



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

كلية العلوم والتكنولوجيا

.../.../...

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

**Master**

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Energies renouvelables en électrotechnique

**Thème**

**Controle des Puissances Générés par un Système éolien Basé  
sur une Machine Asynchrone Double Alimentation**

**Présenté par :**

BEN CHOUHA Housam Eddine

KIOUS Assam Eddine

Soutenu publiquement le:21/06/2023

Devant le jury :

BEN ODAINA Belkhair	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
BORGHDA Skander	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
MEDOUKALI Hamza	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
MOUSSA Oussama	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

## ملخص

في هذه المذكرة نعرض الدراسة والتحكم في نظام طاقة الرياح على أساس آلة مزدوجة غير متزامنة. نبدأ بعرض الحالة الوصفية لتوربينات الرياح أيضا عرض الحالة الوصفية لآلة المزدوجة الغير متزامنة لتطبيق هذه الدراسة. نموذج الآلة المزدوجة الغير المتزامنة ثم نفضل فيه . بعدها قدمنا تقنية التحكم الشعاعي من اجل مراقبة الطاقة الفعالة والطاقة الارتكاسية متزامنة . وفي الاخير، قدمنا خطتين للتحكم في الطاقة الفعالة والطاقة الارتكاسية التي. المنتجة من طرق آلة المزدوجة الغير ينتجها هذا النظام وأخير سمحت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بتقييم أداء كل تطبيق على مكنة الطاقة المزدوجة غير، ترجم الى الفرنسية المتزامنة في مجال طاقة الرياح.

### كلمات مفتاحيه

طاقة هوائية - مكنة ال تزامنية ثنائية التغذية - محاكاة - تحكم شعاع

## Résumé

Dans cette note, nous présentons une étude sur le contrôle du système d'énergie éolienne basé sur une machine double asynchrone. Nous commencerons par présenter l'état des turbines éoliennes, ainsi que l'état de la machine double asynchrone pour l'application de cette étude. Nous décrivons ensuite le modèle de la machine double asynchrone. Ensuite, nous introduirons la technique de contrôle vectoriel pour surveiller l'énergie active et l'énergie réactive synchrones. Enfin, nous présenterons deux stratégies de contrôle pour l'énergie active et l'énergie réactive produites par ce système. Enfin, nous utiliserons les résultats de simulation obtenus pour évaluer les performances de chaque application sur la machine à double énergie asynchrone.

### Mots clés :

Énergie éolienne, Machine asynchrone à double alimentation, Modélisation, Commande vectorielle

## Abstract

In this note, we present the study and control of the wind energy system on the basis of a double asynchronous machine. We start by presenting the descriptive case of the wind turbines, as well as presenting the descriptive case of the asynchronous couple machine for the application of this study. The asynchronous double machine model, and then we detail it. Then we introduced the radial control technology in order to control the active energy and reactive energy simultaneously. Finally, we presented two plans to control the active energy and the reactive energy that is produced from the non-coupled machine methods produced by this system. Finally, the obtained simulation results allowed to evaluate the performance of each application on the non-coupled energy machine, translated into French synchronous in the field of wind energy.

### Keywords:

Wind energy - DFIM - Modeling - Vector control

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	i
<b>Liste des figures</b> .....	vii
<b>Liste des tableaux</b> .....	xii
<b>Abréviations et symboles</b> .....	xiii
<b>Introduction générale</b> .....	1

## Chapitre I : Aperçu sur l'Énergie Eolienne

I.1 Introduction .....	5
I.2 Historique .....	5
I.2.1 Production mondiale de l'énergie éolienne .....	8
I.2.2 Capacité des éoliennes en Algérie .....	9
I.3 Définition .....	11
I.4 Le principe et le fonctionnement de l'éolienne .....	11
I.5 Les différents types d'éoliennes .....	12
I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal (EAH) .....	12
I.5.2 Les éoliennes à axe vertical (EAV) .....	13
I.6 Comparaison entre les deux types .....	15
I.7 Principaux composants d'une éolienne .....	16
I.8 Système de Régulation .....	17
I.8.1 Freinage mécanique .....	17
I.8.2. Système d'orientation des pales "pitch" .....	17
I.8.3. Système Stall passif .....	17
I.8.4. Système Stall actif .....	18

I.9 Zones de fonctionnement de l'éolienne .....	18
I.10. Les applications éoliennes .....	19
I.11 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	20
I.11.1 Avantages .....	20
I.11.2 Inconvénients .....	20
I.14. Classement des éoliennes .....	20
I.14.1 Les éoliennes à vitesse fixe .....	21
I.14.2. Les éoliennes à vitesse variable .....	21
I.15. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne .....	22
I.15.1 Générateur Asynchrone .....	22
I.15.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil .....	23
I.15.1.2 Machine asynchrone à double stator .....	24
I.15.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance .....	25
I.15.2 Générateur synchrone .....	26
I.15.2.1 Générateur synchrone à rotor bobiné .....	26
I.15.2.2 Générateur synchrone à aimants permanents .....	27
I.15.3 Machines à structures spéciales .....	28
I.15.4 Machines Evolution des systèmes éoliens à vitesse variable vers la double alimentation .....	28
I.15.4.1 Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné .....	28
I.15.4.2 Différentes stratégies de l'alimentation de la MADA .....	29
I.15.4.3 Avantages et inconvénients de la MADA. ....	30
I.16 Conclusion .....	31

## **Chapitre II : Modélisation d'un Système Eolien Basé Sur une Machine Asynchrone Double Alimentation**

II.1	Introduction.....	33
II.2	Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne basée sur une GADA. ....	34
II.2.1	Modélisation de la Turbine Eolienne.....	34
II.2.1.1	Modélisation source primaire : le vent.....	35
II.2.1.2	Modélisation de la Turbine.....	36
II.2.1.3	Modèle mécanique de la turbine éolienne.....	38
II.3	Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	39
II.3.1	La commande de la turbine MPPT (sans asservissement de vitesse). ....	41
II.4	Fonctionnement et modélisation de la GADA.....	43
II.4.1	Modèle de la GADA dans le repère triphasé.....	43
II.4.2	Hypothèses simplificatrices.....	44
II.4.3	Modèle de la GADA dans le repère de Park.....	48
II.5	Définition de l'onduleur.....	52
II.5.1	Modélisation de l'onduleur à deux niveaux.....	52
II.5.2	Commande par modulation de largeur d'impulsion.....	54
II.6	Résultats de simulations.....	54
II.7	Conclusion.....	60

## **Chapitre III : Commande des Puissances Active et Réactive d'un Système Eolien à Vitesse Variable Basé Sur une MADA**

III.1	Introduction.....	62
III.2	Commande vectorielle des puissances active et réactive.....	62
III.2.1	Modele de la MADA à flux statorique oriente.....	63
III.2.2	Relations entre les courants statoriques et rotoriques.....	64

---

III.2.3 Relations entre les tensions et courants rotoriques .....	65
III.2.4 Etablissement des angles nécessaires aux transformations .....	66
III.3 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive .....	66
III.4 Commande Directe des Puissances Active et Réactive .....	69
III.4.1 Dimensionnement du Régulateur PI.....	70
III.5 Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive .....	72
III.5.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances .....	72
III.5.2 Découplage par Compensation.....	72
III.5.3 Dimensionnement du Régulateur PI.....	73
III.6 Commande Indirecte avec Boucles des Puissances.....	75
III.7 Résultats de simulations .....	75
III.7.1 Résultats de simulation du système par la commande vectorielle directe .....	75
III.8 Principe la commande backstepping des puissances active et réactive .....	82
III.8.1 Méthodes de Lyapunov .....	82
III.8.1.1 Première méthode de Lyapunov .....	82
III.8.1.2 Deuxième méthode de Lyapunov .....	83
III.8.2 Méthode générale de synthèse récursive par backstepping .....	83
III.9 Application de la commande par Backstepping à la GADA .....	86
III.9.1 Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation.....	86
III.9.2 Synthèse de la loi de commande.....	87
III.9.3 Résultats de simulations .....	89
III.10 Conclusion.....	94



## Chapitre I : Aperçu sur l'Énergie Éolienne

Figure (I.1) : La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland en 1887 par Charles F. Brush. ....	6
Figure (I.2) : éolienne de Paul La Cour en 1891 .....	7
Figure (I.3) : Types et stades de développement des éoliennes .....	8
Figure (I.4) : Capacité mondiale de production d'énergie éolienne 2008-2018 .....	8
Figure (I.5) : Carte des vents Algérie .....	9
Figure (I.6) : 1ère ferme éolienne en Algérie (Adrar) .....	10
Figure (I.7) : Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol .....	10
Figure (I.8) : Éolienne modern .....	11
Figure (I.9) : principe de la conversion de l'énergie éolienne .....	12
Figure (I.10) : Type éoliennes à axe horizontal .....	13
Figure (I.11) : Rotor Savonius .....	14
Figure (I.12) : Darrieus de 5[m] de diamètre .....	14
Figure (I.13) : Les composantes d'une éolienne .....	16
Figure (I.14) : Variation de l'angle de calage d'une pale .....	17
Figure (I.15) : Zones de fonctionnement d'une éolienne .....	18
Figure (I.16) : Éolienne directement connectée au réseau .....	21
Figure (I.17) : Aérogénérateur à vitesse variable .....	22
Figure (I.18) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) .....	23
Figure (I.19) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable .....	24
Figure (I.20) : Machine asynchrone à double stator dans une chaîne de conversion éolienne .....	24
Figure (I.21) : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur .....	25

Figure (I.22) : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable .....	26
Figure (I.23) : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI .....	27
Figure (I.24) : Machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion éolienne .....	28
Figure (I.25) : Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné dans une chaîne de conversion éolienne.....	29

## Chapitre II : Modélisation d'un Système Eolien Basé Sur une Machine Asynchrone Double Alimentation

Figure (II.1) : Structure triphasée du système éolien couplé au réseau .....	34
Figure (II.2) : Schéma de la turbine éolienne .....	35
Figure (II.3) : Profil du vent appliqué à la turbine .....	36
Figure(II.4): Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales .....	37
Figure (II.5) : Modèle mécanique de la turbine éolienne. ....	38
Figure (II.6) : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. ....	39
Figure (II.7) : Contrôle <i>MPPT</i> sans asservissement de la vitesse de rotation. ....	42
Figure (II.8) : Les enroulements triphasés idéaux (stator et rotor) de la GADA .....	45
Figure (II.9) : Circuit électrique équivalent de la GADA .....	45
Figure (II.10) : Modèle de GADA dans le Reppert de <i>PARK</i> .....	49
Figure (II.11) : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC) .....	52
Figure (II.12) : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux .....	52
Figure (II.13) : Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.....	54
Figure (II.14) : Profil du vent appliqué .....	55
Figure (II.15) : Vitesse de la turbine selon le <i>MPPT</i> .....	56
Figure (II.16) : Variation du coefficient de puissance $C_p$ et vitesse spécifique $\lambda$ .....	56

Figure (II.17) : Courants statoriques avec un zoom .....	57
Figure (II.18) : Courants rotoriques avec un zoom .....	57
Figure (II.19) : Profil du vent appliqué .....	58
Figure (II.20) : Vitesse de la turbine selon le MPPT .....	58
Figure (II.21) : Variation du coefficient de puissance $C_p$ .....	59
Figure (II.22) : Courants statoriques avec un zoom .....	59
Figure (II.23) : Courants rotoriques avec un zoom .....	59

## **Chapitre III : Commande des Puissances Active et Réactive d'un Système Eolien à Vitesse Variable Basé Sur une MADA**

Figure (III.1) : Principe de la commande vectorielle .....	63
Figure (III.2) : Calcul des angles de transformations .....	66
Figure (III.3) : Orientation du repère de Park .....	67
Figure (III.4) : Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA .....	68
Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA .....	70
Figure (III.6) : Schéma de régulation des puissances $P_s$ et $Q_s$ .....	71
Figure (III.7) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA .....	73
Figure (III.8) : Schéma de régulation des courants $i_{rd}$ et $i_{rq}$ .....	73
Figure (III.9): Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA .....	75
Figure (III.10) : Puissance active statorique zoom la commande directe avec zoom .....	76
Figure (III.11) : Puissance réactive statorique avec zoom la commande directe avec zoom .....	76
Figure (III.12) : Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom .....	77
Figure (III.13) : Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom .....	77
Figure (III.14) : Puissance active statorique de la commande directe avec zoom.....	77

---

Figure (III.15) : Puissance réactive statorique de la commande directe avec zoom.....	78
Figure (III.16) : Courants statoriques de la commande directe avec zoom .....	78
Figure (III.17) : Courants rotoriques de la commande directe avec zoom .....	78
Figure (III.18) : Puissance active statorique de la commande indirecte avec zoom.....	79
Figure (III.19) : Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec zoom .....	79
Figure (III.20) : Courants statoriques de la commande indirecte avec zoom .....	80
Figure (III.21) : Courants rotoriques de la commande indirecte avec zoom.....	80
Figure (III.22) : Puissance active statorique de la commande indirecte avec zoom .....	80
Figure (III.23) : Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec zoom .....	81
Figure (III.24) : Courants statoriques de la commande indirecte avec zoom .....	81
Figure (III.25) : Courants rotoriques de la commande indirecte avec zoom .....	81
Figure (III.26) : Schéma bloc de la structure de commande par Backstepping.....	89
Figure (III.27) : La puissance active statorique pour la commande de backstepping. ....	90
Figure (III.28) : La puissance réactive statorique pour la commande de backstepping .....	91
Figure (III.29) : Le courants statorique pour la commande de backstepping .....	91
Figure (III.30) : Le courants rotorique pour la commande de backstepping .....	91
Figure (II.31) : La puissance active statorique pour la commande de backstepping.....	92
Figure (II.32) : La puissance réactive statorique pour la commande de backstepping.....	93
Figure (II.33) : Le courants statorique pour la commande de backstepping .....	93
Figure (II.34) : Le courants rotorique pour la commande de backstepping .....	93

Liste des tableaux

## Chapitre I : Aperçu sur l'Énergie Éolienne

Tableau I.a : Les applications les plus courantes des moulins à vent .....19

# Liste des Abréviations

*PI*: Proportional Integral.

