.3})$$

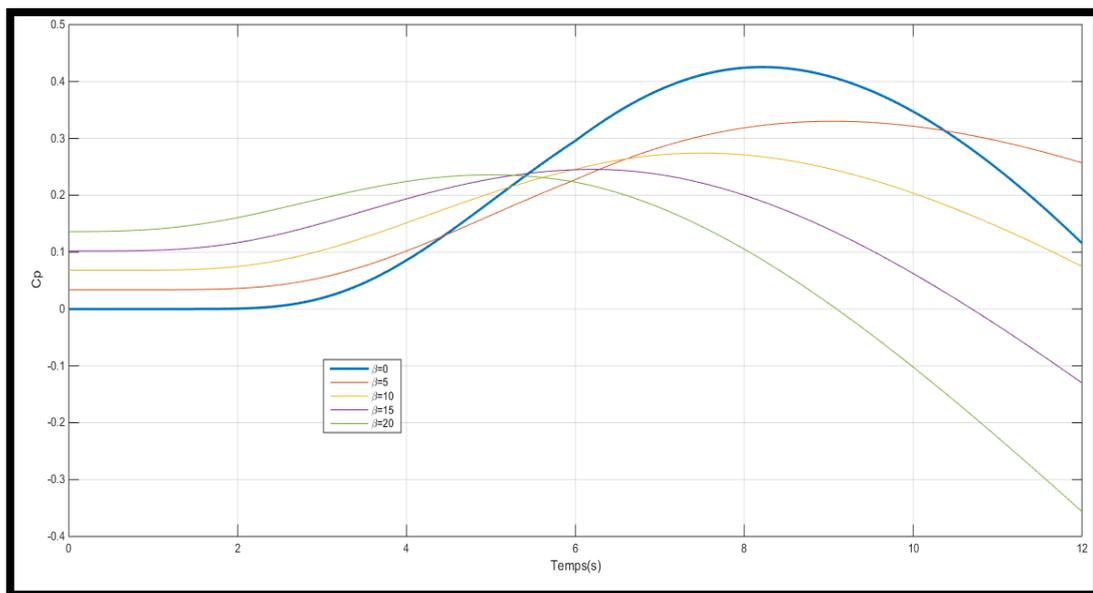
$\Omega_{turbine}$ : Vitesse de la turbine. Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé directement par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.4})$$

### II.3.3 Coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.3) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$  pour une éolienne de 1.5 MW prise comme exemple d'application dans cette étude.

Les caractéristiques de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle de calage  $\beta$  sont illustrées sur la figure (II.3).



**Figure.II.3 : Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$**

La figure (II.3) montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  pour différentes valeurs de  $\beta$ . On obtient un coefficient de puissance maximum de 0.43 pour un ratio de vitesse  $\lambda$  qui vaut 8.1 ( $\lambda_{opt}$ ). En fixant  $\beta$  et  $\lambda$  respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale.

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante : [26][27]

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \text{ Et } C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068$$

B: angle d'orientation des pales ;

### II.3.4 Modèle du Multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_{mec} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$C_{mec}$ : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

$G$ : Rapport de multiplicateur. [23]

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turbine} \quad (\text{II.7})$$

$\Omega_{mec}$ : La vitesse angulaire de rotation de la génératrice (rad / s) ou (tr/min).

### II.3.5 Equation dynamique de l'arbre :

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J(T) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.8})$$

$C_{mec}$ : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice  $C$ , le couple de frottement visqueux  $C_{vis}$  et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.9})$$

Le couple de frottement visqueux est modélisé par :

$$C_{vis} = f_T \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.10})$$

Où :

$J_T$ : Inertie total

$f_T$ : Coefficient de frottements visqueux total (N.m.s/rad).

$C_{mec}$ : le couple mécanique .

$C_{em}$ : Le Couple électromagnétique du générateur.

$C_{vis}$ : Le couple des frottements visqueux

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc du modèle de la turbine (Figure II.4).

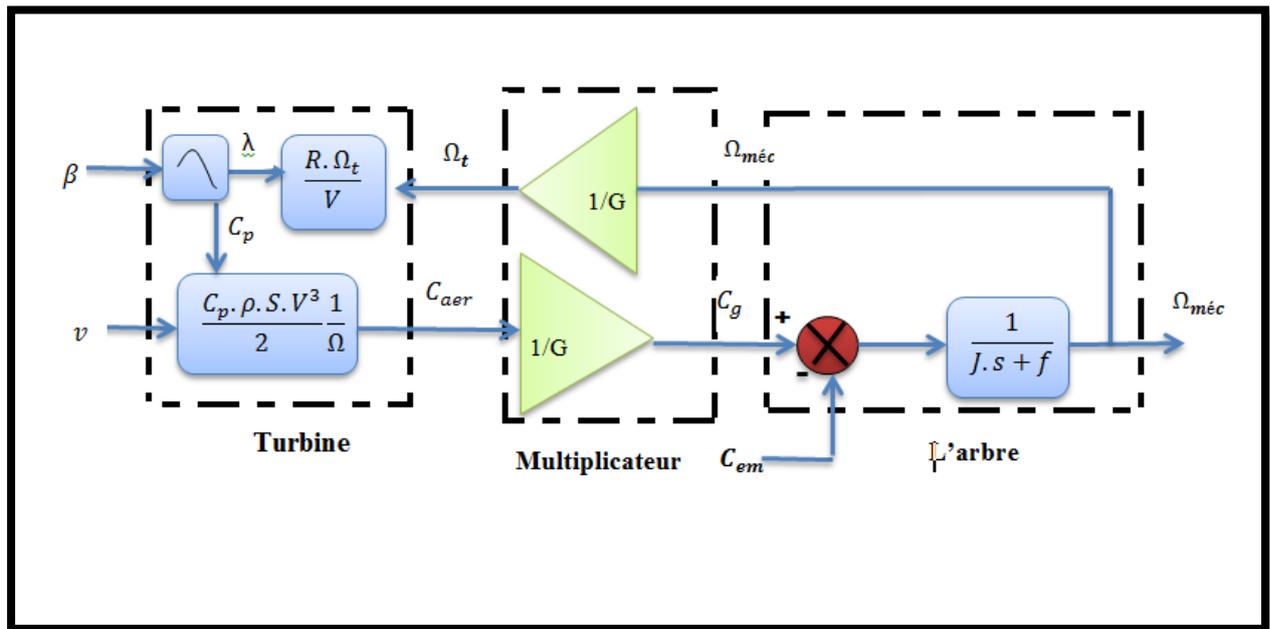


Figure II.4: Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

## II.4 Stratégie de commande de la turbine éolienne :

### II.4.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons : L'anémomètre est située derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent. Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparait selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément a une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse. [28]

$$\frac{d\Omega}{dx} = \frac{1}{J}(Cg - Cem - Cr) \quad (\text{II.11})$$

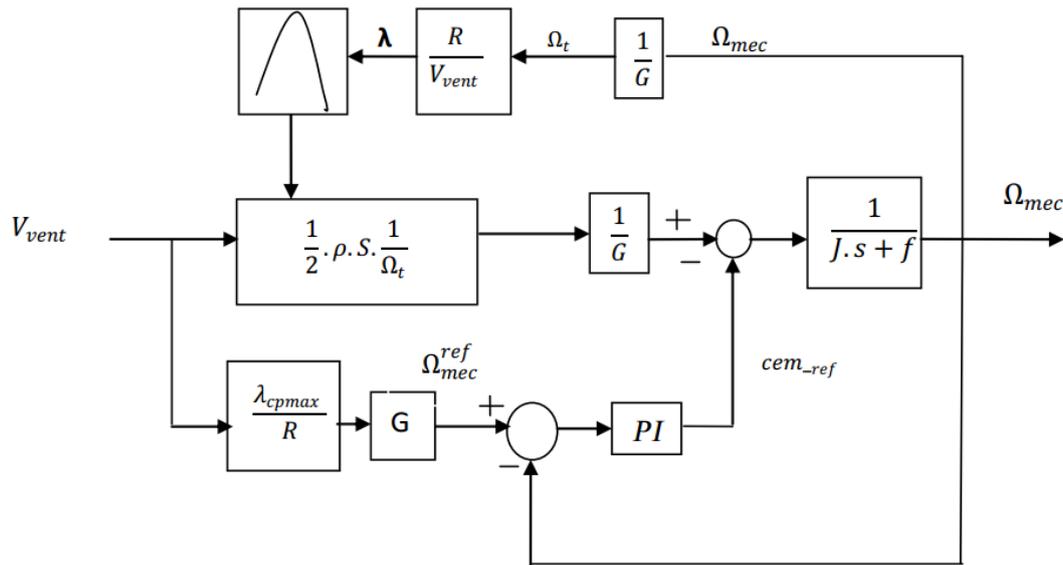
Avec J: l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice. Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine  $C_{aer}$  de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est basé sur la relation suivante:

$$C_{em-ref} = (s)(\Omega_{ref} - \Omega) \quad (\text{II.12})$$

(s): Fonction de transfert du régulateur de vitesse.

Cette vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  dépend de la vitesse de la turbine à fixer  $\Omega_t$  pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  ( $\beta$  constant) permettant d'obtenir la valeur maximale de  $CP$ . Alors, on peut écrire : [29]

$$\Omega_{ref} = \frac{R.V}{\lambda_{opt}} \quad (II.13)$$

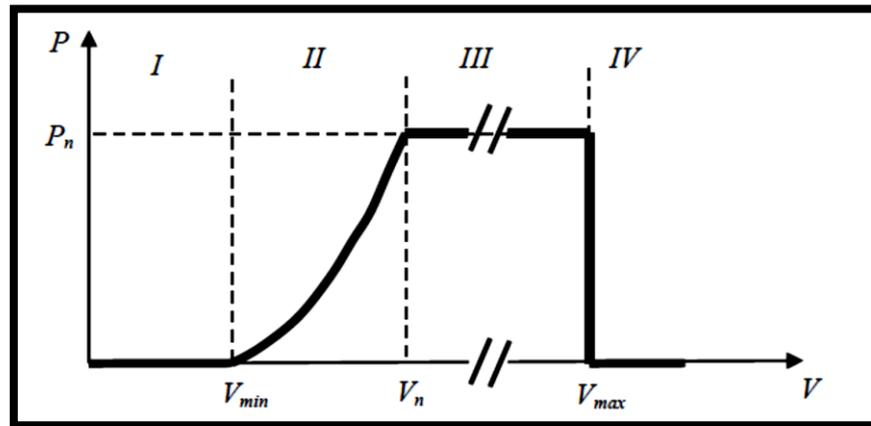


**Figure II.5: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse**

### II.5 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne:

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $n P$  à une vitesse de vent nominale  $n V$ , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale  $max V$  qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement. [29]

- **La zone I:** le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- **La zone II:** la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- **La zone III:** la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et La puissance  $P$  fournie reste égale à  $P n$ .
- **La zone IV:** la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta=90$ ). [30]



**Figure II.6 : Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique.**

La majorité éoliennes connectées au réseau électrique sont équipées d'un dispositif de réglages de l'incidence des pales pour pouvoir fonctionner à une vitesse quasiment constante, ainsi pour avoir une tension à fréquence constante pour différents vents. Deux principes majeurs sont utilisés pour la régulation des éoliennes de moyenne et grande puissances :

- ✓ Le système « pitch » ou « pas de calage variable ».
- ✓ Le système « stall » ou « à décrochage aérodynamique ».

### II.5.1 Système à décrochage aérodynamique "stall":

Le système « stall » est beaucoup moins lourd et moins coûteux que le système décrit précédemment. En effet, c'est le profil des pales établi lors de la construction qui fixe les caractéristiques aérodynamiques. Les pales sont conçues avec un profil, qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée.