*MLI* : Modulation de Largeur d'Impulsion.

*MPPT*: Maximum Power Point Tracking.

*AC*: Alternative Current.

*DC*: Direct Current.

*GADA* : Générateur Asynchrone à Double Alimentation

*MADA* : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

*MSAP* : Machine Synchrone à Aiment Permanent.

*MAS*: Machine Asynchrone à cage.

*MSRB*: Machine Asynchrone à rotor Bobiné.

*BP, BC*: Bobinage de puissance et Bobinage de commande.

*FTBO* : Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.

*FTBF* : Fonction de Transfer en Boucle Fermée.

*CCR* : Convertisseur coté réseau.

*SCE* : Systèmes de Conversion Eolien.

## Introduction générale

De nos jours, le monde est confronté au défi mondial de la transition énergétique, alors que les pays font face à un besoin croissant en énergie pour stimuler leur développement économique dans un contexte de ressources limitées et inégalement réparties. Parallèlement, une prise de conscience croissante des problèmes environnementaux et de l'épuisement des ressources fossiles a conduit à une révision des plans énergétiques, accordant une plus grande importance aux sources d'énergie renouvelables [1]. Selon le Forum mondial de l'énergie, les combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel seront totalement épuisés d'ici une décennie, tout comme les réserves d'uranium suffisantes pour l'énergie nucléaire. En 2013, les combustibles fossiles représentaient plus de 86,6 % de la consommation mondiale d'énergie primaire [2]. Dans de nombreux pays, la fusion nucléaire est considérée comme la méthode de production d'énergie la plus efficace qui n'émet pas directement de gaz carbonique [3]. Cependant, la gestion des déchets provenant de cette méthode de production s'avère extrêmement coûteuse et présente de nombreux défis. D'une part, leur radioactivité reste élevée pendant de nombreuses années, et d'autre part, les risques potentiels en cas de problème peuvent être catastrophiques. Il est donc essentiel de remettre en question la pertinence de l'utilisation de cette forme de production d'électricité en raison de ces considérations [3]. En raison de l'épuisement des ressources naturelles et de la demande croissante en énergie conventionnelle, les planificateurs et les décideurs politiques ont dû explorer des sources d'énergie alternatives. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique, l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie hydroélectrique, la biomasse et l'énergie géothermique offrent différentes formes d'énergie issues de ressources régénérables qui ne s'épuisent pas dans le temps. Récemment, on a observé une préoccupation croissante concernant le développement de l'utilisation des énergies renouvelables [1]. En général, les énergies renouvelables sont des méthodes de production d'énergie qui exploitent des ressources dont les stocks sont considérés comme illimités. Ces méthodes offrent la possibilité de produire de l'énergie propre tout en réduisant la dépendance aux ressources limitées [3]. L'eau des rivières, le vent, les pales des éoliennes, la lumière solaire, les panneaux solaires et la chaleur géothermique provenant des profondeurs de la Terre pour alimenter des réseaux de chauffage sont quelques exemples de modes de production d'énergie [4]. Cependant, la production hydroélectrique présente des avantages car elle offre une puissance de sortie stable et entièrement contrôlée, bien qu'elle nécessite des conditions géographiques spécifiques. En ce qui concerne l'énergie solaire, le coût élevé des installations à très haute puissance reste un obstacle majeur à son expansion [1]. Actuellement, l'énergie éolienne est largement reconnue comme la meilleure option pour la production d'électricité, non pas pour remplacer les sources traditionnelles, mais plutôt comme une source d'énergie complémentaire [5]. Elle tire parti du vent pour faire tourner les éoliennes et générer de l'électricité de manière relativement efficace. L'avantage de l'énergie éolienne réside dans sa disponibilité abondante et son impact environnemental réduit par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. En somme, les énergies renouvelables offrent des opportunités significatives pour diversifier notre mix énergétique et réduire notre empreinte carbone. Elles contribuent à un avenir énergétique durable en exploitant des ressources naturelles abondantes et inépuisables, tout en limitant les effets néfastes sur l'environnement. L'énergie éolienne offre une disponibilité infinie et constitue une solution aux problèmes environnementaux découlant de l'utilisation des combustibles fossiles [5]. Malgré cela, la capacité de l'énergie éolienne à s'intégrer aux réseaux électriques contemporains reste limitée en raison de sa variabilité. Un aérogénérateur, communément appelé

éolienne, est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à un générateur. [3] [5]. Les éoliennes sont principalement classées en deux catégories : les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. Les éoliennes de dernière génération à vitesse variable présentent plusieurs avantages par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Elles permettent d'augmenter l'efficacité énergétique, de réduire les contraintes mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite [6]. En outre, les générateurs électriques les plus couramment utilisés dans les grands systèmes de conversion de l'énergie éolienne se divisent en deux groupes principaux : les générateurs asynchrones et les générateurs synchrones [7]. Actuellement, la majorité des éoliennes sont équipées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette configuration leur permet de fonctionner efficacement sur une large plage de vitesses de vent, en utilisant chaque vitesse pour produire la puissance maximale possible. Le circuit statorique de la MADA est directement connecté au réseau électrique, tandis que son circuit rotorique est connecté au réseau via des convertisseurs de puissance. Comparé à une éolienne à vitesse variable alimentée par un stator, le coût des convertisseurs est inférieur, car il n'y a pas d'échange de puissance entre le rotor et le réseau. La génératrice joue un rôle essentiel dans la production d'une puissance élevée. Une autre raison importante est la capacité de régler la tension de la génératrice au point de connexion [8] [9] [10]. L'évolution de la microélectronique et de la microinformatique a joué un rôle clé dans le développement de dispositifs électroniques basés sur des composants à haute fréquence et à haute puissance, commandés par des microprocesseurs programmables. Ces avancées ont contribué à l'efficacité énergétique des systèmes d'énergie éolienne. Grâce à l'utilisation d'algorithmes d'optimisation appropriés et à des techniques de commande plus efficaces, adaptées à un point de fonctionnement précis, il est possible de minimiser les perturbations sur le réseau de distribution [8] [9] [10]. L'objectif de notre travail est de présenter une étude théorique sur les différentes structures des systèmes de production d'énergie éolienne afin de sélectionner la plus efficace. Nous examinerons une structure spécifique qui comprend une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales, permettant de contrôler la capture d'énergie du vent à des vitesses faibles et élevées. Le stator de cette machine est directement connecté au réseau électrique, tandis que les grandeurs rotoriques sont contrôlées par le biais de deux convertisseurs MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion) bidirectionnels. La fonction principale de ces convertisseurs dans le système en question est de connecter la génératrice éolienne au réseau électrique de deux manières distinctes. L'une de ces méthodes consiste à utiliser le convertisseur côté réseau, qui permet de contrôler le courant continu et d'améliorer le facteur de puissance du côté du réseau électrique. L'autre méthode consiste à utiliser le convertisseur côté rotor, qui permet de contrôler et d'optimiser le flux d'énergie généré par le stator pendant les périodes de fonctionnement du stator. Dans le cadre de cette étude, différentes techniques de commande seront développées pour atteindre ces objectifs, assurant ainsi un rendement optimal et une production d'énergie de haute qualité. Le présent travail est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente un état de l'art de l'énergie éolienne, en abordant son histoire, son évolution à travers le monde en chiffres, ainsi que ses avantages et inconvénients. Une attention particulière est accordée à la description théorique des différents types d'aérogénérateurs. Ensuite, la technologie de fonctionnement, la régulation et la protection mécanique de l'aérogénérateur à axe horizontal, qui est au cœur de notre étude, sont détaillées. De plus, les divers types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens seront présentés et analysés en termes de leurs avantages et inconvénients. Une attention particulière sera accordée à l'étude approfondie de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), incluant sa structure, ses modes de fonctionnement, ses configurations d'alimentation, ses

applications, ainsi que ses avantages et inconvénients. Le deuxième chapitre de ce travail abordera la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable pour un utilisateur unique. Une première section sera consacrée à la modélisation et à la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, en mettant l'accent sur les aspects liés à la structure et au comportement dynamique de l'aérogénérateur. Une étude détaillée du modèle du vent et de son évolution sera également présentée. Ensuite, la limite de Betz sera utilisée pour déterminer la puissance maximale pouvant être extraite de l'éolienne. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sera abordée dans la deuxième section, en mettant en évidence les aspects clés de son fonctionnement et de ses caractéristiques électromagnétiques. La troisième section sera consacrée à la modélisation de l'étage de conversion, qui consiste à simuler le convertisseur côté machine utilisé pour alimenter le rotor de la génératrice MADA. Cette section mettra en évidence les principes de fonctionnement du convertisseur et son impact sur les performances de la machine. Enfin, dans la dernière partie, les stratégies de contrôle côté réseau pour les éoliennes et les onduleurs seront décrites, en mettant l'accent sur les moyens de maximiser la production d'énergie éolienne et de garantir une intégration harmonieuse dans le réseau électrique. Enfin, ce chapitre se termine par une discussion des résultats des simulations utilisées pour valider les modèles de systèmes considérés. Dans le troisième chapitre, nous proposons deux algorithmes de contrôle pour l'acquisition d'une puissance électrique de haute qualité à partir du système. Ces algorithmes permettront de contrôler séparément la puissance active et réactive générée. Une application de ces méthodes est le contrôle vectoriel, qui utilise des contrôleurs PI basés sur l'orientation du flux du stator pour linéariser le modèle de la machine et découpler le contrôle de la puissance générée. Dans le second cas, le contrôle par backstepping basé sur les erreurs et la théorie de la stabilité de Lyapunov seront développés pour faire converger rapidement ces erreurs vers zéro et assurer la stabilité et l'équilibre du système. Les résultats des simulations seront utilisés pour valider les performances de ces deux approches de contrôle.

Enfin, une conclusion générale sera donnée pour résumer les caractéristiques clés de cette étude, ainsi que quelques orientations futures.

# Chapitre I

## Aperçu sur l'Energie Eolienne

## I.1 Introduction

La demande mondiale d'énergie augmente rapidement dans toutes les régions du monde, et la dépendance excessive à l'égard des importations d'énergie en provenance d'un petit nombre de pays souvent politiquement instables entraîne des fluctuations des prix du pétrole et du gaz ainsi qu'une instabilité de l'approvisionnement en énergie. L'impact de cette situation sur l'économie mondiale est déjà considérable. En outre, la consommation intensive de combustibles fossiles a des répercussions négatives sur l'environnement. Les îlots de chaleur et le changement climatique sont dus aux émissions de gaz à effet de serre et de particules dans l'atmosphère, provoquées par la pollution des centrales électriques à combustibles fossiles. 50 à 60 % des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont dues à la production et à l'utilisation d'énergie. La pollution atmosphérique augmente en raison de la consommation intensive d'énergie, ce qui laisse présager une expansion future.

C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous aborderons l'une des énergies renouvelables, l'énergie éolienne, qui constitue une source illimitée d'énergie propre. Nous décrirons son fonctionnement, analyserons ses composants et étudierons les méthodes de contrôle, notamment le contrôle mécanique. Nous aborderons également plusieurs types de turbines, notamment les turbines verticales et horizontales, en mettant l'accent sur leurs avantages, leurs inconvénients et leurs utilisations. Enfin, nous aborderons les générateurs utilisés dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, tels que GADA, GSAP, MAS, etc.

## I.2 Historique

Le mot "Éolienne" tire son origine du mot grec "Éole" (en grec ancien Αἰολός : Aiolos), et qui représente, dans la Grèce antique, le nom du dieu des vents.[1].

Depuis l'Antiquité, l'être humain a exploité l'énergie éolienne comme première source d'énergie renouvelable, à l'exception de l'énergie du bois de chauffage. Les vents ont d'abord été utilisés pour propulser les navires, puis pour actionner des moulins à grains et des systèmes de pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à environ 2000 avant JC. [2]

Le premier compte rendu écrit de l'utilisation de moulins à vent en Inde remonte à environ 400 avant J.-C., alors que les premiers moulins à vent en Europe sont apparus au VIIe siècle de notre ère. Ils étaient utilisés à l'origine pour moudre les grains, d'où leur nom "moulins". Ils ont également été utilisés aux Pays-Bas pour drainer les lacs ou les terres submergées [2].

Les éoliennes n'ont été considérées comme source d'énergie électrique qu'après les développements de la technologie électrique à la fin du **XIXe siècle**. À cette époque, ces nouveaux systèmes étaient appelés "*aérogénérateurs*". Le plus grand pionnier dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique était l'Américain **Charles F. Brush**.

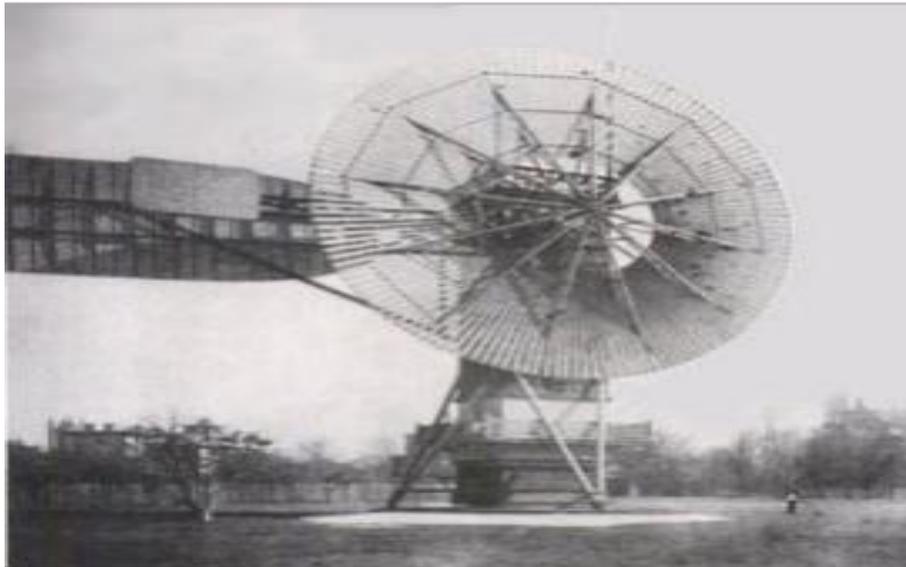


Figure (I.1) : La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland en 1887 par Charles F. Brush.

**En 1887**, il a construit la première éolienne automatique de 18 mètres de haut, pesant 3,6 tonnes et alimentant une génératrice de 12 kW (Figure I.1). Il a été suivi par le professeur *danois Poul* La Cour [3] [4], qui a construit le premier aérogénérateur utilisant une dynamo (génératrice à courant continu) dès 1891. Encouragé par le gouvernement danois qui cherchait à fournir de l'électricité dans des zones rurales, La Cour a commercialisé son concept, qui avait déjà résolu le problème du stockage énergétique en produisant de l'hydrogène par électrolyse pendant les périodes de surproduction afin d'alimenter des lampes à gaz [3].



Figure (I.2) : éolienne de Paul La Cour en 1891

Aux E.U.A., c'est la crise pétrolière de 1974 qui a fortement relancé les recherches dans le domaine et le développement d'aérogénérateurs en grande échelle. À cette époque, les motivations associées aux énergies éolienne et solaire étaient d'ordre économique et politique à cause de la dépendance élevée des pays consommateurs vis-à-vis des pays exportateurs de pétrole. De nombreux projets de recherche financés par le gouvernement des E.U.A. ont permis la réalisation des premiers grands aérogénérateurs expérimentaux (de 100kW à 3.2 MW au début des années 1980). La même tendance s'est confirmée au Canada au cours de cette époque. Entre 1974 et 1975, l'Europe est entrée dans la course au développement. Devenue toujours plus performante et silencieuse, l'éolienne s'impose aujourd'hui comme une source d'énergie potentielle non polluante à ne plus négliger [5].



Figure (I.3) : Types et stades de développement des éoliennes [6]

## I.12 Production mondiale de l'énergie éolienne.

Au cours des dix dernières années, la quantité d'électricité produite par l'énergie éolienne a presque quadruplé, passant de 114,79 gigawatts à 563,72 gigawatts. La figure I.12 illustre l'augmentation de 448,93 gigawatts de l'énergie éolienne entre 2008 et 2018. La Chine et les États-Unis ont dépassé l'Espagne, le Danemark, l'Allemagne et d'autres pays autrefois dominants en tant que pays ayant la plus grande capacité éolienne installée. Malgré cela, ils conservent la plus grande capacité éolienne [26]

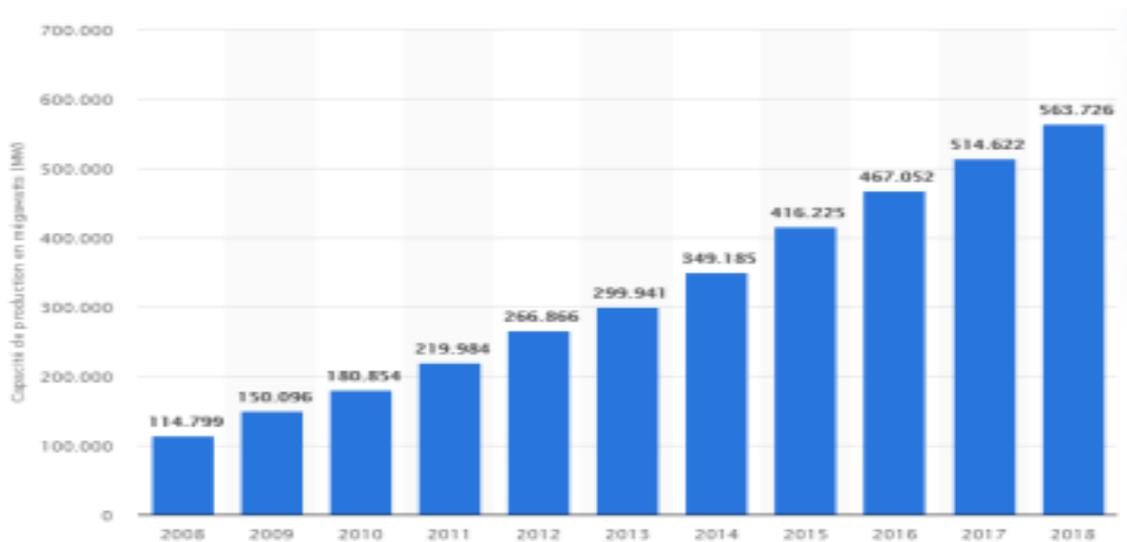


Figure (I.4): Capacité mondiale de production d'énergie éolienne 2008-2018

### I.13 Capacité des éoliennes en Algérie.

- Le premier parc éolien en Algérie, d'une capacité de 10 MW, a été installé dans le cadre du programme d'ER du pays entre 2011 et 2013 pour la première fois.
- Deux parcs éoliens de 20 MW devraient être réalisés entre 2014 et 2015.
- Des études seront menées afin d'identifier les zones avantageuses pour réaliser d'autres projets entre 2016 et 2030 avec une puissance d'environ 1 700 MW. [27]

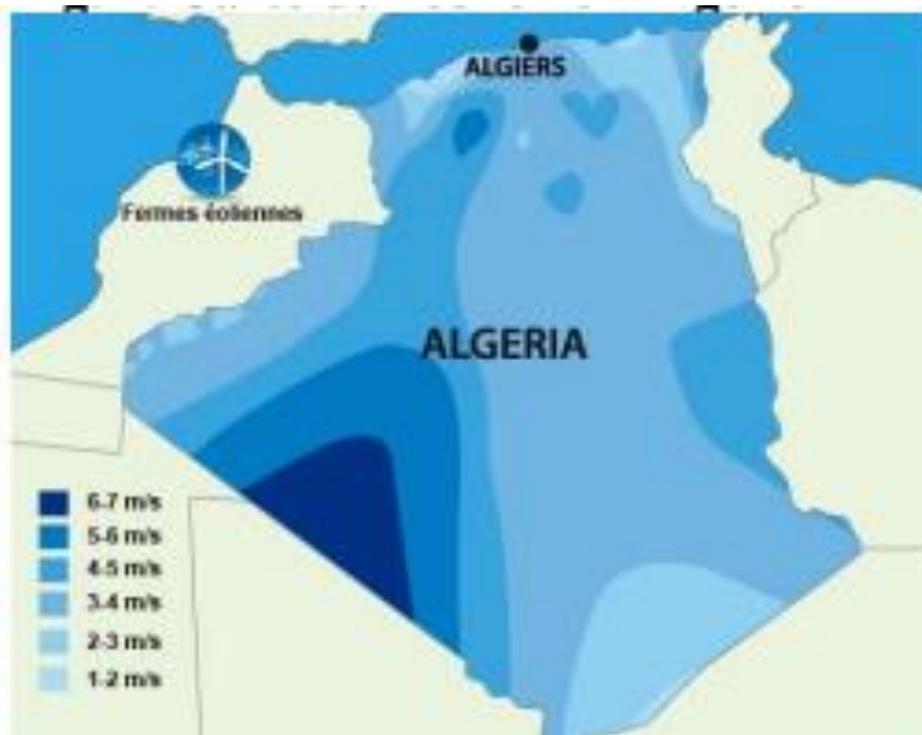


Figure (I.5) : Carte des vents Algérie

Comme le montre la figure I.5, qui présente la carte des vents de l'Algérie à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol, le potentiel de l'énergie éolienne diffère en fonction de la situation géographique. La gamme des vitesses moyennes annuelles du vent est comprise entre 2 et 6,5 mètres par seconde. A l'exception de la région côtière (à l'exception de Bejaia et d'Oran), du Tassili et de Beni Abbés, il faut noter que la vitesse moyenne du vent dépasse 3 mètres par seconde dans toutes les localités [28]

En effet, la partie médiane de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent comprises entre 3 et 4 m/s, qui augmentent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace du centre vers le sud-ouest. Le chiffre le plus élevé est atteint dans la région d'Adrar, où la vitesse moyenne du vent est de 6,5 m/s. Les régions de Tiaret, Tindouf et Oran, par exemple, présentent un certain nombre de microclimats où la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s [29]



Figure (I.6) : 1ère ferme éolienne en Algérie (Adrar).

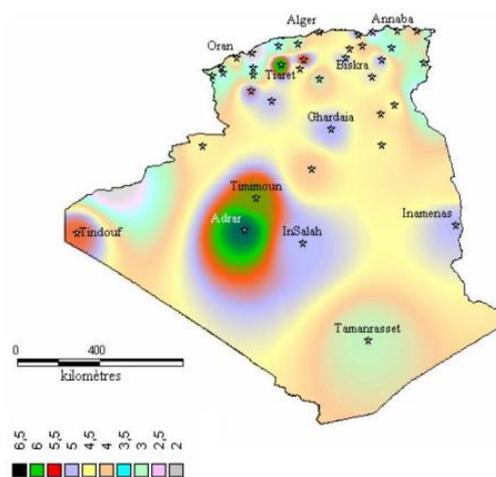


Figure (I.7) : Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol [29]

### I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un convertisseur qui transforme l'énergie éolienne (énergie primaire) en énergie mécanique rotative, puis cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique alternative via un générateur.



Figure (I.8): Éolienne modern [7]

### I.4 Le principe et le fonctionnement de l'éolienne

La fonction d'un système éolien est de capter une partie de l'énergie cinétique du vent et de la transformer en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [8].

- À la turbine, qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Grâce à un arbre de transmission et à un multiplicateur de vitesse, cette énergie est transférée à la génératrice.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

L'ensemble du processus de conversion fait appel à un large éventail de disciplines et pose des problèmes au niveau des systèmes automatisés, mécaniques, électriques et aérodynamiques. [9]

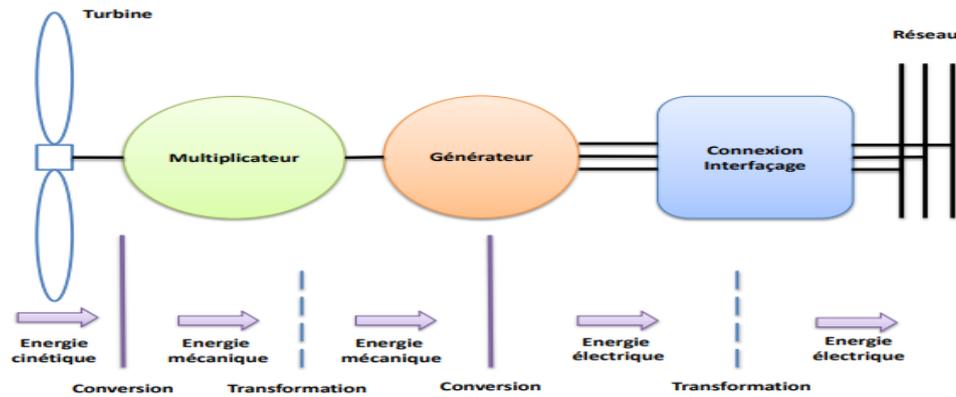


Figure (I.9) : principe de la conversion de l'énergie éolienne

## I.5 Les différents types d'éoliennes

Depuis le début de l'utilisation de l'énergie éolienne, de nombreux types de turbines éoliennes ont été développés, qui se divisent en deux catégories : les turbines à axe horizontal et les turbines à axe vertical.