Les éoliennes munies du système stall génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent. [30] [29]

### II.5.2 Système d'orientation de pales « pitch » :

est de ce fait un principe plus simple. Lorsque les conditions de vent l'exigent, on opère une rotation d'une partie ou de l'ensemble de la pale autour de son axe de pas. La modification de l'angle de l'écoulement sur les profils change la portance associée. Pour démarrer l'éolienne, il suffit d'adopter le calage nécessaire pour les sections « pied de pale » et de réduire ce calage progressivement en fonction du vent jusqu'au régime nominal. [30]

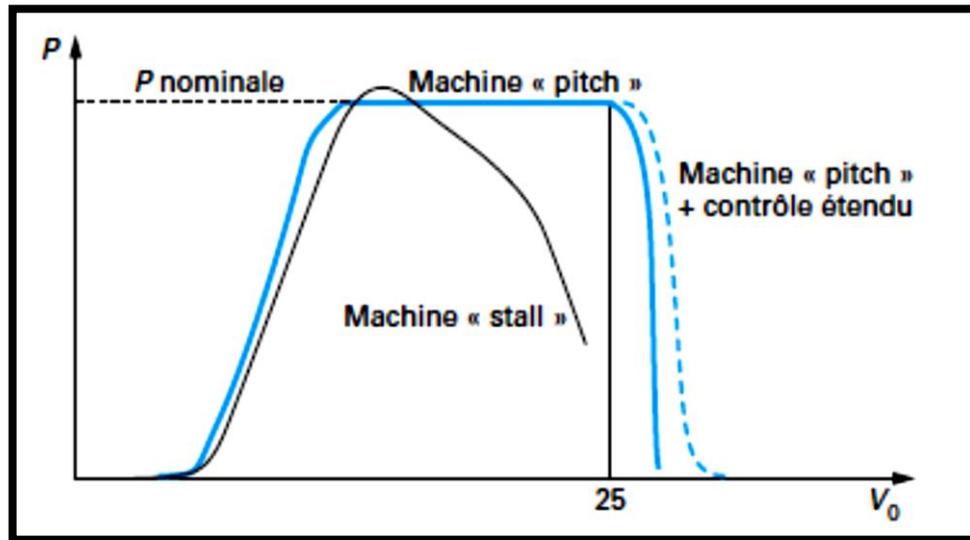


Figure II.7: caractéristiques de puissance

## II.6 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de décrire les étapes de modélisation d'une turbine éolienne destinée à entraîner une machine asynchrone double alimentation.

Afin d'améliorer son rendement et diminuer le coût, nous avons choisi d'étudier une éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation. Ainsi nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec cette machine. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité pour être exploité en simulations.

Les simulations de la partie mécanique de l'éolienne ont montré l'évolution du couple et la puissance mécaniques produits en fonction de la variation de la vitesse du vent et la vitesse mécanique de l'éolienne.

Chapitre III :  
Machine Asynchrone à  
Double  
Alimentation

### III.1 Introduction :

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation [33] ce qui permet de fonctionner sur une large plage de vitesse et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse du vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique, un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est principalement la raison pour laquelle on trouve ce type de génératrice pour la production de forte puissance [34]. Nous verrons dans ce chapitre la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant. Des résultats de simulation sont présentés pour juger l'efficacité du modèle de la génératrice proposé.

### III.2 Constitution de la Machine Asynchrone à Double Alimentation(MADA) :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine. En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variable de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme.[31]

### III.3 Principe De Fonctionnement :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de  $f_{mms}$  des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire  $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des  $f_{mms}$  des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que : [32]

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

Où :

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

Pour  $\omega_r = \omega_s$  le rotor est à l'arrêt. Dès que  $\omega_r$  est légèrement différents de  $\omega_s$ , la

machine se met en rotation dans un sens ou dans l'autre selon que  $\omega_r$  soit  $<$  ou  $>$  à  $\omega_s$ . Par contre, si  $\omega_r$  est très différents de  $\omega_s$  la machine ne peut pas démarrer .

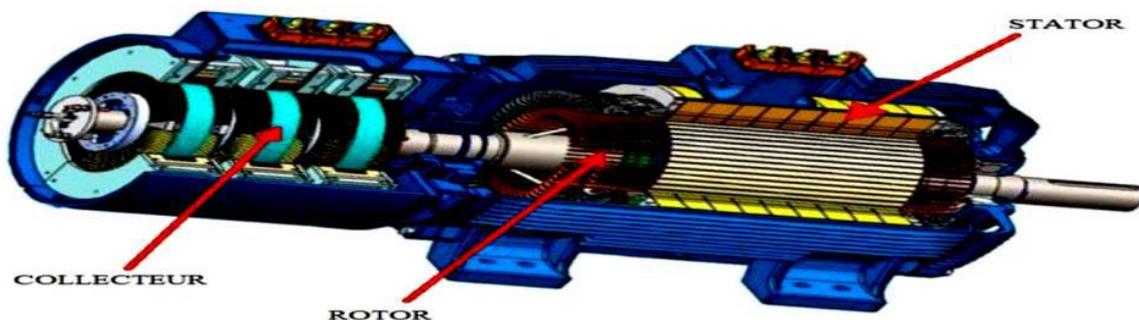
Pour que la rotation du vecteur résultant des  $f_{mms}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de  $\omega_{gl} = 2. \pi. f_r$  ; c'est-à-dire :

$$f_r = g. f_s \quad (\text{III.2})$$

#### III.4 Structure de La MADA :

La machine asynchrone double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles vient s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne figure( III.1) . [35]



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

#### III.5 Classification des machines à double alimentation :

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation.

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous. [36]

### III.5.1 MADA à Rotor Bobinée :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. [37]

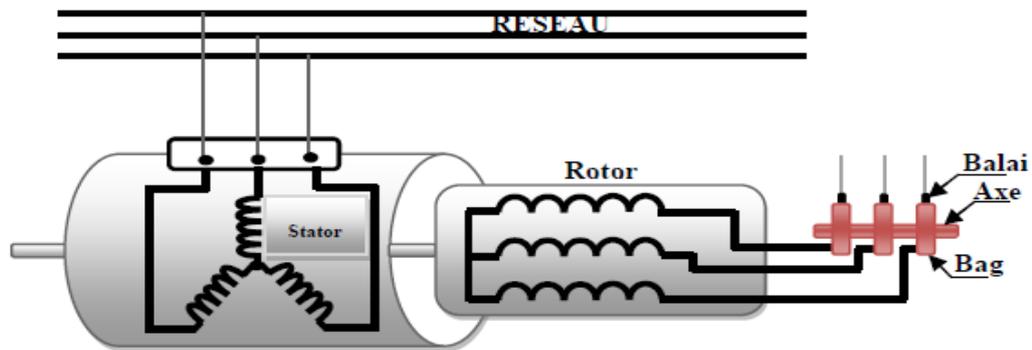


Figure III.2: schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné [38]

### III.5.2 MADA Sans Balais :

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil. [38]

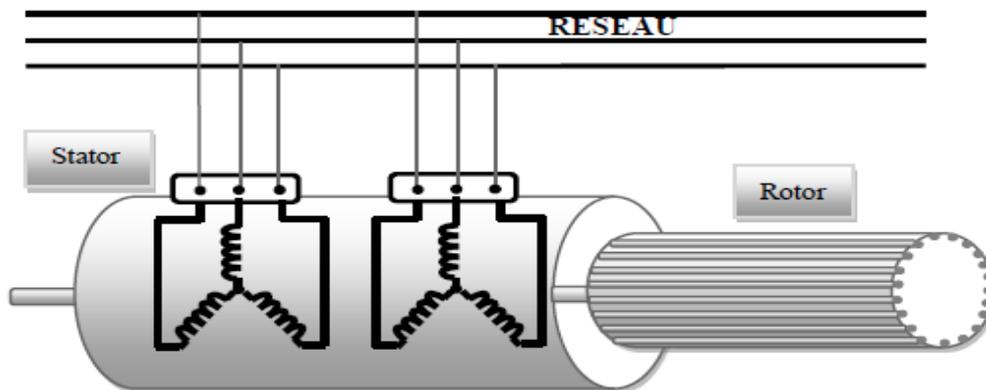


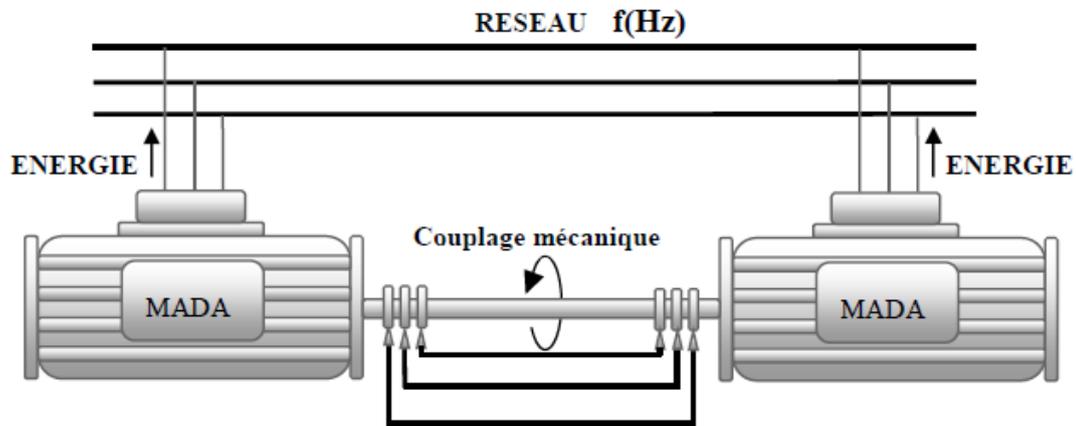
Figure III.3 : Structure de la MADA sans balais [38]

Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

### III.5.3 MADA En Cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double

alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées. [38]



**Figure III.4 : Structure en cascade de deux machines asynchrones.**

### III.6 Les Avantages Et Inconvénients De La MADA :

#### III.6.1 Les Avantages :

- Les convertisseurs statiques utilisés sont :
  - moins volumineux.
  - moins coûteux.

Nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd . [39]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

- Transfert bidirectionnel de la puissance rotoriques . [40]
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale . [41]
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
  - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
  - Régulation découplée des puissances active et réactive . [40]

### III.6.2 Les Inconvénients :

Comparativement aux autres machines (MAS et MSAP), la MADA présente des inconvénients liés essentiellement au système bagues-balais comme :

- Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais.
- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire. [42][43]

### III.7 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles. Les trois enroulements du stator (A, B, C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. Figure(III.5) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone a rotor bobiné a une paire des pôles  $p=1$ . Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de 120. Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite. [42]

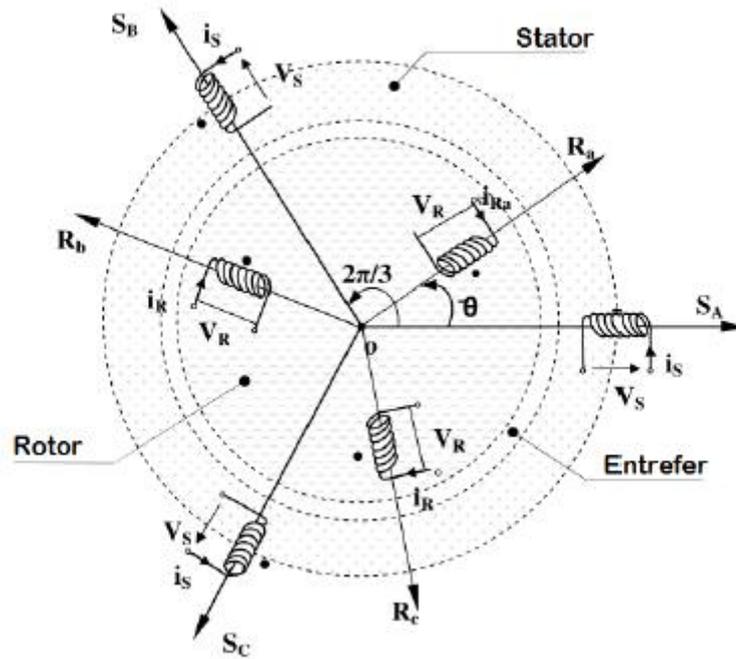


Figure III.5 :Représentation schématique de la MADA

Telle que :

$a_s, b_s, c_s$  : correspondent aux trois phases du stator.