### I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal (EAH)

Lorsque la plupart d'entre nous pensent aux éoliennes, nous imaginons généralement des éoliennes à axe horizontal (HAT). Une éolienne à axe horizontal a des pales qui ressemblent à des hélices et qui tournent sur un axe horizontal, comme un moulin à vent.

La colonne de pales rotatives et le générateur électrique qui doit faire face au vent au sommet de la tour sont des caractéristiques des éoliennes à axe horizontal. Alors que les grandes éoliennes utilisent normalement un capteur de vent couplé à un moteur de service pour faire tourner l'éolienne face au vent, les petites éoliennes sont généralement guidées par un anémomètre carré disposé dans l'axe de rotation des pales. Le multiplicateur de la majorité des grandes éoliennes convertit la rotation lente des pales en une rotation rapide qui peut alimenter un générateur électrique. [10].

L'éolienne est souvent orientée vers le vent qui arrive devant la tour en raison des perturbations causées par cette dernière. Pour éviter que les pales de l'éolienne ne soient poussées vers la tour par des vents violents, les pales sont construites avec des matériaux robustes. En outre, les pales sont souvent inclinées vers le haut et situées loin de la tour [10].

Malgré le problème de l'inflation, les éoliennes à axe horizontal ont été créées pour faire face au vent car elles n'ont pas besoin d'un mécanisme séparé pour maintenir leur alignement avec le vent. En outre, la flexibilité des pales en cas de fortes rafales réduit la surface exposée et, par conséquent, la résistance au vent. Cependant, la majorité des éoliennes à axe horizontal sont orientées face au vent en raison de leur fiabilité et de la nécessité d'éviter la fatigue des matériaux. [10].



Figure (I.10): Type éoliennes à axe horizontal

### I.5.2. Les éoliennes à axe vertical (EAV)

Les éoliennes à axe vertical sont nombreuses et il y a deux formes principales qui sont courantes, à savoir : *Savonius* et *Darrieus*.

#### a. Rotor Savonius

Le modèle le plus simple est le rotor de **Savonius**. Le dispositif consiste en un cylindre creux qui a été divisé en deux, les deux moitiés étant déplacées pour former un "S" (voir figure) ; les parties concaves du "S" capturent le vent, tandis que les côtés inversés du "S" ont moins de résistance au vent, ce qui fait que le rotor tourne dans le sens de la moindre résistance.

La méthode est améliorée en séparant les pales et en laissant un espace entre elles pour faciliter la circulation de l'air. Ce système présente l'inconvénient de provoquer une surpression à l'intérieur des zones concaves, où l'air ne peut s'échapper, ce qui réduit les performances [11].

Ce type de rotor ne peut être utilisé qu'à faible vitesse en raison de l'importante résistance à l'air qu'il offre. S'il était utilisé pour produire de l'électricité, il aurait besoin de multiplicateurs de rotation, ce qui réduirait son efficacité. Par conséquent, il est utile pour des applications mécaniques telles que le pompage de l'eau. [11].

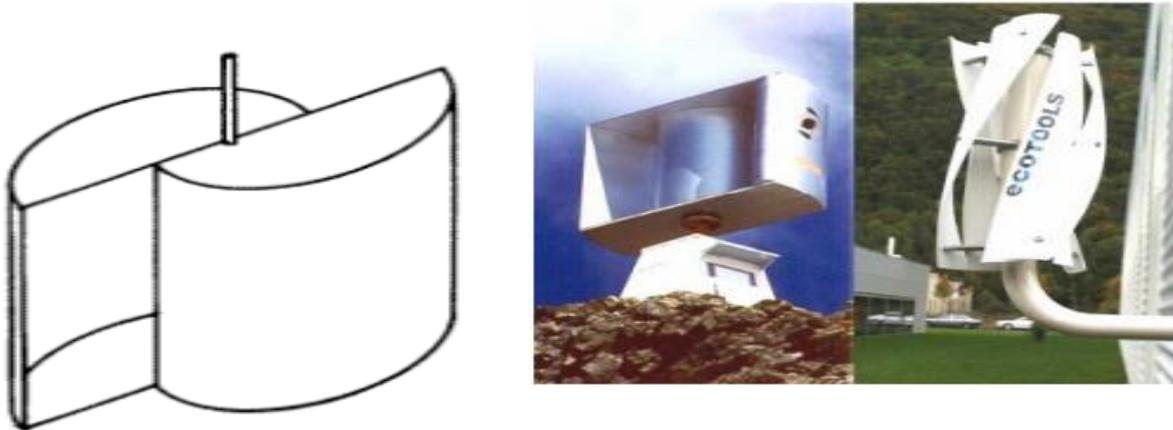


Figure (I.11) : Rotor Savonius [12]

#### ***b. Rotor de Darrieus***

Les éoliennes de type *Darrieus* utilisent la force de portance du vent, tout comme les éoliennes conventionnelles, et ont des pales verticales, paraboliques ou hélicoïdales.

Les éoliennes de type *Darrieus* sont des générateurs éoliens. Le rotor est actionné par les pales qui se déplacent vers l'avant en tournant, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse de rotation du rotor.

Le rotor est propulsé par le mouvement des pales vers l'avant et, en tournant, il entraîne le générateur qui produit de l'énergie. Cependant, leur taille modeste est un avantage pour l'intégration du paysage dans l'architecture.

Les quatre types de rotors *Darrieus* sont les suivants : Le rotor parabolique, le rotor à variation cyclique, le rotor tronconique et le rotor cylindrique. [13].



Figure (I.12) : Darrieus de 5[méter] de diamètre [14]

## I.6.Comparaison entre les deux types

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<b>Eoliennes à axe horizontal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une grande efficacité, car les pales tournent toujours perpendiculairement au vent, recevant ainsi de l'énergie tout au long du cycle de rotation.</li> <li>• Un accès à des vents plus forts en utilisant des tours hautes sur des sites avec une pente de vent, où la vitesse du vent peut augmenter de 20% tous les dix mètres d'élévation, ce qui augmente la production d'énergie.</li> <li>• Pas besoin d'un mécanisme supplémentaire pour maintenir les pales alignées avec le vent, ce qui réduit les coûts et augmente la fiabilité.</li> <li>• Les pales peuvent être conçues pour se courber dans les vents forts, réduisant ainsi la surface exposée au vent et la résistance au vent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de vitesses de vent élevées : Lors de l'utilisation de générateurs d'éoliennes à axe horizontal, il est difficile de produire de l'énergie électrique efficacement à des vitesses de vent faibles.</li> <li>• Bruit : Le générateur d'éoliennes à axe horizontal est caractérisé par un bruit élevé qu'il émet lorsqu'il tourne, et ce bruit peut affecter les résidents des zones environnantes des stations.</li> <li>• Taille et poids : Lorsque la taille du générateur est grande, il nécessite une grande surface pour l'installation et il est difficile de le transporter sur le site d'installation.</li> <li>• La maintenance : la difficulté de la maintenance en raison de la position du générateur au-dessus du poteau.</li> </ul>
<b>Eoliennes à axe vertical</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne performance à basse vitesse de vent : Les éoliennes à axe vertical peuvent produire de l'électricité efficacement à basse vitesse de vent, ce qui signifie qu'elles fonctionnent bien dans des endroits où le vent est faible.</li> <li>• Petite taille : Une éolienne à axe vertical nécessite une petite surface pour son installation, ce qui permet de l'installer dans des zones où l'espace est limité.</li> <li>• Maintenance facile : Une éolienne à axe vertical est plus facile à entretenir que les éoliennes à axe horizontal car elle est installée au sol et ne nécessite pas de monter à une hauteur importante pour effectuer la maintenance.</li> <li>• Esthétique : Une éolienne à axe vertical peut être attrayante du point de vue esthétique et peut être utilisée dans les villes, les zones touristiques et les zones résidentielles sans affecter l'apparence générale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé : La fabrication de générateurs éoliens à axe vertical nécessite l'utilisation de technologies avancées, ce qui les rend plus coûteux que les générateurs à axe horizontal.</li> <li>• Effet des vents latéraux : Les générateurs éoliens à axe vertical peuvent être affectés par l'effet des vents latéraux, ce qui réduit leur efficacité et leur productivité.</li> <li>• Bruit : Le générateur éolien à axe vertical émet un bruit fort pendant son fonctionnement, ce qui le rend inadapté à une utilisation dans les zones résidentielles et urbaines.</li> </ul>

## I.7 Principaux composants d'une éolienne

Les composants d'une éolienne sont illustrés dans la figure I.13

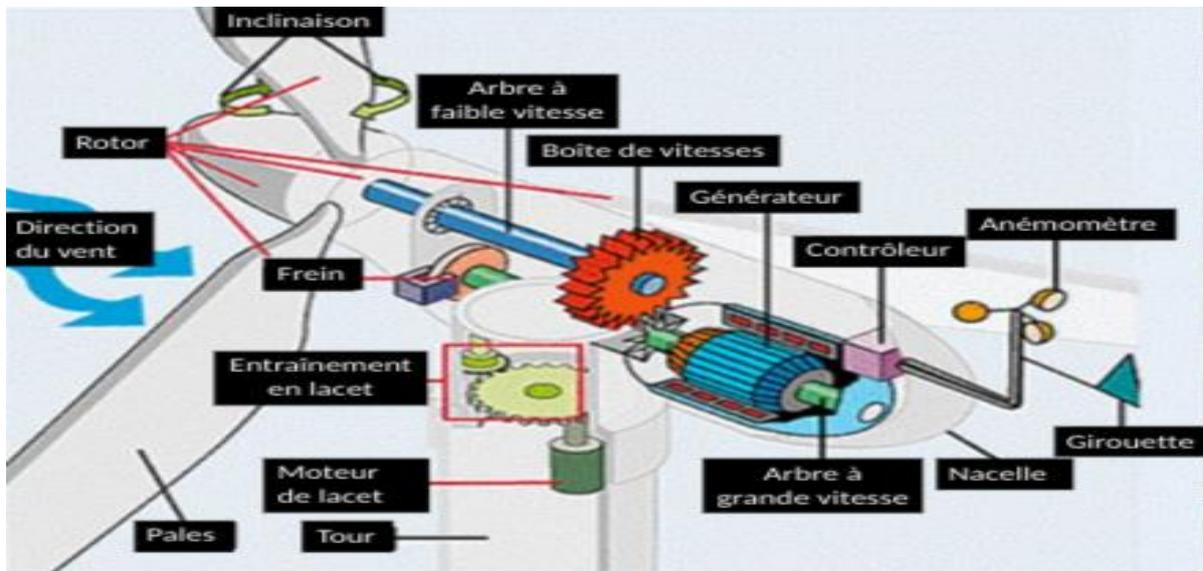


Figure (I.13) : Les composantes d'une éolienne

- **Anémomètre** : mesure la vitesse du vent et transmet les données de vitesse du vent au contrôleur. [15].
- **Les pales** : sont des structures physiques, qui sont optimisées sur le plan aérodynamique pour aider à capter la puissance maximale du vent en fonctionnement normal avec une vitesse de vent dans la plage d'environ 3-15 m/s. Chaque pale mesure généralement 20 mètres ou plus de longueur, selon le niveau de puissance [15].
- **Frein** : arrête le rotor mécaniquement, électriquement ou hydrauliquement, en cas d'urgence.
- **Contrôleur** : démarre la machine à des vitesses de vent d'environ 8 à 16 miles par heure (mph) et arrête la machine à environ 55 mph. Les turbines ne fonctionnent pas à des vitesses de vent supérieures à environ 55 mph car elles peuvent être endommagées par les vents violents [16].
- **Boîte de vitesses** : la fonction principale est de connecter l'arbre de basse vitesse à l'arbre de haute vitesse afin d'augmenter la vitesse de 30 à 60 rotations par minute (rpm) à environ 1000 à 1800 rpm, la vitesse requise par les générateurs pour produire de l'électricité [16].
- **Arbre haute vitesse** : entraîne le générateur.
- **Arbre basse vitesse** : fait tourner l'arbre de basse vitesse à une vitesse de 30 à 60 rpm.
- **Nacelle** : elle contient la boîte de vitesses, les arbres, le générateur, le contrôleur et le frein [16].

- **Pas** : la fonction principale du pas est d'ajuster les pales de l'éolienne dans ou hors de la vitesse du vent pour contrôler la vitesse du rotor de sorte que la vitesse du rotor soit dans la limite opérationnelle autorisée [15]
- **Rotor** : les pales et le moyeu forment ensemble le rotor.
- **Girouette** : mesure la direction du vent et communique avec l'entraînement de lacet pour orienter correctement la turbine par rapport au vent.
- **Entraînement de lacet** : Oriente les turbines face au vent pour les maintenir face au vent lorsque la direction change. Les turbines orientées vers l'aval ne nécessitent pas d'entraînement de lacet car le vent souffle manuellement le rotor loin d'elles [10].
- **Moteur de lacet** : alimente l'entraînement de lacet.

## I.8 Système de Régulation

### I.8.1 Freinage mécanique

Les freins se présentent sous différentes formes : manuels, pneumatiques, mécaniques, électriques et électromagnétiques. Lorsqu'il y a une ligne d'arbre avec une boîte de vitesses, les freins sont montés aussi près que possible de la roue. Lors du freinage d'une roue ayant un grand moment d'inertie, le frein doit être appliqué progressivement afin de réduire les contraintes. [17].

### I.8.2. Système d'orientation des pales "pitch"

Il est possible de maintenir la puissance de la machine en utilisant un système de contrôle dynamique des pales qui ajuste ses performances à la vitesse du vent, en particulier lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur minimale  $V_n$ . [18].

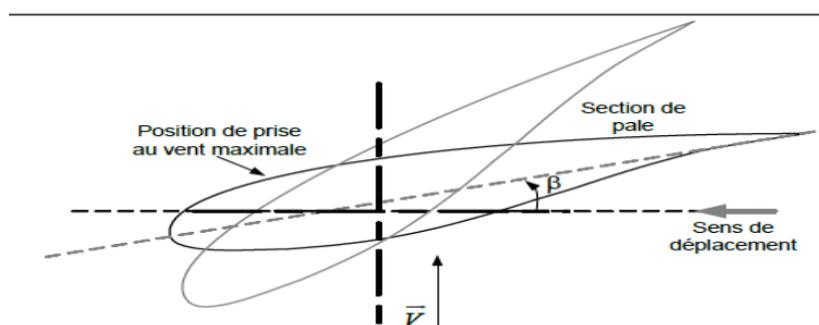


Figure (I.14) : Variation de l'angle de calage d'une pale [18]

### I.8.3. Système Stall passif

Dans les éoliennes à décrochage passif contrôlé, le rotor est rigidement fixé au moyeu à un angle prédéterminé. Par conséquent, aucun mécanisme de rotation des pales autour de leur axe n'est nécessaire lors de l'utilisation de l'approche du décrochage passif, car l'angle d'inclinaison est toujours constant. La puissance entrante est limitée à une valeur proche de la puissance nominale, et les pales

sont aérodynamiquement conçues pour décrocher à des vitesses de vent plus élevées. L'angle d'attaque augmente avec la vitesse du vent. L'effet de décrochage se produit au-delà d'un certain angle d'attaque, et la force produisant le couple ne peut être régulée qu'à peu près à sa valeur nominale. Environ 60 % des éoliennes à vitesse constante dans le monde sont conçues selon cette approche [19].

#### I.8.4. Système Stall actif

Le contrôle actif de l'inclinaison permet de bénéficier à la fois des pales à pas contrôlé et de l'effet d'incidence. L'un des avantages du contrôle actif des pales à pas contrôlé est la possibilité de gérer la puissance de sortie avec plus de précision qu'avec le contrôle passif, en veillant à ce que la puissance moyenne soit toujours égale à la valeur nominale lorsque la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale. La décision économique de payer ou non pour la complexité accrue de la machine lors de l'introduction du mécanisme d'inclinaison des pales déterminent en grande partie le contrôle de l'inclinaison, [19].

#### I.9 Zones de fonctionnement de l'éolienne

En se basant sur les informations précédentes, le schéma de conversion d'énergie fourni par les fabricants, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent.

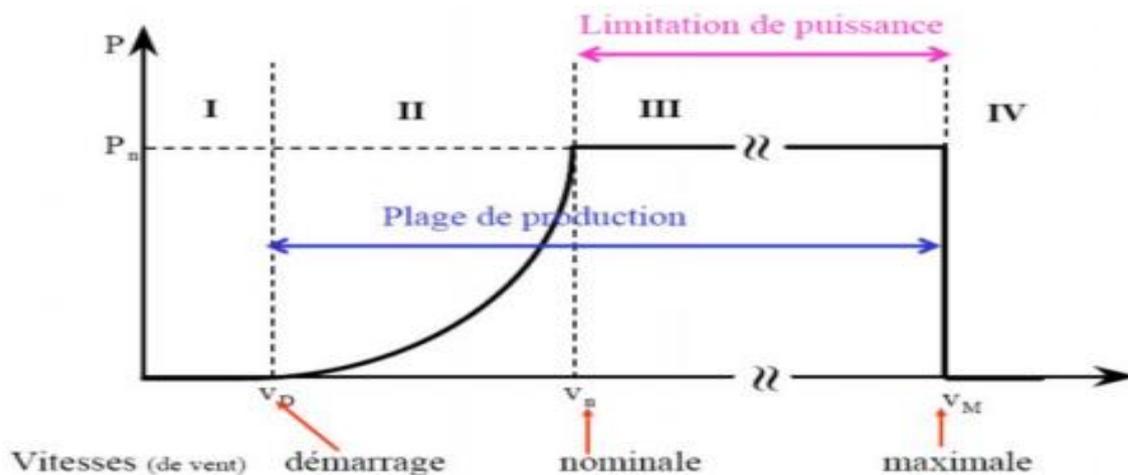


Figure (I.15) : Zones de fonctionnement d'une éolienne

**Zone I :** La vitesse du vent est très faible et elle n'est pas suffisante pour faire fonctionner l'éolienne et produire de l'énergie [20].

**Zone II :** La puissance maximale est obtenue dans cette zone à chaque vitesse de vent, et il existe plusieurs méthodes pour améliorer l'extraction d'énergie. Cette zone correspond à un fonctionnement à

charge partielle du système [21].

**Zone III :** La rotation des pales est ralentie par l'inclinaison des pales au niveau du moyeu, ce qui permet à la machine d'éviter les contraintes mécaniques excessives dues aux vitesses très élevées. Dans cette plage de vitesses, l'énergie générée reste constante [22] .

**Zone IV :** correspond à celle où le système de sécurité de fonctionnement arrête le transfert d'énergie [23].

### I.10. Les applications éoliennes

L'énergie captée par la rotation de l'hélice dans une éolienne est transformée en énergie mécanique qui peut être utilisée pour la transformer en d'autres formes d'énergie telles que l'énergie électrique, thermique ou potentielle. L'application la plus efficace est celle qui utilise l'énergie finale avec le moins de transformations possible.

**I.a. Tableau : Les applications les plus courantes des moulins à vent**

Objectif	Catégorie	Type de rotor	Application
Production d'énergie électrique	Systèmes hybrides diesel-éoliens	-Darrieus vertical, 1 à 3 pales - Horizontales, rapide	• Fourniture d'électricité aux populations et aux industries isolées
	Systèmes isolés ou à distance	Horizontales, bipales ou tripales, rapide	• Liaisons radio • Communications • Éclairage • Appareils électroménagers • Sécurité
	Systèmes connectés aux réseaux électriques	-Darrieus vertical, 1 à 3 pales -Horizontales, rapide	• Fourniture d'électricité via des réseaux de distribution
Obtention d'énergie mécanique	Systèmes isolés ou à distance	-Horizontal multipale -Vertical Savonius -Horizontal, 1 à 3 pales, rapide	•Pompage d'eau •Broyage •Etc.

## **I.11 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui est produite par la force du vent. Elle a des avantages et des inconvénients :

### **I.11.1 Avantages**

- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable et propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre ou de pollution atmosphérique.
- Elle est économique et peut réduire les coûts de production d'électricité à long terme.
- Les éoliennes peuvent être construites sur des terres qui ne peuvent pas être utilisées pour l'agriculture ou la construction.
- Les éoliennes ont une durée de vie de 20 à 25 ans.
- Dans les régions éloignées, les éoliennes peuvent être utilisées comme une excellente ressource pour produire de l'énergie [15].

### **I.11.2 Inconvénients**

- Les éoliennes peuvent être bruyantes et perturber les zones résidentielles.
- Elles ont besoin de beaucoup d'espace pour être installées et peuvent avoir un impact sur la faune et la flore locale.
- Les éoliennes ne peuvent pas produire de l'électricité si le vent ne souffle pas suffisamment fort.
- La construction des éoliennes peut être coûteuse et nécessite beaucoup de matériaux.
- Les éoliennes peuvent affecter la vue dans les zones rurales et les paysages naturels.

Il y a plus de deux mille ans, l'irrigation et la mouture du grain étaient réalisées grâce à l'énergie éolienne dans la région située entre le Tigre et l'Euphrate. Au XIXe siècle, les pompes éoliennes mécaniques ont été largement utilisées pour fournir de l'énergie à des fins d'irrigation et d'hygiène, modifiant ainsi le paysage de nombreux pays [25].

## **I.14. Classement des éoliennes**

Il existe deux techniques principales pour les éoliennes, à savoir la technique qui fonctionne à vitesse de vent constante et celle qui fonctionne à vitesse de vent variable. Dans cette partie, nous expliquerons de manière générale le fonctionnement de ces deux techniques.

### I.14.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe ont été développées en premier lieu comme la première technologie de production d'énergie éolienne. Dans cette technologie, le générateur synchrone est directement connecté au réseau. La vitesse de rotation du générateur ( $\Omega_{méc}$ ) est déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles du générateur synchrone (**Figure I.16**). [30]

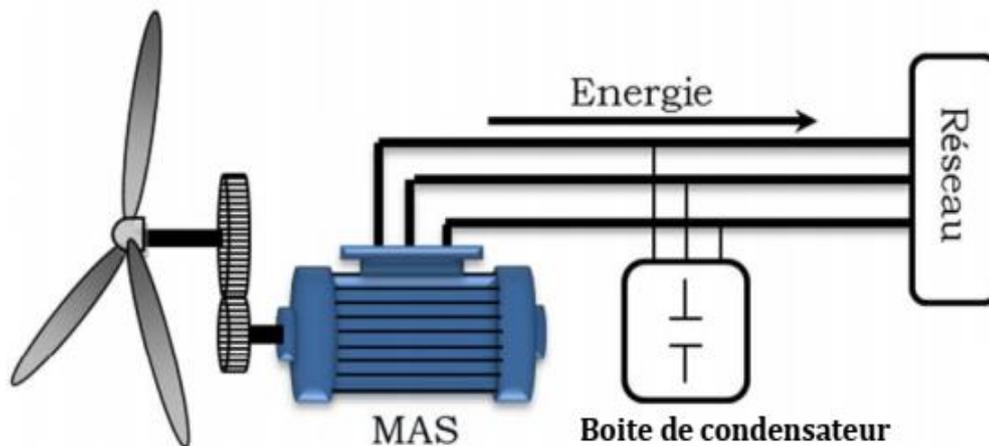


Figure (I.16): Éolienne directement connectée au réseau

Le couple mécanique produit par le moteur (le générateur) accélère la vitesse du générateur. Ce dernier fonctionne alors en sur-synchronisme et génère de l'énergie électrique sur le réseau. Pour un générateur standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ( $\Omega_{méc}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s = 1500$  tours par minute, ce qui nécessite l'ajout d'un multiplicateur pour adapter le générateur au rotor de l'éolienne (Figure I.16) [30].

### I.14.2. Les éoliennes à vitesse variable

En raison des problèmes causés par le fonctionnement à vitesse fixe, on a cherché à exploiter de la meilleure manière possible l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il est nécessaire de régler en permanence la vitesse de la génératrice en fonction de la vitesse du vent. Cette optimisation de la production peut être réalisée par des commandes sur la turbine et la partie électrotechnique (le générateur électrique lui-même et/ou les paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) [31].

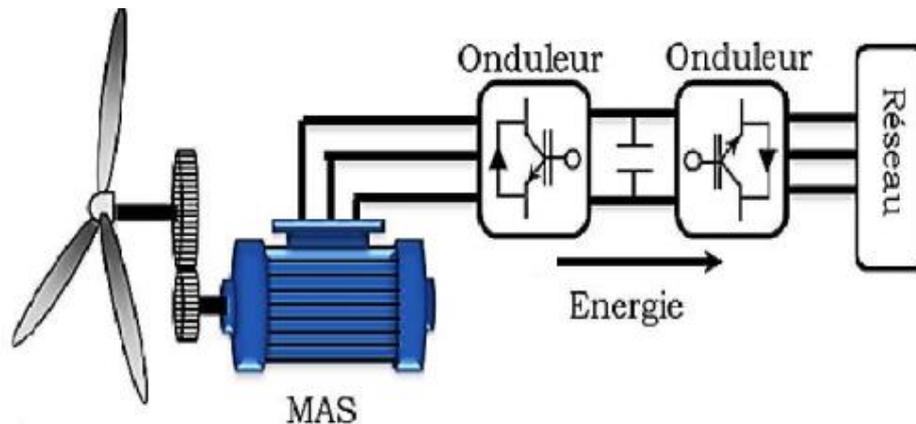


Figure (I.17): Aérogénérateur à vitesse variable

### I.15. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Aujourd'hui, l'utilisation la plus courante des turbines éoliennes est la production d'électricité. Pour cela, une machine électrique est nécessaire. Il existe une variété de machines électriques disponibles sur le marché qui peuvent être utilisées comme générateurs dans des systèmes aérogénérateurs qui nécessitent des caractéristiques extrêmement spécifiques [34]. Le type et les dimensions géométriques de la voilure déterminent le cahier des charges d'une génératrice éolienne. Ce paragraphe fournit une description succincte de certaines machines couramment utilisées dans les constructions éoliennes en tenant compte de leurs particularités.