$a_r, b_r, c_r$  : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes Od et Oq, sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.

$(Oas, Od) = \theta_s$ ,  $(Oar, Od) = \theta_r$ ,  $(Oas, Oar) = \theta_s - \theta_r = \theta$

$\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique ( $a_s$ ) et la phase rotorique ( $a_r$ ), d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_s}{dt} - \frac{\theta_r}{dt} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$\omega = p\Omega$

$\Omega$  :est la vitesse de rotation angulaire mécanique.

$P$  :c'est le nombre de paires de pôles.

### III.7.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

–Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;

- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

- ✓ Nous supposons que la machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques. [40]

### III.7.2 Equations de la MADA :

- **Equations électriques :**

La loi de Faraday, qui exprime la tension  $v$  aux bornes d'une bobine, est donnée la relation suivante

$$\frac{d\phi}{dt} = V - Ri \quad (\text{III.4})$$

Appliquons cette relation aux enroulements triphasés du stator et du rotor, nous trouvons

- **Pour le stator :**

$$\begin{cases} V_{Sa} = R_s i_a + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{Sb} = R_s i_b + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{Sc} = R_s i_c + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Où :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (\text{III.6})$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_a + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_b + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_c + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Où :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (\text{III.8})$$

Les équations électriques des enroulements illustrés par la s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad (\text{III.11})$$

$$[I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad (\text{III.12})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad (\text{III.13})$$

Et :

$[V_{as} V_{bs} V_{cs}]$  Vecteur des tensions instantanées des phases a,b et c statoriques

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T = [i_{abc}]_s$  Vecteur des courants instantanés des phases a,b et c statoriques

$[\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T = [\Phi_{abc}]_s$  Vecteur des flux instantanés des phases a,b et c statoriques

$[U_{ra} \ U_{rb} \ U_{rc}]^t = [U_{abc}]_r$  Vecteur des tensions instantanées des phases a,b et c rotoriques.

$[i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t = [i_{abc}]_r$  Vecteur des courants instantanés des phases a,b et c rotoriques

$[\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^t = [\Phi_{abc}]_r$  Vecteur des flux instantanés des phases a,b et c rotoriques

$R_s$  et  $R_r$  : Résistances d'une phase statorique et d'une phase rotorique

- **Equation de flux magnétique :**

Les équations des flux totalement couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

Pour le stator:

$$[\Phi_{abc}]_s = [L_s][i_{abc}]_s + [M_{sr}][i_{abc}]_r \quad ; \quad (\text{III.14})$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_{abc}]_r = [L_r][i_{abc}]_r + [M_{sr}][i_{abc}]_s \quad ; \quad (\text{III.15})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{saa} & L_{sab} & L_{sac} \\ L_{sac} & L_{saa} & L_{sab} \\ L_{sab} & L_{sac} & L_{saa} \end{bmatrix} \quad ; \quad (\text{III.16})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{raa} & L_{rab} & L_{rac} \\ L_{rac} & L_{raa} & L_{rab} \\ L_{rab} & L_{rac} & L_{raa} \end{bmatrix} \quad ; \quad (\text{III.17})$$

Ou:

$[L_s]$  est la matrice des inductances statoriques :

$[L_r]$  est la matrice des inductances rotoriques :

Avec :

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

**[Ls]** : matrice d'inductances statoriques.

**[Lr]** : matrice d'inductances rotoriques.

**[Msr]** : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

**[Mrs]** : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor

**[M<sub>0</sub>]** : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés)

**[θ]** : l'angle repère de l'axe d'une phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique.

- **Équation mécanique :**

L'équation mécanique de la machine fait liaison entre la partie mécanique et la partie électromécanique de la machine telle que :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{III.19})$$

**C<sub>em</sub>**: Couple électromagnétiques (N.m).

**C<sub>r</sub>** Couple résistant en (N.m).

**f<sub>r</sub>**: Coefficient de frottement en (N.m.s/rd)

**Ω** : vitesse angulaire mécanique du rotor en (rd/s) ; Avec :  $\Omega r = \omega_r / p$

**J**: moment d'inertie du rotor de la machine en Kg.m<sup>2</sup>

L'expression générale du couple est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I]^t \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} [L] \right] [I] \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$[L] \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [I] = [ I_{abc(s)} , I_{abc(r)} ]$$

L'équation mécanique qui en découle est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega_m = C_{em} - C_r \quad (\text{III.21})$$

Avec

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$$

Nous constatons les complexités des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant

dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps .

### III.7.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs  $ds, qs, dr, qr$  dont les axes magnétiques sont liés aux axes  $(d-q)$  conformément à la figure(III.6). [44][45][46]

Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux. La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réels leurs composantes :Direct selon l'axe  $(d)$ , quadrature (transversal) selon l'axe  $(q)$ , homopolaire(o).

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct  $d$  et axe en quadrature  $q$ ) [47]

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- o:indice de l'axe homopolaire.
- d:indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

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

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

$R_s$  et  $R_r$  : sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques,

$L_s, L_r$  et  $M_{sr}$  : sont respectivement les inductances propres statoriques, rotoriques et la mutuelle inductance entre les deux bobinages.

$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}$  : sont les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sd} i_{rq} - \Phi_{sq} i_{rd}) \quad (\text{III.29})$$

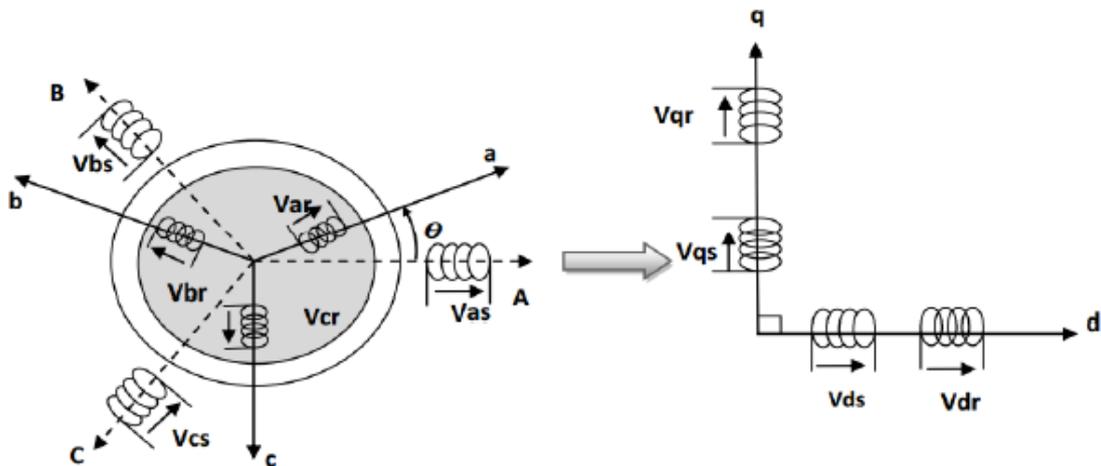


Figure. III.6 :Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

#### III.7.4 Application de la Transformation de Park à la MADA :

Les équations reliant les composantes des grandeurs électriques dans les deux référentiels, nouveau (dq) et ancien (a, b, c) s'écrivent sous forme matricielle suivante:

- Pour les tensions:

$$\begin{aligned} [V_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[V_s] \quad , \quad [V_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[V_r] \\ [V_s] &= [P(\theta_s)][V_{dq}]_s \quad , \quad [V_r] = [P(\theta_s)][V_{dq}]_r \end{aligned} \quad (\text{III.30})$$

- Pour les courants:

$$\begin{aligned} [I_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[I_s] \quad , \quad [I_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[I_r] \\ [I_s] &= [P(\theta_s - \theta)][I_{dq}]_s \quad , \quad [I_r] = [P(\theta_s - \theta)][I_{dq}]_r \end{aligned} \quad (\text{III.31})$$

- Pour les flux :

$$\begin{aligned} [\varphi_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_s] \quad , \quad [\varphi_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_r] \\ [\varphi_s] &= [P(\theta_s - \theta)][\varphi_{dq}]_s \quad , \quad [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_{dq}]_r \end{aligned} \quad (\text{III.32})$$

### III.8 Choix du référentiel :

Le choix du référentiel dépend du problème à étudier. Il existe trois types de référentiel pour la machine asynchrone dont le choix dépend du type de problème à étudier [48][49]

#### - Référentiel lié au stator :

Ce Référentiel est mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées  $\omega_s = 0$

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_p}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{III.33})$$

Le repère lié au stator est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif. [45]

#### - Référentiel lié au rotor :

Ce Référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse de rotation est supposée constante  $\omega_r = 0$ .

Ce référentiel est caractérisé par :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_p}{dt} = \omega. \quad (\text{III.34})$$

#### - Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par :  $(\omega_p = \omega_s ; (\omega_r = \omega_s - \omega))$ .

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \Rightarrow \omega_p = \omega_s \quad (\text{III.35})$$

Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine. [48]

Le modèle mathématique de la MADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant

comme suit :

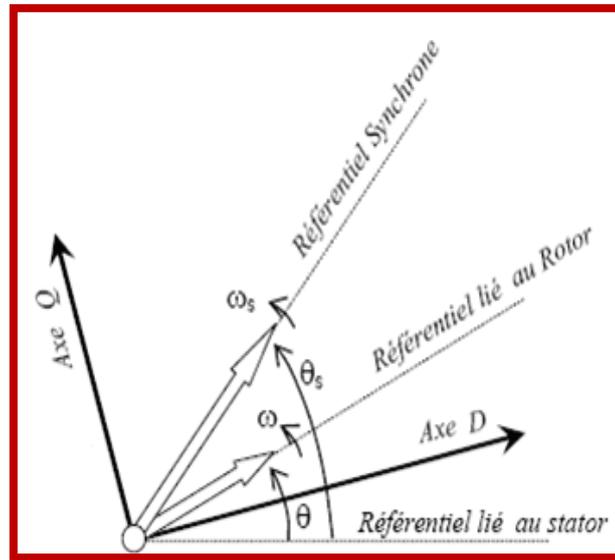


Figure III.7: Choix du référentiel

Les tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega \phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

Les flux statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{rs} I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{rs} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{dr}) \quad (\text{III.40})$$

Les puissances actives et réactives statoriques et sont définies comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

### III.9 Résultats de simulation :

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park. (Plan (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 7.5 KW.

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnant en générateur à rotor en Court- circuit sont présentés sur les figure (III.8), (III.9), concernant respectivement les variables d'états ( $I_{qr}, I_{dr}, I_{qs}, I_{ds}$ ), le couple et la puissance active et réactive du stator sur les figure (III.10), (III.11).

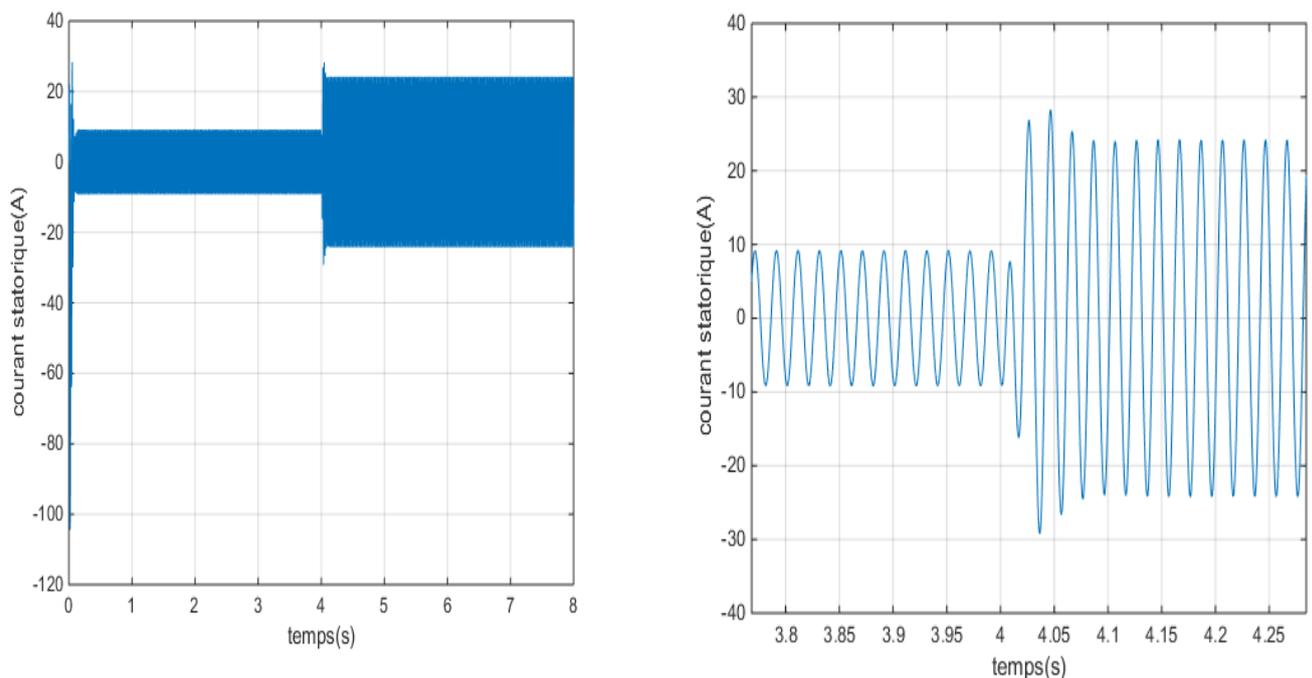


Figure III.8: Courant statorique avec zoom

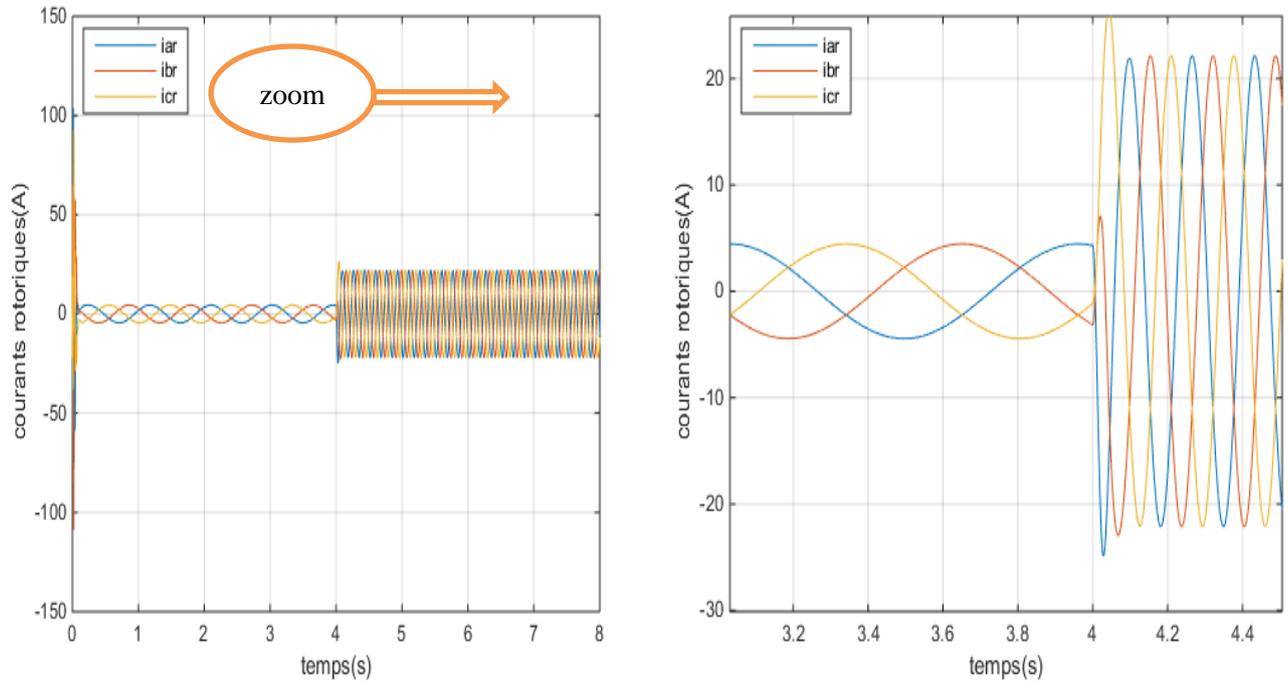


Figure III.9: Courant rotorique avec zoom.

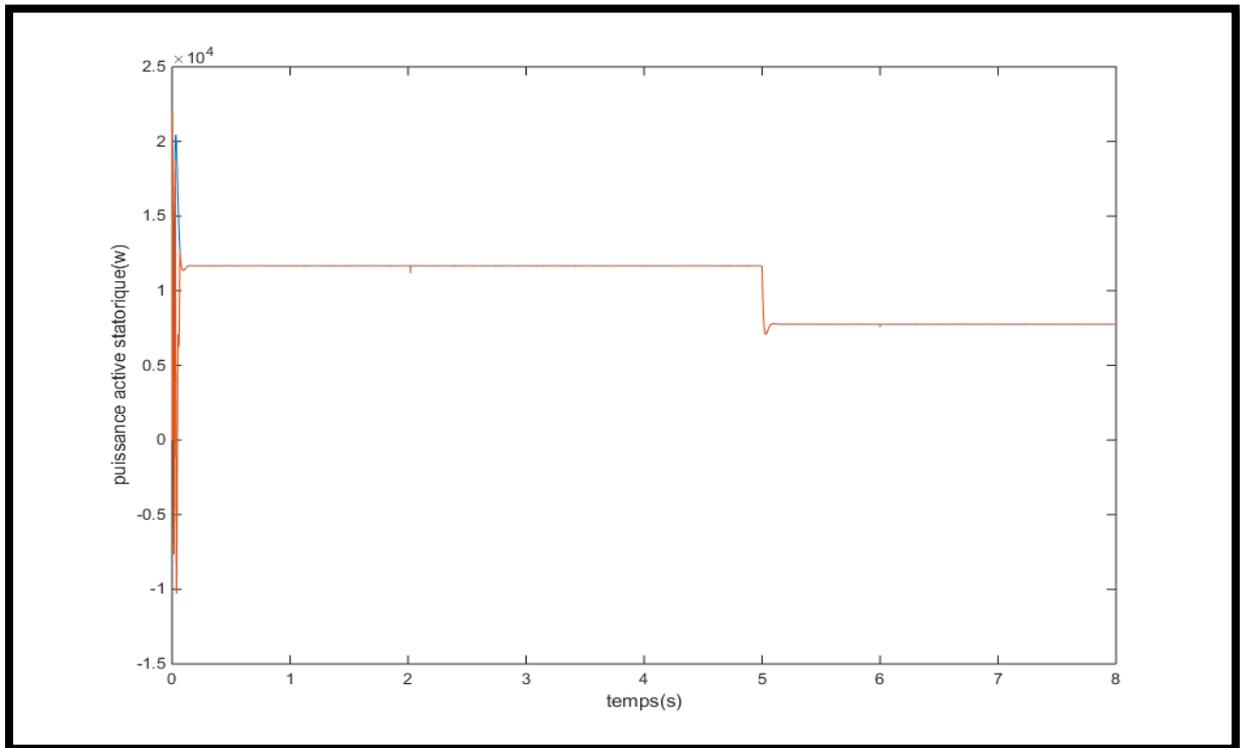
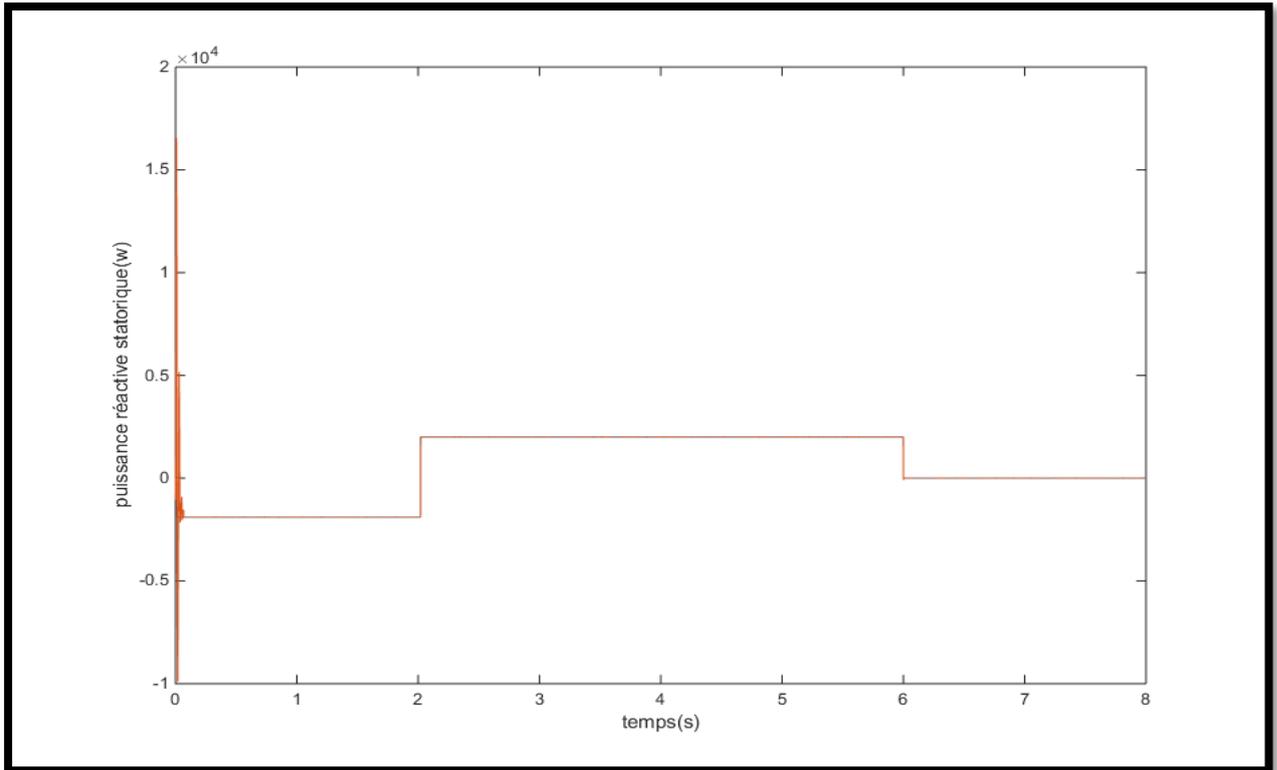
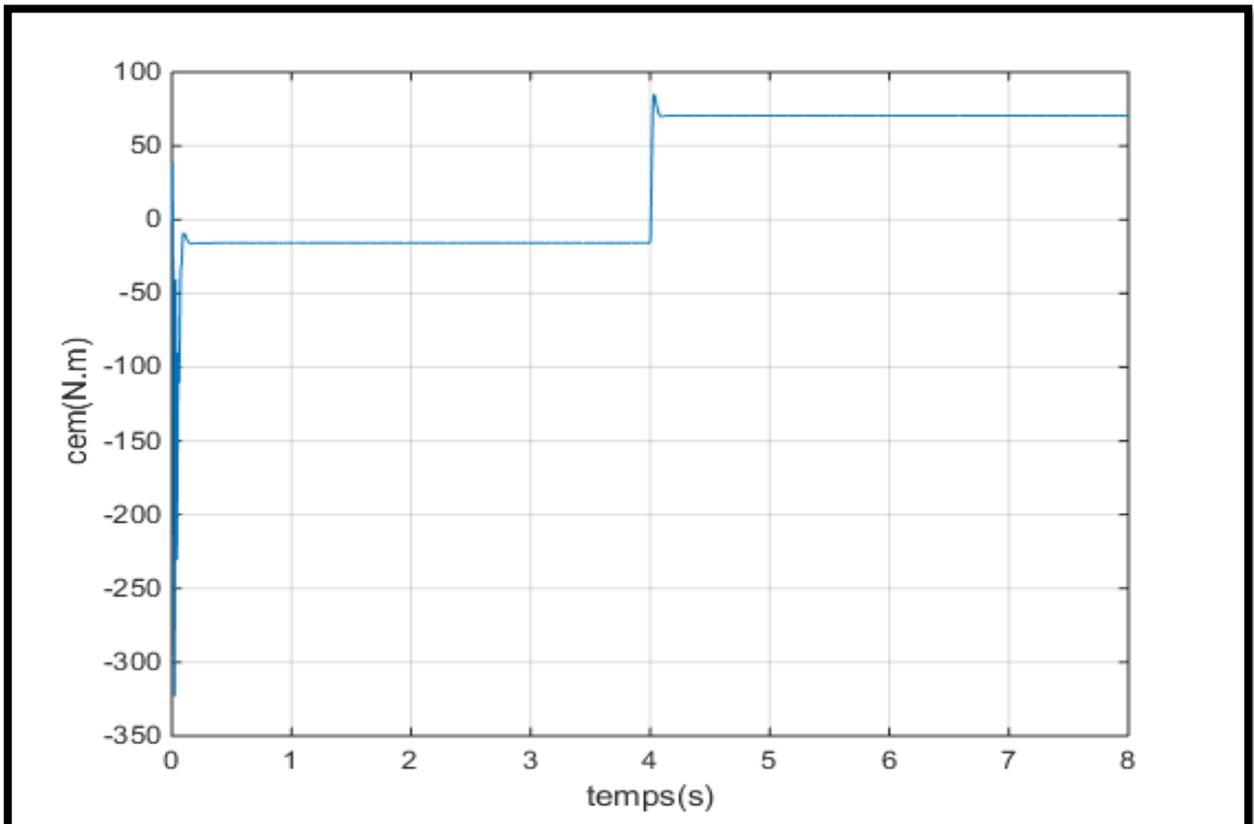