Ce qui suit présente les générateurs courants des éoliennes. Il existe une variété de machines électriques différentes qui peuvent être utilisées pour produire de l'électricité éolienne. Le type de machine pour chaque application est déterminé par des facteurs techniques et économiques. Les générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) sont les plus courants pour les petites puissances ( $< 20$  kW) en raison de leur simplicité et de leur coût bas. Le générateur asynchrone est plus courant et plus économique dans les applications de plus grande puissance, jusqu'à environ 2 MW.

#### I.15.1 Générateur Asynchrone

En raison de sa robustesse, de sa simplicité mécanique et de son faible coût, le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance. Grâce à la variation du glissement entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor, la connexion directe au réseau de ce type de machine est beaucoup plus facile. Ceci explique pourquoi les machines à induction sont

utilisées dans la plupart des éoliennes à vitesse fixe. Dans les années 90, les Danois ont ajouté une seconde centrale électrique pour permettre l'exploitation de l'éolienne à deux vitesses, ce qui a permis d'augmenter la consommation d'énergie de leurs aérogénérateurs. La mise en place de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, ce qui permet à l'aérogénérateur à vitesse variable de fonctionner avec tous les avantages mentionnés précédemment.

### I.15.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

Les machines électriques asynchrones sont les moins coûteuses et les plus simples à fabriquer. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et utilisées à grande échelle. De plus, elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien et ont un faible taux de défaillance. Les aérogénérateurs de taille importante (avec une grande puissance et un rayon de pales important) ont une vitesse de rotation peu élevée.

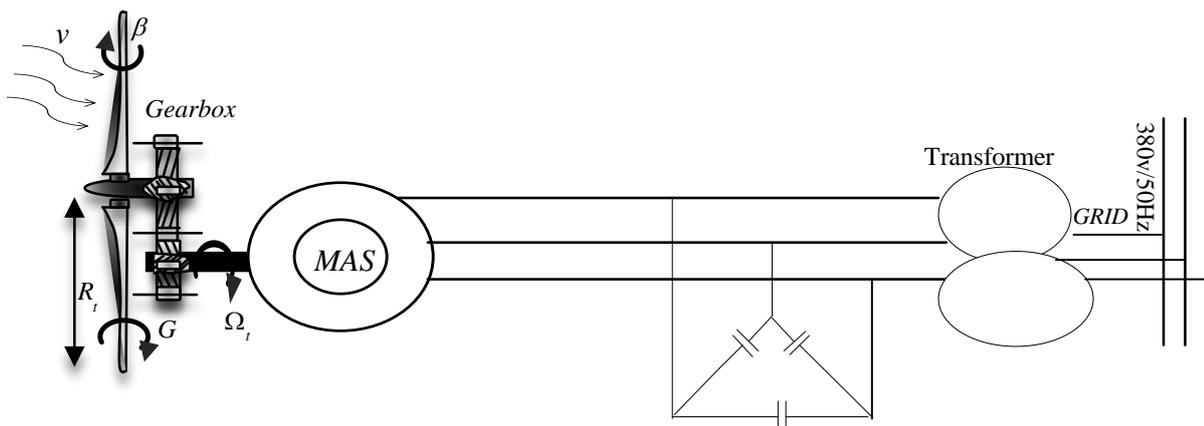


Figure (I.18) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).

Cependant, la création d'une génératrice asynchrone lente avec un rendement adéquat n'est pas envisageable. Ainsi, un multiplicateur mécanique de vitesse doit être ajouté entre la turbine et la machine asynchrone. Parfois, une solution consiste à modifier la configuration du bobinage du stator (nombre de pôles) et à utiliser des machines de type *Dahlander* (Figure I.18), mais le rendement n'est pas optimal sur toute la plage de vent [43]. Une option supplémentaire consiste à utiliser un variateur de fréquence. Cependant, cette solution (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) est généralement coûteuse et est donc rarement utilisée (Figure I.19).

Comme le montre la Figure (1.19), la majorité des applications éoliennes (environ 85 %) sont donc à vitesse de rotation constante et connectées directement au réseau électrique. Étant donné que la vitesse de rotation des pales est importante et que l'entraînement direct est possible, ces machines peuvent être

facilement utilisées dans les petits éoliennes. Cependant, leurs principaux inconvénients, en plus d'une efficacité énergétique inférieure par rapport aux systèmes à fréquence variable, sont la rigidité de ces chaînes, qui a déjà été mentionnée, qui provoque des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent.

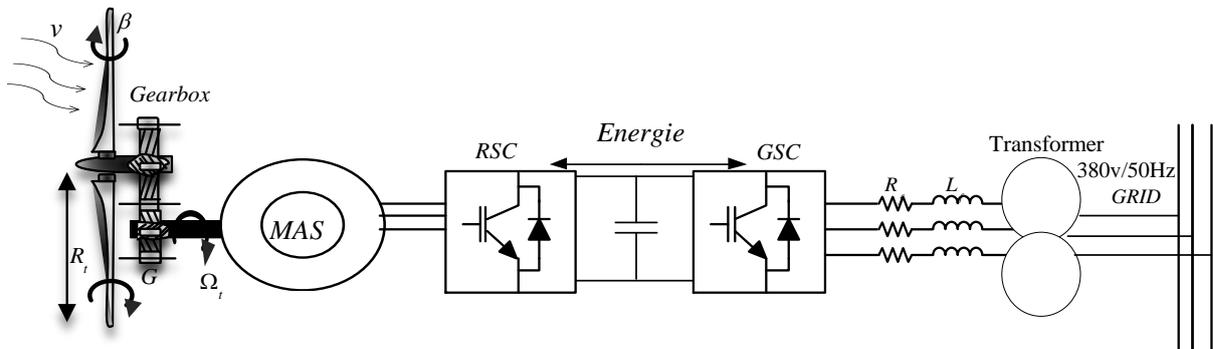


Figure (I.19) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

### I.15.1.2 Machine asynchrone à double stator

Certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator pour améliorer le rendement du dispositif précédent (Figure I.20) :

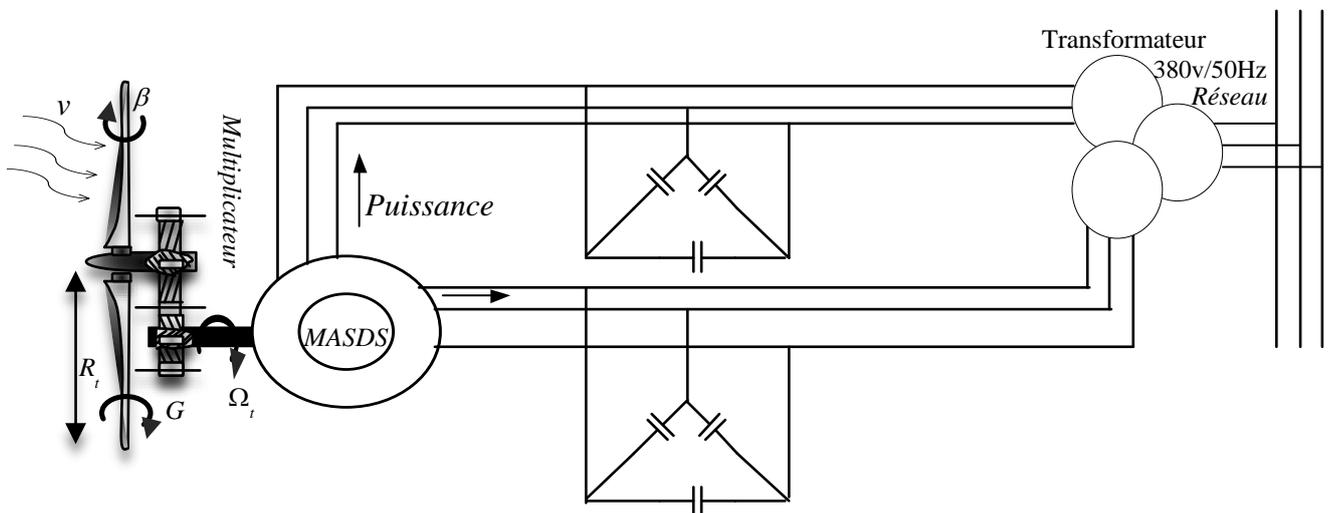


Figure (I.20) : Machine asynchrone à double stator dans une chaîne de conversion éolienne.

Un stator puissant avec peu de paires de pôles qui peut fonctionner à des vitesses de vent élevées [44]. Bien qu'il reste un dispositif à vitesse fixe, ce système a deux points de fonctionnement distincts. En raison de l'angle de calage réduit nécessaire pour orienter les pales, le bruit produit par l'éolienne est plus faible à des vitesses de vent plus faibles. La présence d'un second stator rend la machine particulière et augmente considérablement le coût et le diamètre, ce qui entraîne une augmentation du

poids et de l'encombrement de l'ensemble.

### I.15.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

La Figure (I.21) représente le dispositif de base. Avec cette configuration, il est possible de fonctionner à différentes vitesses sans aucune limite théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension générée est redressée et transformée en tension continue. Ensuite, l'onduleur fonctionne de manière traditionnelle et grâce à une régulation appropriée, il peut produire une tension alternative de fréquence fixe qui correspond à celle du réseau en utilisant un facteur de puissance unitaire. La puissance maximale que peut fournir l'éolienne est alors déterminée par la puissance nominale de la génératrice. La puissance totale échangée entre la machine et le réseau est mesurée par les convertisseurs utilisés. Ainsi, ils sont considérables en termes de coûts et de pertes considérables (jusqu'à 3 % de la puissance nominale de la machine) et provoquent des perturbations qui affectent le rendement et la qualité de l'énergie produite. De plus, les capacités sont nécessaires pour générer l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. En raison du fait que le redresseur est unidirectionnel, le réseau ne peut pas fournir cette énergie. Un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure ressemble à celle d'un onduleur peut éventuellement le remplacer. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine. Le transfert de puissance active est similaire au transfert de puissance dans le cas d'un simple redresseur. Cependant, cette méthode augmente le coût et la difficulté de mise en œuvre du dispositif, et les enroulements statoriques du moteur sont exposés à des pressions importantes, ce qui peut réduire leur durée de vie [15] [44]. L'ensemble de ces inconvénients n'a pas permis d'avancer considérablement dans l'industrie de ce dispositif.

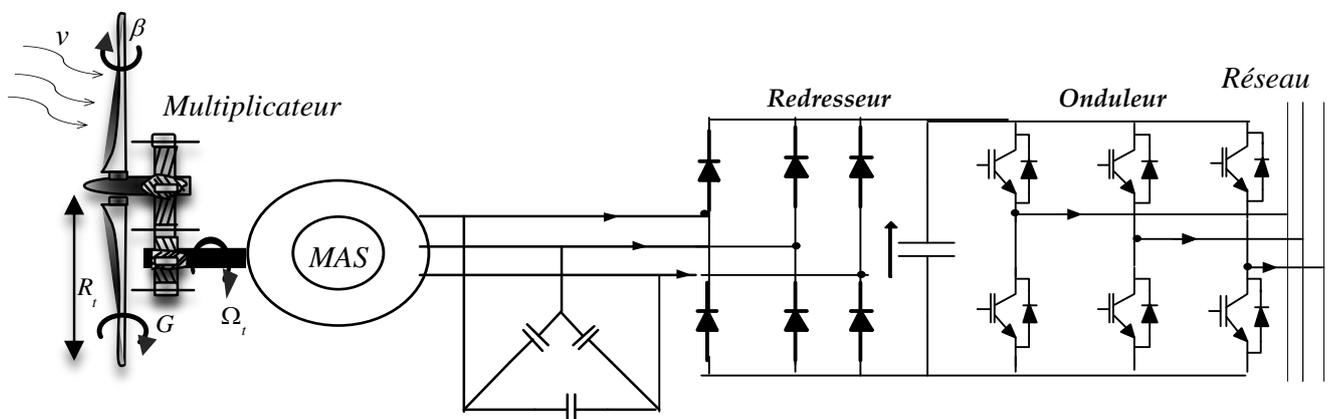


Figure (I.21) : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

## I.15.2 Générateur synchrone

Le défaut des machines asynchrones consiste à imposer un multiplicateur de vitesse. En effet, elles conviennent à des vitesses de rotation assez élevées et ont un couple trop faible pour permettre un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Les machines synchrones, en revanche, sont reconnues pour fournir des couples très importants à des dimensions géométriques appropriées. Ainsi, elles peuvent être utilisées directement sur les turbines éoliennes. Les défauts de ce type de système sont également présents.