Figure III.10: Puissance active statorique



**Figure III.11: Puissance réactive statorique**



**Figure III.12: Le couple électromagnétique C<sub>em</sub>.**

On essaie de valider maintenant le modèle de la génératrice asynchrone doublement alimentée décrit par les équations trouvées avec la transformation de Park liée au champ tournant citées auparavant. La GADA utilisée est une machine de 7,5 kW à 2 paires de pôles dont la vitesse nominale est de 1500 tr/min.

Les figures (III.8, III.9, III.10, III.11, III.12) présente les résultats de simulation de la génératrice GADA. La figure (III.8 et III.9) présente la courants statoriques et rotorique.

La figure (III.12) présente la Variation du couple électromécanique (N.m) en fonction de temps (s) de la machine qui est dans un sens négatif et qui représente le fonctionnement en génératrice de la MADA.

Les figures (III.10 et III.11) présentent la variation des puissances active et réactive. Le signale de la puissance active est négative, c'est-à-dire la machine délivré la puissance dans le réseau. Les résultats obtenus montrent bien la non linéarité du système.

Des ondulations sont présentées au niveau des puissances, ces ondulation ne permet pas de connecté la GADA au réseau; qui exige la commande.

### **III.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en générateur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices Nous avons constaté que le modèle du MADA est un système à équations différentielles. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au champ tournant à l'aide de la transformation de PARK. Le chapitre suivant fera l'objet du découplage des puissances active et réactive par la commande vectorielle directe et indirecte basées sur la technique d'orientation du flux statorique.

*Chapitre IV :*  
Commande vectorielle  
des puissances de la  
GADA

**IV .1 Introduction :**

La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Le contrôle vectoriel de la GADA sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur) . [50]

L'objectif de ce chapitre est d'introduire des algorithmes de la commande vectorielle pour le contrôle des puissances active et réactive générées par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

**IV .2 Commande vectorielle de la MADA :****IV.2.1 Principe de la commande vectorielle de la MADA :**

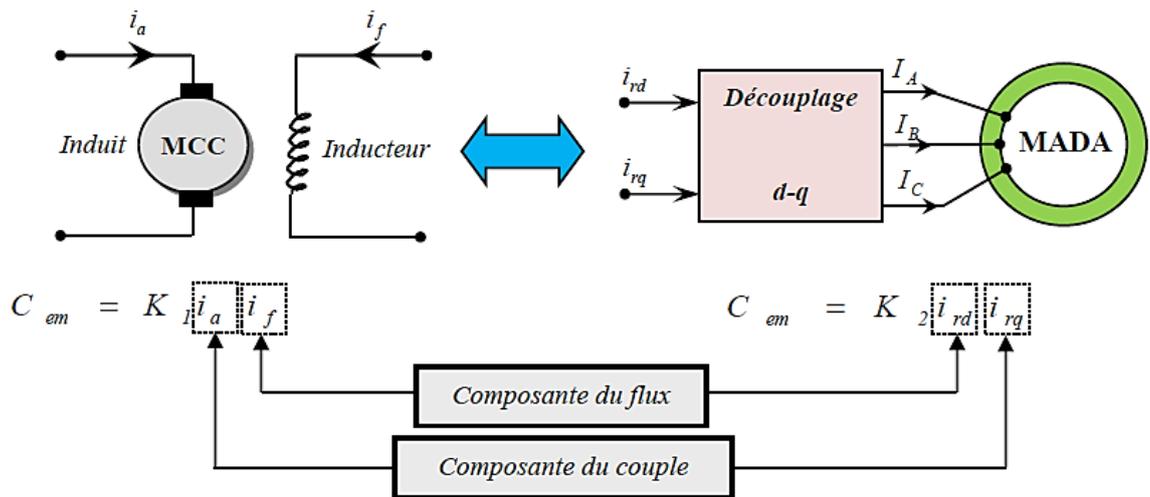
La commande par flux orienté (commande vectorielle) est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire mais très importante de l'électromagnétisme. [51]

A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ, il en résulte évidemment une force d'amplitude maximale pour des intensités de courant et de champ données quand le vecteur courant devient perpendiculaire au vecteur champ. [51]

Appliquée au moteur électrique, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas pour les machines à courant alternatif. Par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande de ces deux grandeurs.

La figure(IV.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machines à courant continu et la commande Vectorielle d'un GADA. [51]



**Figure IV .1 : Schéma de principe du découplage de la GADA par analogie avec la machine à courant continu [53]**

De nombreuses variétés ont été présentes dans les littérateurs, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension
- Commande en courant

Suivant l'orientation du repère:

- Le flux rotorique
- Le flux statoriques
- Le flux d'entre fer

Suivant la détermination de la position du flux:

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

L'examen de l'expression du couple de la machine montre qu'elle résulte d'une différence de deux composantes en quadrature du courant statorique et de flux rotorique qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine .Le référentiel de travail pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe ( $d$ ) coïncide avec la direction désiré du flux, qui peut être rotorique, statorique, ou d'entrefer. Ainsi il est possible d'orienter les différents flux de la machine. [54]

Le flux résultant  $\varphi$  peut être soit :

- Le flux statorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{IV .1})$$

- Le flux rotorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0 \quad (\text{IV .2})$$

- Le flux d'entrefer avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{gd} = \varphi_g \text{ et } \varphi_{gq} = 0 \quad (\text{IV .3})$$

#### IV.2.2 Les types de la commande vectorielle :

Il ya deux méthode :

##### IV.2.2.1 La commande vectorielle directe :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

Cette méthode de commande a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué.

L'avantage de prendre beaucoup moins ou dépend moins les variations de paramètres de la machine [54]. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement. [52]

##### IV.2.2.2 La commande vectorielle indirecte :

Cette commande est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire.

Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre . [55]

#### IV.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

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

stator de la machine [58] [59] . Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel  $(d, q)$  lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA :

- **Les équations des tensions:**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \quad (IV .4)$$

- **Equations des flux :**

$$\begin{aligned} \Phi_{sd} &= L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \Phi_{sq} &= L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \Phi_{rd} &= L_s I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} &= L_s I_{rq} + M I_{sq} \end{aligned} \quad (IV .5)$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

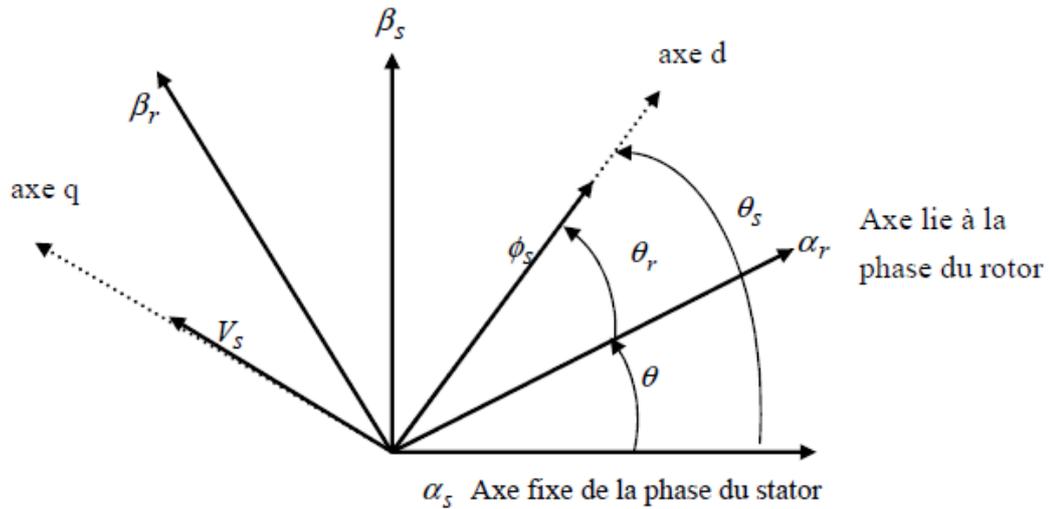
$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{dr}) \quad (IV .6)$$

#### IV.4 Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA:

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [56]. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée . [57]

##### IV.4.1 Relations entre courants statoriques et courants rotoriques:

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



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

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{dr}) \quad (\text{IV .7})$$

$$\Phi_{sd} = \Phi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (\text{IV .8})$$

$$\Phi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \quad (\text{IV .9})$$

$$V_{sd} = 0 \quad (\text{IV .10})$$

$$V_{sq} = V_s \approx \omega_s \cdot \Phi_s \quad (\text{IV .11})$$

nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{IV .12})$$

#### IV.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

Les puissances active et réactive statoriques peuvent être écrites selon les courants rotoriques comme suit :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \quad (\text{IV .13})$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \quad (\text{IV .14})$$

Si on considère l'inductance mutuelle  $M$  constante, on remarque que l'équation (IV.30) fait apparaître que la puissance active statorique  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique quadrature  $I_{rq}$ . De plus, la puissance réactive statorique  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$

**IV.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :**

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants rotoriques :

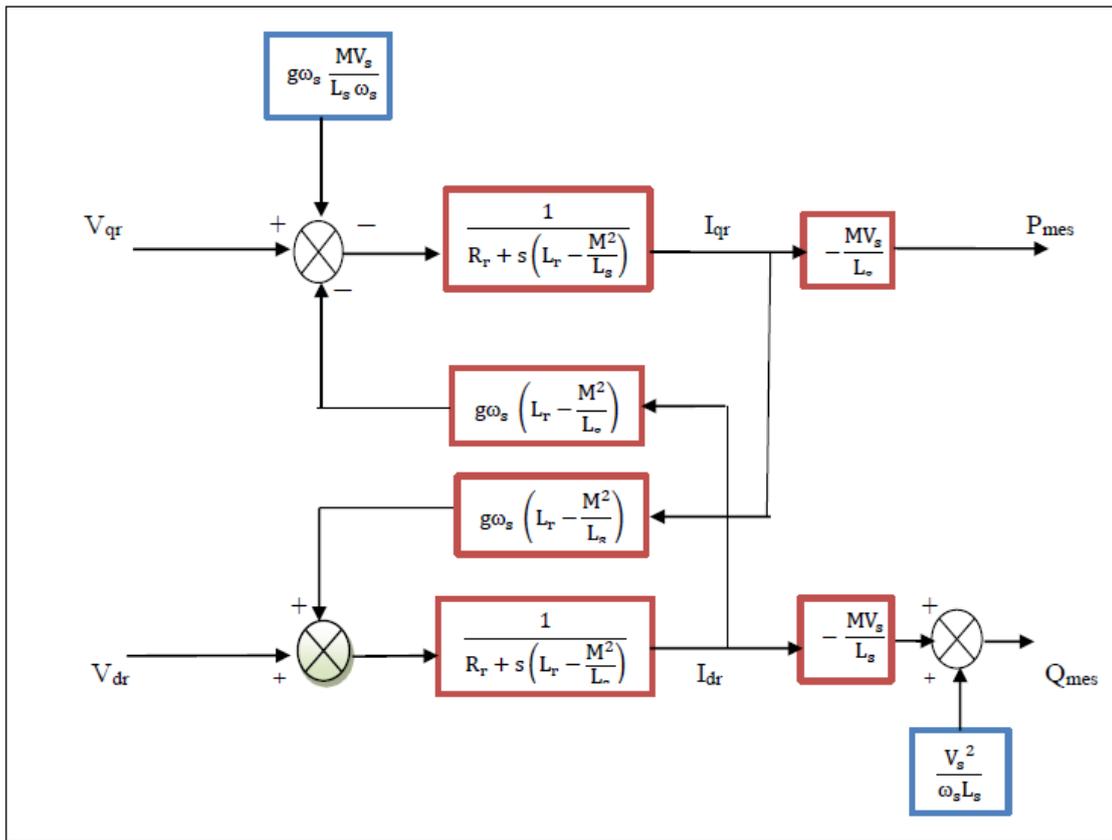
$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g\omega_s \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \quad (IV .15)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{Coefficient de dispersion.}$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} : \text{coefficient de glissement.}$$

Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré dans la Figure(IV .3):



**Figure IV.3 : Schéma bloc de la GADA**

Pour ce schéma bloc, nous considérons les tensions rotorique  $V_{rd}$ ,  $V_{rq}$  comme variables de commande et les courants rotoriques  $I_{rd}$ ,  $I_{rq}$  comme variables d'état intermédiaires. Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette Machine. [60][59]

#### IV.5 Commande vectorielle de la MADA en génératrice :

❖ **La première méthode** consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

❖ **La deuxième méthode** consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte** découle directement des équations (IV.12) et (IV.13).

##### IV.5.1 Commande directe en puissance active et réactive de la GADA :

Dans la méthode directe, l'idée de la régulation consiste à commander indépendamment et directement les puissances  $P$  et  $Q$  de la GADA.

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice . [60]

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (Figure(IV.3)) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la GADA dépendent des tensions rotoriques  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  à contrôlée. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $M$  . Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \cdot w_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \cdot w_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{IV} .16)$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$ : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

##### IV.5.2 Commande indirecte des puissances active et réactive :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler[60][56]. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on trouve

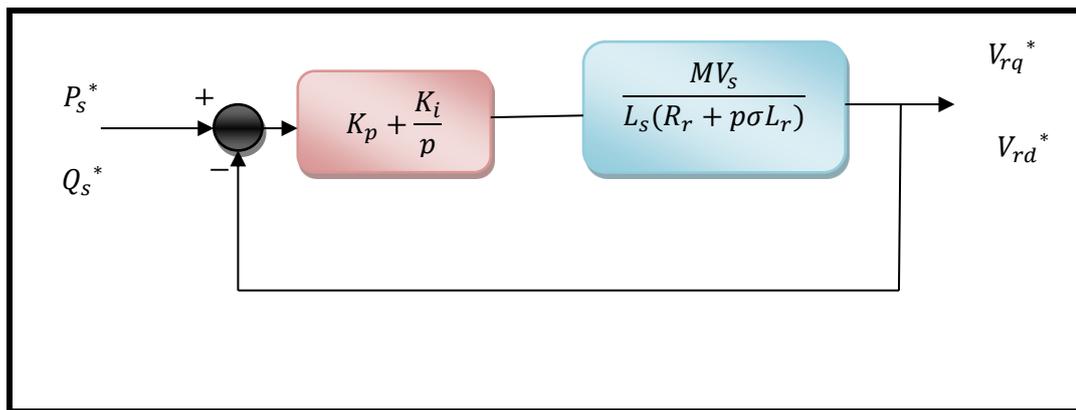
$$\begin{cases} V_{rd} = g \cdot w_s \frac{\left(L_r \frac{M^2}{L_s}\right)}{L_s} * P - \left(\frac{R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} * Q + \left(\frac{R_r \cdot V_s}{W_s \cdot M} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)\right) \frac{V_s}{W_s \cdot M} S \right) \\ V_{rq} = - \left(\frac{R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} S\right) * P - g \cdot W_s \frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{L_s} * Q + g \cdot W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{V_s}{W_s \cdot M} \end{cases} \quad (IV .17)$$

**IV.5.3 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI) :**

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour commander la GADA, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [53].L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action

Intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir . C'est pour cela qu'il a retenu pour notre système.

Les boucles de régulation des puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  peuvent se présenter par le schéma bloc de la Figure(IV .4):



**Figure IV.4: Système régulé par un PI.**

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe **d** et l'axe **q**.

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par l'équation suivante :

$$F_R(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (IV .18)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est donnée par :

$$FTBO (p) = \frac{K_i}{p} \left( p \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \cdot \frac{M V_s / L_s R_r}{(p \sigma T_r + 1)} \quad (IV .19)$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (IV .20)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i MV_s}{p L_s R_r} \quad (\text{IV .21})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (\text{IV .22})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure IV.4 sera :

$$FTBF(P) = \frac{1}{1 + p \frac{L_s R_r}{K_i M V_s}} = \frac{1}{1 + p \tau} \quad (\text{IV .23})$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s}$$

Avec  $\tau$  le temps de réponse du système qui d'après des études effectuées par de nombreux chercheurs sur ce type de régulations l'ont fixés à l'ordre de 200 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

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

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

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{L_s R_r}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (\text{IV .24})$$

Notons que la méthode de la compensation des pôles n'est bien entendu pas la seule alternative de calcul pour la synthèse d'un régulateur PI. Toutefois, elle présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de transfert du premier ordre et elle s'avère suffisante dans notre cas pour comparer le PI aux autres régulateurs.

#### IV.6 Résultats de Simulation :

Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MATLAB-Simulink. On note ici, dans cette partie les résultats de simulation ont été obtenus où la MADA est alimentée par un convertisseur coté rotor à partir d'une source continue.