Le générateur synchrone a un avantage sur le générateur asynchrone car il n'y a pas de courant de magnétisation réactif. Les aimants ou le bobinage d'excitation conventionnel peuvent produire le champ magnétique du générateur synchrone [12]. Le générateur peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses s'il dispose d'un nombre suffisant de pôles. Cependant, il est préférable d'utiliser un convertisseur statique Figure (I.22) pour connecter le générateur synchrone de manière indirecte au réseau de puissance. Ce convertisseur permet un fonctionnement à différentes vitesses. [13] Le générateur à aimants permanents est plus simple et moins cher pour les unités de petite taille. Le générateur synchrone est plus cher et plus complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente au-delà de 20 kW (environ).

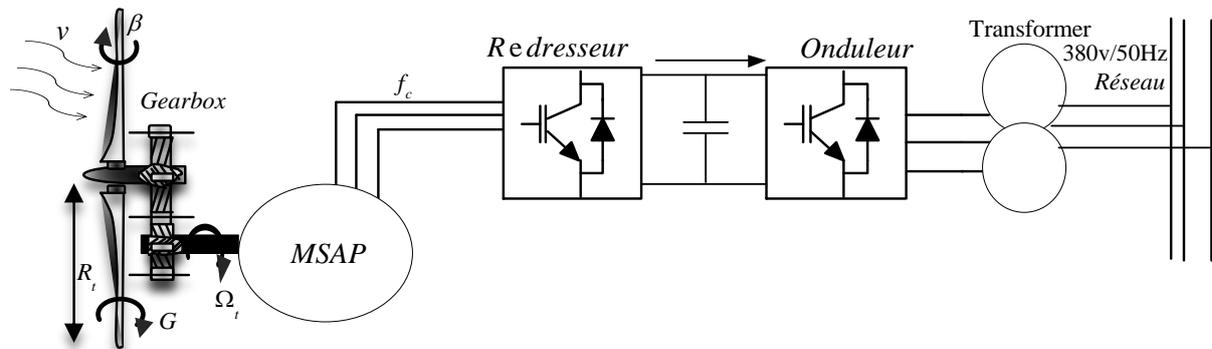


Figure (I.22à) : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

### I.15.2.1 Générateur synchrone à rotor bobiné

Dans un système éolien, les variations significatives des couples électromagnétiques peuvent entraîner la démagnétisation des aimants et leur durée de vie diminuée.

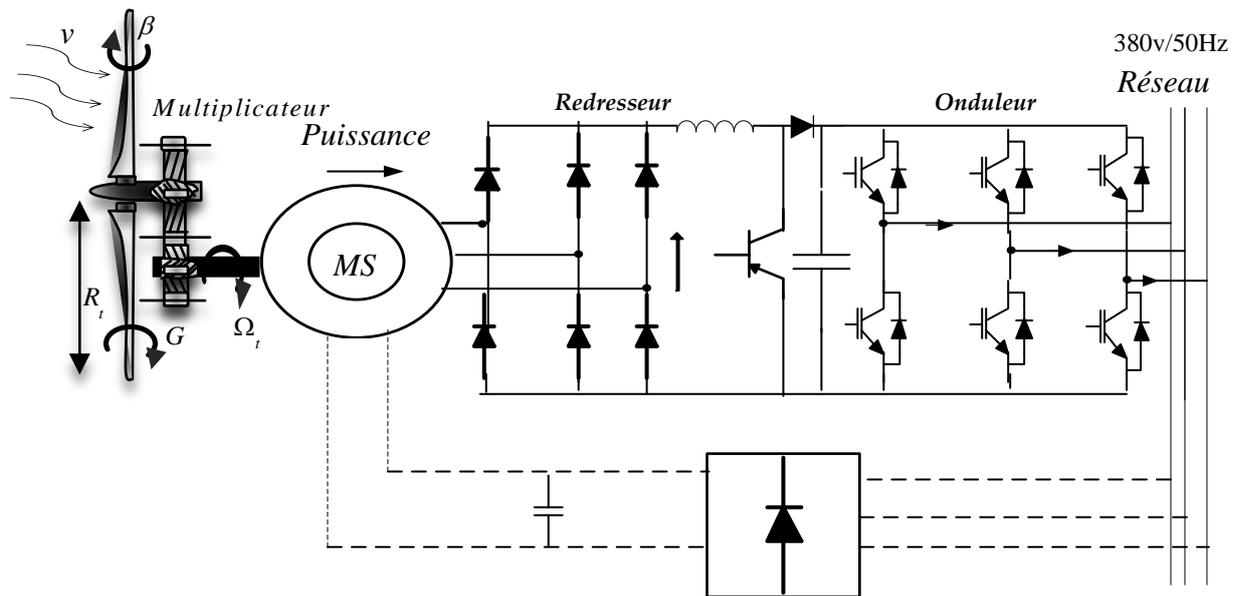


Figure (I.23) : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI.

Il est important de noter que les aimants sont généralement fabriqués à partir de matériaux à base de terres rares, ce qui rend leur fabrication coûteuse en raison de l'extraction difficile.

Certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné, où le champ tournant rotorique est créé par un enroulement alimenté en courant continu (roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau pour limiter cet inconvénient. Le mode d'excitation nécessite un contact glissant au rotor ou un système "Brushless" avec un redresseur tournant [2]

### I.15.2.2 Générateur synchrone à aimants permanents

La caractéristique d'auto-excitation de MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend idéal pour les systèmes de génération éolienne. En fait, il est le générateur le plus utilisé dans la catégorie des petites turbines en raison de son coût réduit et de sa simplicité. Cependant, les aimants et le convertisseur sont les meilleurs candidats pour les applications nécessitant une plus grande puissance.

La suppression du multiplicateur éolien et du système de balais-bagues a réduit les frais d'entretien du système. De plus, le rotor ne consomme pas d'énergie réactive, ce qui permet à la machine de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement. Les machines de construction standard (radiales), les génératrices discoïdes (champ axial) et les machines à rotor extérieur font partie des différents types de machines destinées aux applications éoliennes [17].

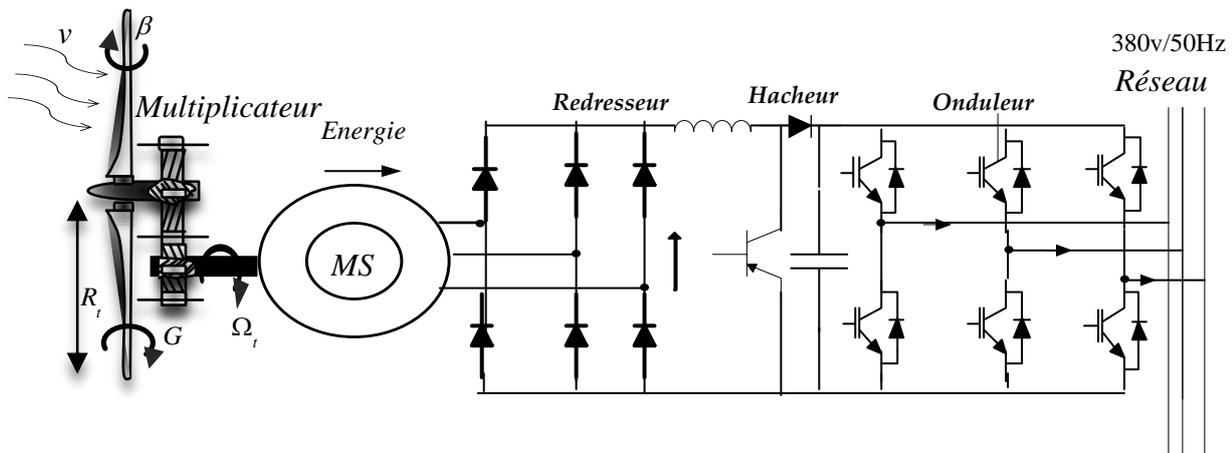


Figure (I.24) : Machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion éolienne.

### I.15.3 Machines à structures spéciales

Les machines à réluctance variable (MRV) sont principalement destinées aux applications nécessitant des entraînements lents à couple élevé ou de grandes vitesses de rotation. Les moteurs pas à pas sont des exemples d'actionneurs électromécaniques de positionnement.

Les machines à réluctance non-excitées et les machines à réluctance excitées sont les deux types de structures de MRV :

- ❖ **Les MRV non-excitées** sont principalement destinées aux fonctionnements à haute vitesse car elles sont très robustes, ne possèdent pas de contact glissant et ne sont pas fragiles. Ils ont un facteur de puissance médiocre, ce qui est un inconvénient majeur.
- ❖ **En utilisant une excitation** constituée d'une alimentation continue et de bobines comme d'aimants permanents, les *MRV excitées* résolvent ce problème de facteur de puissance.

### I.15.4 Machines Evolution des systèmes éoliens à vitesse variable vers la double alimentation

Dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est essentielle. Une telle machine nécessite l'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau, ce qui permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau. C'est pourquoi cette génératrice est utilisée pour produire de l'énergie électrique de grande puissance dans une large gamme de vitesse du vent [44] [46].

#### I.15.4.1 Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné a un stator triphasé similaire à

celui des machines asynchrones traditionnelles et un rotor contenant un bobinage triphasé qui peut être accédé par trois bagues munies de contacts glissants. La machine est généralement connectée au réseau dans un système éolien et l'énergie électrique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Une fraction de la puissance nominale de la machine est alors dimensionnée pour les convertisseurs utilisés. Le coût supplémentaire causé par l'utilisation de bobinages dans le rotor est compensé par l'économie effectuée sur le convertisseur.

En raison de la faible puissance transitée par le circuit rotorique par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique, cette configuration a l'avantage d'économiser des convertisseurs de puissance.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage qui nécessitent un multiplicateur de vitesse. Bien que le système à bagues et balais diminue leur robustesse, le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est suffisant pour que de nombreux fabricants (Vestas, Gamesa...) les utilisent [27].

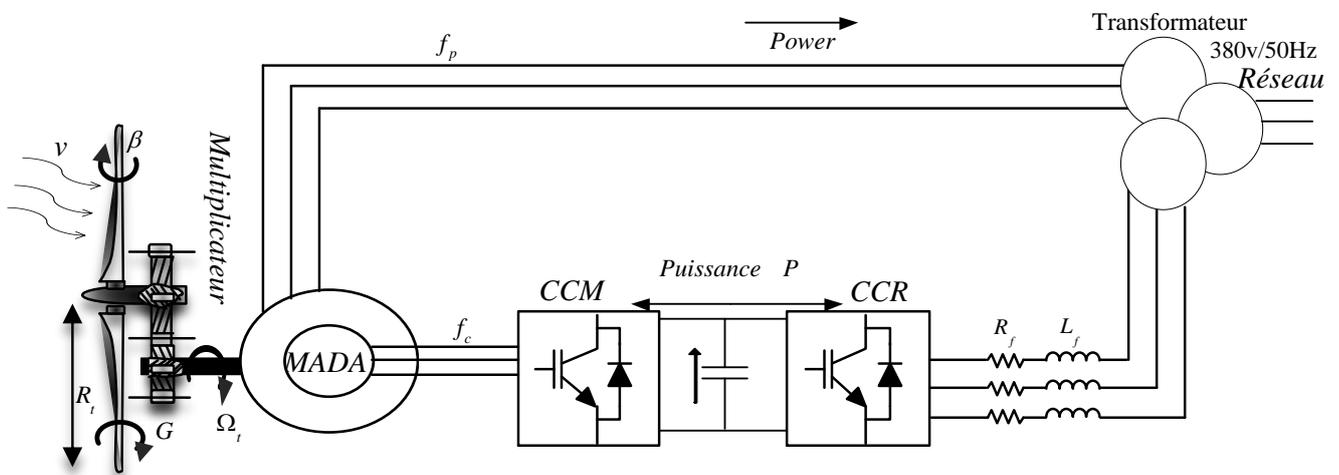


Figure (I.25) : Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné dans une chaîne de conversion éolienne.

#### I.15.4.2 Différentes stratégies de l'alimentation de la MADA

Il existe trois types de connexions pour la machine asynchrone à double alimentation sur le réseau :

- Branchement alternatif,
- Branchement en moteur alimenté par un seul convertisseur,

- Branchement en moteur alimenté par deux convertisseurs.

### **I.15.4.3 Avantages et inconvénients de la MADA.**

En général, la machine à double alimentation présente des avantages et des inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, tels que sa structure, sa stratégie de commande et ses applications, tout comme d'autres machines [34].