## IV.6.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe :

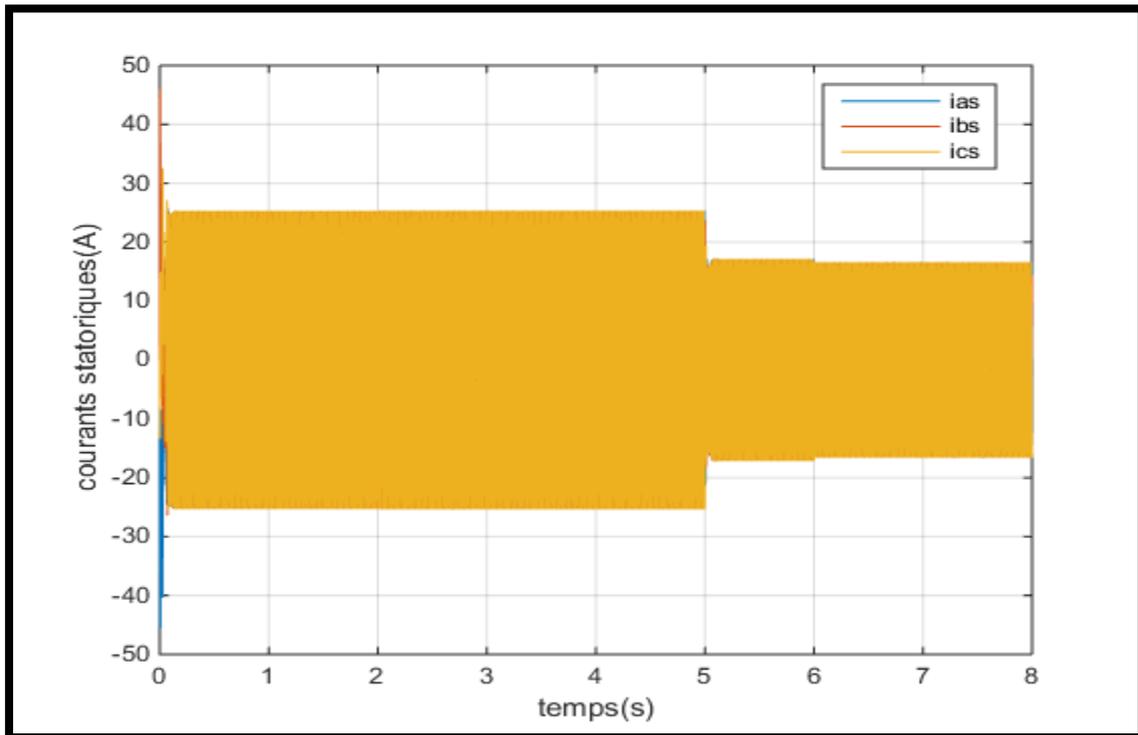


Figure IV.5 : Courants statoriques de la commande directe

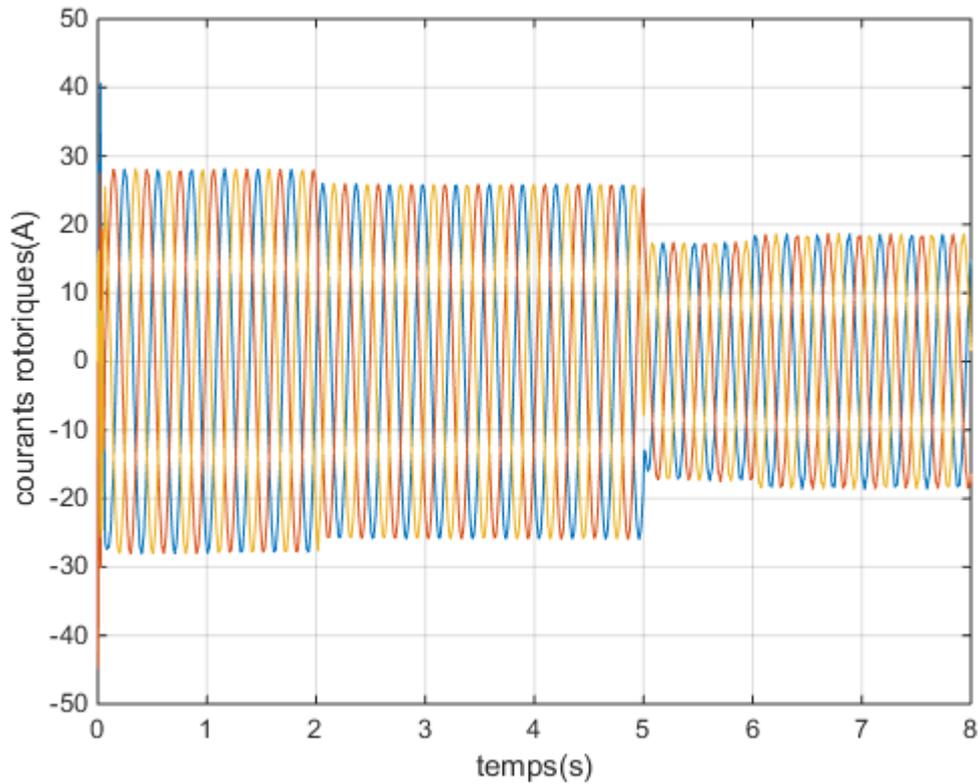


Figure IV.6 : Courants rotoriques de la commande directe.

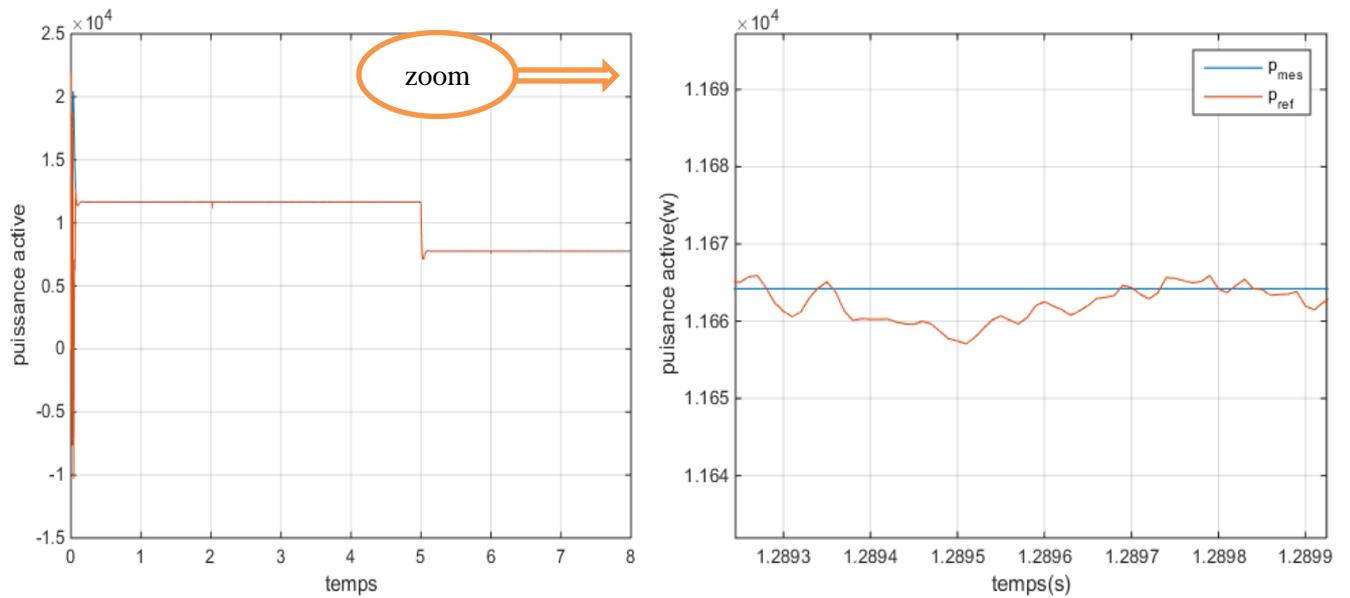


Figure IV.7 :puissance active de la commande direct avec zoom.

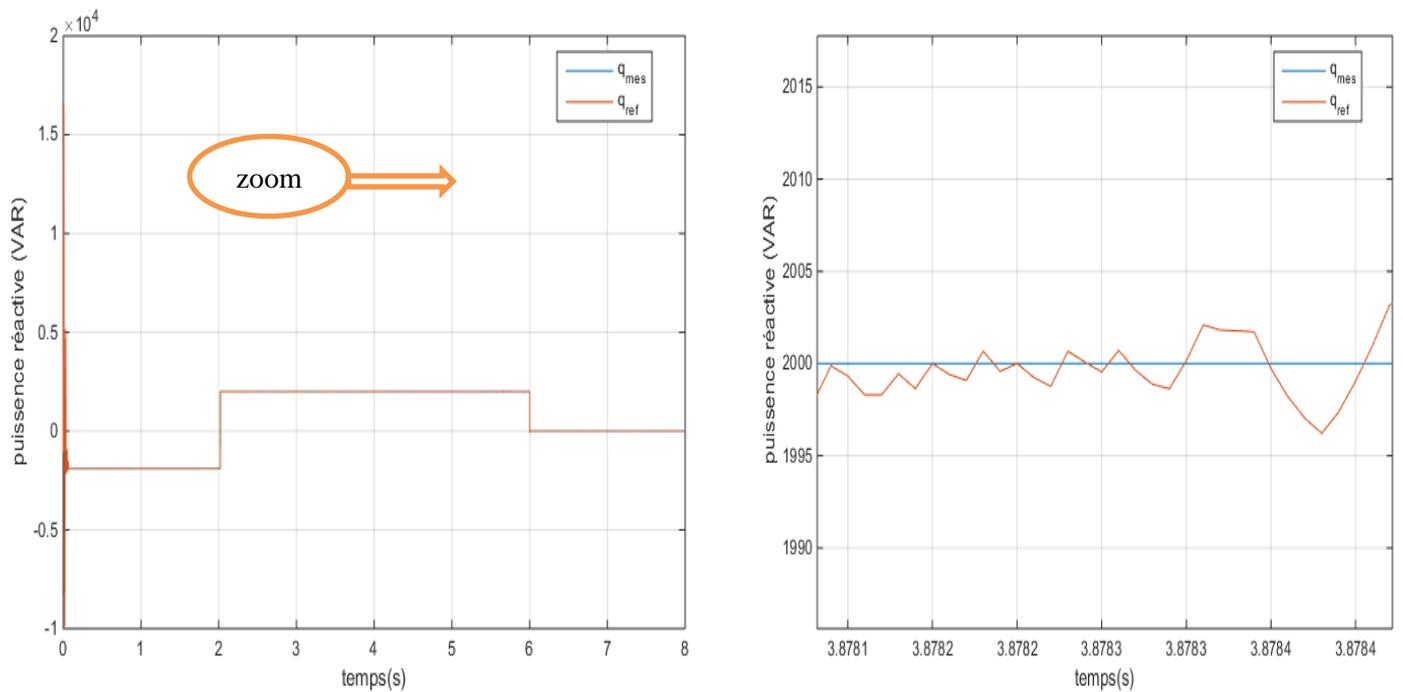
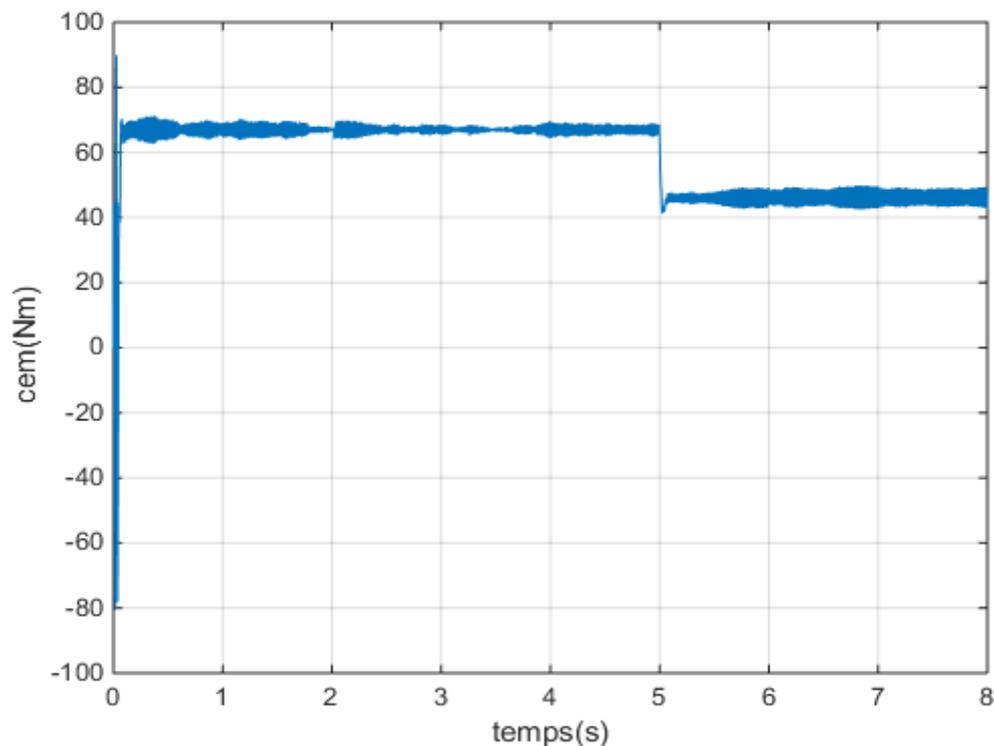


Figure IV.8 :puissance réactive de la commande direct avec zoom



**Figure IV.9:Le couple électromagnétique  $C_{em}$**

La stratégie de la commande directe en puissances de la GADA a été validée par simulation numérique en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink. Les paramètres de la génératrice utilisée pour la simulation sont donnés dans l'annexe. Afin d'effectuer des tests de la régulation, nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive.

❖ Pour la puissance active :

- De  $t=0s$  à  $t=5s$  : un échelon de 12000W ;
- De  $t=5s$  : un échelon de (12000 a8000) W ;
- De  $t=5 s$  à  $t=8 s$  : un échelon de 8000 W ;

❖ Pour la puissance réactive :

- De  $t=0s$  à  $t=2s$  : un échelon négatif de- 2000 VAR ;
- De  $t=2s$  à  $t=6s$  : un échelon négatif de 2000 VAR ;
- De  $t=6s$  à  $t=8s$  : un échelon nulle de 0 VAR ;

### **Interprétation des résultats :**

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou

encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique  $I_{rq}$  contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe  $I_{rd}$  contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

Dans le cas de commande directe Pour une variation de la résistance rotorique  $R_r$  de +50 % (Figure IV.7)et (Figure IV.8)qui correspond au cas d'échauffement du bobinage rotorique, les puissances active et réactive viennent à suivirent leurs consignes correctement.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la méthode directe utilisant des correcteurs  $PI$  présente un bon découplage et un réglage des puissances active et réactive au niveau du stator dans le cas d'un entraînement à vitesse constante de la GADA.

Cependant, cette méthode naturellement est moins performante pour un fonctionnement à vitesse variable. Ceci dû à la présence de certaines perturbations aux niveaux des puissances active et réactive comme le montre pour l'équation (IV .12)

**IV.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux méthodes de commande vectorielle en puissance appliquée à la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation à savoir : la commande directe et la commande indirecte

Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe  $d$ . La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répondeuse. Bien que la commande directe offre une simplicité de mise en œuvre avec des résultats appropriés, la commande indirecte, en revanche, justifie sa supériorité par la possibilité de contrôler les courants et de les limiter afin de protéger le bobinage rotorique de la machine. La synthèse du régulateur PI utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## **CONCLUSION GÉNÉRALE :**

L'objectif de ce travail était d'étudier et de simuler un système de production d'énergie éolienne. Nous avons modélisé différents composants d'un système éolien, puis utilisé ces modèles pour développer deux stratégies de contrôle qui améliorent la qualité de la production d'énergie électrique.

Le premier chapitre est consacré à une étude générale des énergies renouvelables et spécialisées dans l'énergie éolienne pour invoquer les concepts de base nécessaires à la compréhension du système éolien. En suite, nous avons introduit différents types d'éoliennes avec des machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie, ce qui nous a incités à choisir un système de production d'énergie éolienne basé sur une source d'énergie asynchrone double en raison de ces qualités opérationnelles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité de la modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation.

Nous avons utilisé une stratégie pour maximiser l'énergie extraite du vent pour obtenir la vitesse optimale au niveau de l'arbre de turbine entraînant la machine, puis nous avons contrôlé la machine en utilisant différents modes de contrôle en réalisant une étude comparative entre ces modes de contrôle.

Dans le troisième chapitre, il aborde ses aspects théoriques et ses diverses applications en tant que moteur ou générateur. Le chapitre s'est terminé par une modélisation de cette machine qui a prouvé son adéquation aux systèmes à vitesse variable. Les résultats de simulation de ce modèle sur MATLAB confirment la possibilité d'une double alimentation grâce à la stabilité des différentes tailles de la machine étudiée pour faire fonctionner le générateur et le moteur.

Enfin dans le quatrième chapitre, nous introduisons l'aspect théorique de la technologie de contrôle vectoriel GADA afin de contrôler les échanges d'énergie active et réactive entre l'appareil et le réseau. Deux méthodes ont été envisagées : la commande directe et la commande indirecte, dans lesquelles la machine asynchrone était commandée d'une part à l'aide de régulateurs de type PI, et cette méthode a été testée contre le contrôle de la consigne et le changement de paramètres électriques. Les résultats de simulation obtenus ont montré que le contrôle vectoriel de GADA donne des résultats satisfaisants et de bonnes performances face aux changements paramétriques.

Les résultats de simulation obtenus montrent que le contrôle des vecteurs GADA est contrôlé d'une part à l'aide de régulateurs de type PI. Le régulateur s'est avéré plus efficace dans le cas d'un contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle utilisé comme base de calcul du régulateur est simplifié, et même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

***BIBLIOGRAPHIE :***

# BIBLIOGRAPHIE

---

## CHAPITRE I

- [1] **Amna Omri**, Thèse de doctorat : « Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter », Université Côte d'Azur, 2016. Page 15
- [2] **Ali Smain et Mohamed Lamine Zahi**, « Les Potentialités De L'Algérie En Energies Renouvelables », Recherches économiques et managériale – N° 91 - Juin 2016. Page : 29
- [3] Ministère de l'énergie et des mines, Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Mars 2011, p 11
- [4] **Minh Huynh Quang**, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2008.
- [5] **MEMOIRE DE FIN DE CYCLE** : Commande d'un aérogénérateur basé sur une génératrice à double alimentation.
- [6] **Tarak Ghennam** : 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, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [7] **HAMOUCHE ABDELKRIM** : « Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une éolienne » mémoire de magister, Université Aboubekre Belkaïd– Tlemcen –Faculté de TECHNOLOGIE Algérie, 2017.
- [8] **F. BOUMARAF** "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014
- [9] **B. MERIEM** "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation GADA " Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014
- [10] **L. Baghli**, « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat, Nancy-I janvier 1999, France.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [11] **T. Ahmed and O. Noro**, “Minimum Excitation Capacitance Requirements for Wind Turbine Coupled Stand- Alone Self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation Based on SVC, IEICEAEEE INTELEC'OS, Oct. 19-23,2003.
- [12] **B . Thawriyyaa .T . Zineb** << Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride >> Mémoire Master Université Aboubekre Belkaïd–Tlemcen –,2016.
- [13] **Z . Salah Eddine** << Modélisation et étude université badji Mokhtar- Annaba de d'un système d'énergie éolienne relié au réseau >> mémoire master université badji Mokhtar- annaba,2017.
- [14] **S. Yazid Y. Yahia** <<Etude et réalisation d'une turbine éolienne >> Mémoire Master Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa ,2014.
- [15] **MAMADIE SYLLA** <<Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation >> Mémoire Master, Université du Québec en abitibi-temiscamingu, 2013
- [16] **Mr MESAI AHMED HAMZA, Mr NADIR KAIS** et Master en Electrotechnique : Commande de la machine asynchrone à double alimentation–apport des techniques de l'intelligence artificielle
- [17] **Mokrane Smaili** : Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [18] **SouleymaneBENZEGHADI**,Thème« EtudeetSimulationd'uneéolienne(Turbine+M ADA)àvitessevariablesuivantles deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone » Mémoire Master Université Aboubekre Belkaid Tlemcen 2012–2013
- [19] W. Eole, énergie éolienne: <http://ww7.eole.org/> .
- [20] **B. A. ASMA**, Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna, 2016.

## CHAPITRE II

- [21] **Global Wind Energy Council**, « Global Wind 2008 Report. », disponible sur le site:
- [22] <http://www.gwec.net.01/2010>.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [23] **M . Naïma** << Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée>> Mémoire de magister université de Batna ,2004
- [24] Sidi Mohammed Ben Abdellah ,2013
- [25] **R. sadaoui**<< analyse et commande de la machine asynchrone à double alimentation>> mémoire master université du québec,2017
- [26] **T . Fatma Zahra** << Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques >>mémoire de magister université d'el- oued ,2013.
- [27] **M . Mohammed . A . Saïd** << Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret >> Mémoire Master Université AboubekrBelkaid Tlemcen,2014
- [28] **B . Cherif** << Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation >> MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2012.

### CHAPITER III :

- [29] **M. Adjoudj** «commande d'une machine asynchrone à double alimentation » thèse doctorat en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie,2011
- [30] **A. Allali**, « Application des techniques avancées pour le contrôle de la Machine asynchrone Doublement Alimentée », mémoire de magister université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2013
- [31] **MOHAMMED MALKI** «Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau(Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret» Mémoire Master en Electrotechnique, Université Aboubekre Belkaid Tlemcen, 20/10/2014.
- [32] **BOURAKI MOULOUD** «Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: Application sur un site à TINDOUF» Mémoire Magister en Génie Electrique, Université M'Hamed Bougerra-Boumerdes, 2011/2012.
- [33] **AKKARI NADIA**, <Contribution a l'alimentation de la Robustesse de la Commande d'une Machine Asynchrone a Double Alimentation >, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.
- [34] **Z boudjema** « étude et commande d'un système de production d'électricité recevable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », thèse doctorat en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2015.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [35] **B. BOUKHEZZAR, H. SIGUERDIDJANE, M. M. HAND.** « Non linear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization». Journal of Solar Energy Engineering Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006.
- [36] **Paul-Etienne VIDAL,** « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2004.
- [37] **H. M. Amine,** Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif, 2012
- [38] **B. A. ASMA,** Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna, 2016.
- [39] **L. Khelfat, L. Maataoui,** Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire De Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2017.
- [40] **DJERIRI YUCEF** «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, novembre 2015.
- [41] **MKELKOUL BAHIA** «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation» Mémoire Magister API de Génie Electrique et Electronique, Université de Tlemcen, 29/06/2011.
- [42] **K. Hamza** << Commande d'un Aérogénérateur Basé sur une Génératrice à Double Alimentation>> Mémoire Master Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa ,2013.
- [43] **B . Hocine . B . Abdallah** << commande de la puissance active et réactive du MADA par Méthode de mode glissant >> Mémoire Master Université Echahid HammaL akhdar El-Oued ,2015.
- [44] **16 L . BILAL** << Commande vectorielle et transfert des puissances de la machine asynchrone à double alimentation >>mémoire de magister université du 20 août 1955 – Skikda ,2011.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [45] **17 T . Fatma Zahra** << Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques >>mémoire de magister université d'el- oued ,2013.
- [46] **F . Atmane**<< Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)>> MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.
- [47] **A . M aafa**<< étude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrone s pilot e par un convertisseur de fréquence>>mémoire de magister université l hadj lakhdar de batna,2011.

### CHAPITRE IV :

- [48] **M. Z. BOUDJEMAA, M. BOUNADJA**, «Commande Non Linéaire par retour d'État d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou», Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010
- [49] **D . YUCEF** "Commande par réseaux de neurones d'une GADA intégrée à un système éolien " Mémoire Magister. Université Djilali liabes de sidi-bel-abbes2009
- [50] **D . YUCEF** "Commande directe du couple et des puissances d'une GADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle " thèse Doctorat. Université Djilali liabes de sidi-bel-abbes2015
- [51] **L. KHETTACHE**« Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machin Électrique Double Alimentée»; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007.
- [52] **Ben kadem Soumia et Benmebarek Dalila** « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne » Mémoire Master Université Ahmed Draïa Adrar 2018.
- [53] **P. Frédéric**, Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne -Machine Asynchrone A Cage Autonome -Machine Asynchrone A Double Alimentation Reliée Au Réseau, Thèse De Doctorat En Electronique Et Génie Electrique A L'école Polytechnique De L'université De Nantes, 2003.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [54] **H. BEKHADA**, Contrôle Robuste d'aérogénérateur, Mémoire De Magister En Génie Electrique, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2011/2012
- [55] **A. BOYETTE**, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 11 décembre 2006
- [56] **B. A. Ben Nadji Hocine**, commande de la puissance active et réactive du GADA par la Méthode de mode glissant, El-Oued, septembre 2015.
- [57] **F. POITIERS**« Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université De Nantes, 19 Décembre 2003
- [58] **M. Adjoudj** «commande d'une machine asynchrone à double alimentation » thèse doctorat en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2011
- [59] **A. BOYETTE**, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 11 décembre 2006.
- [60] **J.R. Saenz, A. Tapia**, G. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pôrez-Hidalgo, YI. Irizar, Reactive Power Regulation In Wind farms: Control Strategies, Graz, EPE 2001



***ANNEXES***

## ANNEXES

---

Tension nominale stator	398/690 V
Tension nominale rotor	225/389 V
Puissance nominale	1.5 MW
Nombre de paires de pôles	2
Vitesse rotation	1450 tr/min
Résistance rotorique	0.021 $\Omega$
Résistance statorique	0.012 $\Omega$
Inductance statorique	0.0137 H
Inductance rotorique	0.0136 H
Inductance mutuelle	0.0135 H
Fréquence nominale	05 HZ
Inertie de L'arbre J	1000 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	0.0024 N.m/s
Glissement	-0.133333333333
Rayon de l'éolienne R	35.25 m