#### **❖ *Avantages de la MADA.***

Voici quelques avantages de la machine à courant faible double :

- La possibilité d'accéder au champ tournant et au champ statique offre la possibilité d'obtenir plusieurs degrés de liberté pour ajuster le transfert d'énergie et le coefficient de puissance, avec la possibilité de récupérer ou d'injecter de l'énergie dans les bobines de la machine.
- La plage de variation de vitesse autour de la vitesse synchrone peut être augmentée, et la commande directionnelle associée à la technique de commande moderne peut être utilisée pour obtenir un couple moteur nominal sur une plage étendue de vitesses.
- Le circuit de rotor peut être contrôlé à l'aide d'un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au circuit statique. Ce convertisseur rotorique à haut rendement permet d'obtenir une performance dynamique élevée en termes de temps de réponse, de réduction des distorsions électriques et d'amélioration de l'efficacité.
- La machine à courant faible double est préférée pour ses caractéristiques de régulation de vitesse en contrôlant les résistances présentes dans le circuit de rotor, et elle peut démarrer sans avoir besoin d'un courant élevé du réseau.
- Elle se distingue par une plus grande flexibilité en cas de défaillance de l'un des convertisseurs, ce qui la rend plus performante que la machine à alimentation unique.

#### **❖ *Inconvénients de la MADA.***

Tout d'abord, il convient de noter que la MADA est une machine asynchrone présentant un inconvénient majeur lié à sa structure non linéaire, ce qui entraîne une complexité accrue de sa commande. En outre, il est possible de relever les points faibles suivants :

- La MADA doit faire face à la concurrence de la MAS à cage, très étudiée et bien connue sur le marché traditionnel, ce qui peut susciter une certaine méfiance à l'égard de cette technologie innovante.

- La MADA est plus volumineuse qu'une MAS à cage de même puissance, et son aspect multi-convertisseurs augmente le nombre de convertisseurs nécessaires, entraînant ainsi une augmentation de son coût.

## **I.16 Conclusion**

Ce chapitre a traité de l'énergie éolienne en général, en mettant l'accent sur ses propriétés et sur son évolution dans le temps. Nous avons décrit comment l'énergie éolienne est convertie en énergie mécanique (cinétique), puis en énergie électrique.

Nous avons examiné plusieurs types de turbines, y compris les turbines verticales et horizontales, en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons également abordé les composants des turbines éoliennes. Nous avons abordé les technologies de contrôle telles que le contrôle passif (utilisant le concept de décrochage) et le contrôle actif (utilisant le principe de contrôle du tangage), ainsi que les freins mécaniques. Nous avons également abordé les plages de fonctionnement des générateurs d'énergie éolienne et les fluctuations constantes et régulières de la vitesse du vent. Enfin, nous avons abordé la question de l'énergie éolienne au niveau mondial et local, y compris la capacité de production et la vitesse du vent à différents endroits. Nous avons également parlé des générateurs qui fonctionnent à la fois avec des vitesses de vent constantes et variables.

# Chapitre II

## Modélisation d'un Système Eolien Basé Sur une Machine Asynchrone Double Alimentation

## II.1 Introduction

En raison des préoccupations environnementales et des frais d'exploitation, les chercheurs ont longtemps cherché un autre type de production d'énergie. C'est pourquoi les sources d'énergie renouvelables ont suscité un intérêt croissant au cours des dernières années. La compréhension du système éolien commence par la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Cela nous permet tout d'abord de comprendre le comportement dynamique de la machine et l'interaction électromécanique. Avec un modèle correct, il est facile de passer à n'importe quel type de contrôle.

Les éoliennes à vitesse variable, par opposition aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesse, optimisant la production d'énergie à des vitesses de vent faibles tout en maintenant une production d'énergie constante à des vitesses de vent élevées.

Dans ce chapitre, nous allons explorer tous les composants de ce système de conversion de l'énergie éolienne, ainsi que concevoir et modéliser chaque partie et chaque étape. Nous commencerons par nous concentrer sur le vent, qui est un facteur clé pour comprendre et prédire les performances des éoliennes. Nous modéliserons ensuite les éoliennes, y compris leurs caractéristiques aérodynamiques, leur comportement mécanique et leur réactivité aux variations de la vitesse du vent. L'objectif premier des systèmes d'énergie éolienne est d'extraire le plus d'électricité possible du vent. Pour ce faire, on utilise diverses méthodologies et algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Les procédures MPPT garantissent que l'éolienne fonctionne dans sa position optimale, en augmentant la production d'énergie même lorsque les conditions de vent changent.

Nous passerons ensuite en revue les modèles de signaux triphasés qui peuvent être utilisés pour comprendre, évaluer et construire le système de contrôle du générateur à induction doublement alimenté (GADA) afin d'en améliorer les performances et de l'intégrer de manière efficace. En outre, nous modéliserons la transformation de Park, qui fait passer les propriétés électriques et magnétiques du dispositif GADA d'un système triphasé à un système de Park.

Enfin, nous verrons comment modéliser et réguler un onduleur à deux niveaux en utilisant l'approche de la modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui est souvent utilisée pour contrôler les transformateurs de puissance à deux niveaux. Après tout cela, nous contrôlerons les résultats de la simulation dans le logiciel MATLAB et nous les analyserons.

## II.2 Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne basée sur une GADA.

Le système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur asynchrone à double alimentation (GADA) se compose principalement d'un générateur, d'une éolienne à calage variable avec un système de transmission (multiplicateur de vitesse), d'un convertisseur côté réseau, d'un convertisseur côté générateur, d'un condensateur de bus continu, d'un transformateur de couplage, ainsi que d'un système de contrôle et de protection, comme illustré dans la figure (II.1).[1] [2]

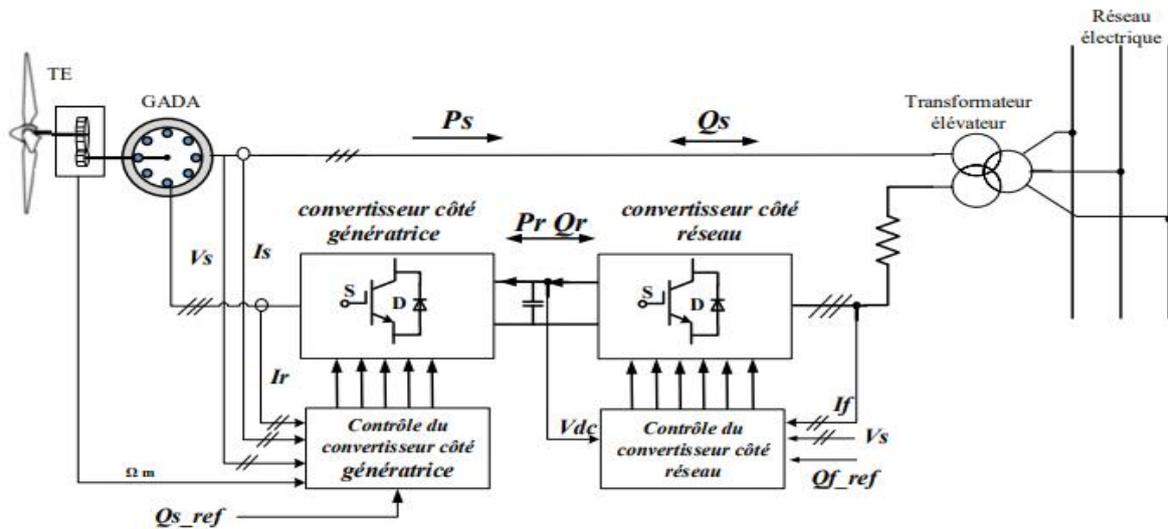


Figure (II.1) : Structure triphasée du système éolien couplé au réseau.

### II.2.1 Modélisation de la Turbine Eolienne

L'éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Le rapport entre l'énergie éolienne et l'énergie mécanique récupérée par le rotor est déterminé par trois facteurs : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont influencées par les conditions climatiques du site.[3]

Le dispositif étudié ici comprend une éolienne équipée de pales de longueur  $R$  qui actionnent un générateur électrique à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ , comme illustré sur la figure (II.2).

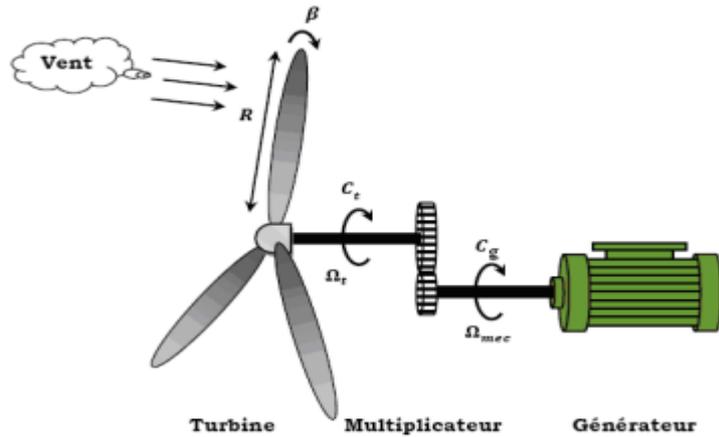


Figure (II.2) Schéma de la turbine éolienne[4]

### II.2.1.1 Modélisation source primaire : le vent

Les éoliennes sont alimentées par le vent, et une partie de l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique, qui est ensuite transférée en énergie électrique. Au lieu de déterminer la masse précise du vent à la hauteur des turbines, le vent peut être représenté par une variable aléatoire qui dépend de caractéristiques statistiques. De nombreuses recherches sur la modélisation du vent ont été entreprises à l'aide d'un bruit blanc et d'une fonction de transfert spécifiée par des variables critiques relatives au site et au vent. Le profil du vent tel qu'il évolue dans le temps.

$$v_v(t) = f(t) \quad (\text{II.1})$$

$$v_w(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$v_w$  : Vitesse du vent (m/sec).

$A$  : Valeur moyenne de la vitesse du vent.

$a_k$  : Amplitude de l'harmonique d'ordre  $k$ .

$w_k$  : Pulsation de l'harmonique d'ordre  $k$ .

$i$  : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

Dans notre étude, le profil du vent appliqué possède une faible vitesse, sa variation en fonction du temps est représentée par l'équation suivante :

$$v_v(t) = 8 + \sin(0.3047wt) + 4\sin(0.8665wt) + 2\sin(3.2930wt) + \sin(9.6645wt) \quad (\text{II.3})$$

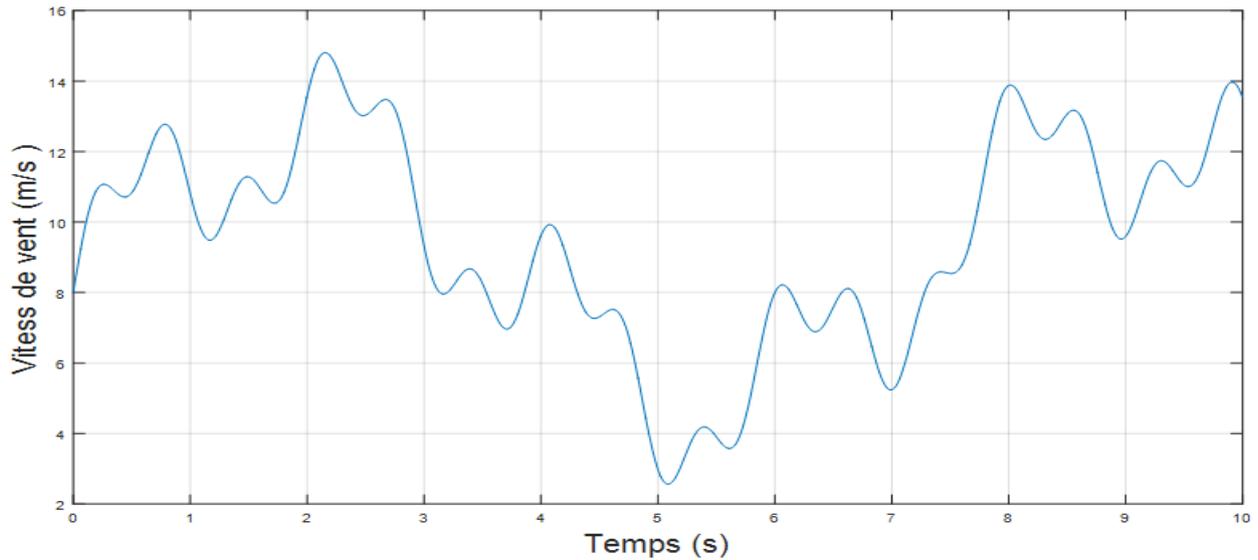


Figure (II.3) : Profil du vent appliqué à la turbine.

### II.2.1.2 Modélisation de la Turbine

La puissance du vent, ou la puissance éolienne, est définie comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S_w V^3 \quad (\text{II.4})$$

$\rho$  : est la densité d'air ( $\rho = 1.225 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ),

$S_w$  : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale  $R$  où  $S_w = \pi R^2$ .

$V$  : est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique convertie par une éolienne  $P_{aer}$  est déterminée par le coefficient de puissance  $C_p$ , qui est donné par la formule suivante : [5]

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$ , dont le calcul est une valeur approchée de manière empirique pour une éolienne utilisant la génératrice de type Machine Asynchrone à Double Alimentation sans balais, est défini comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left[ 116 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right] \exp \left[ -21 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right] + 0.0068\lambda \quad (\text{II.6})$$

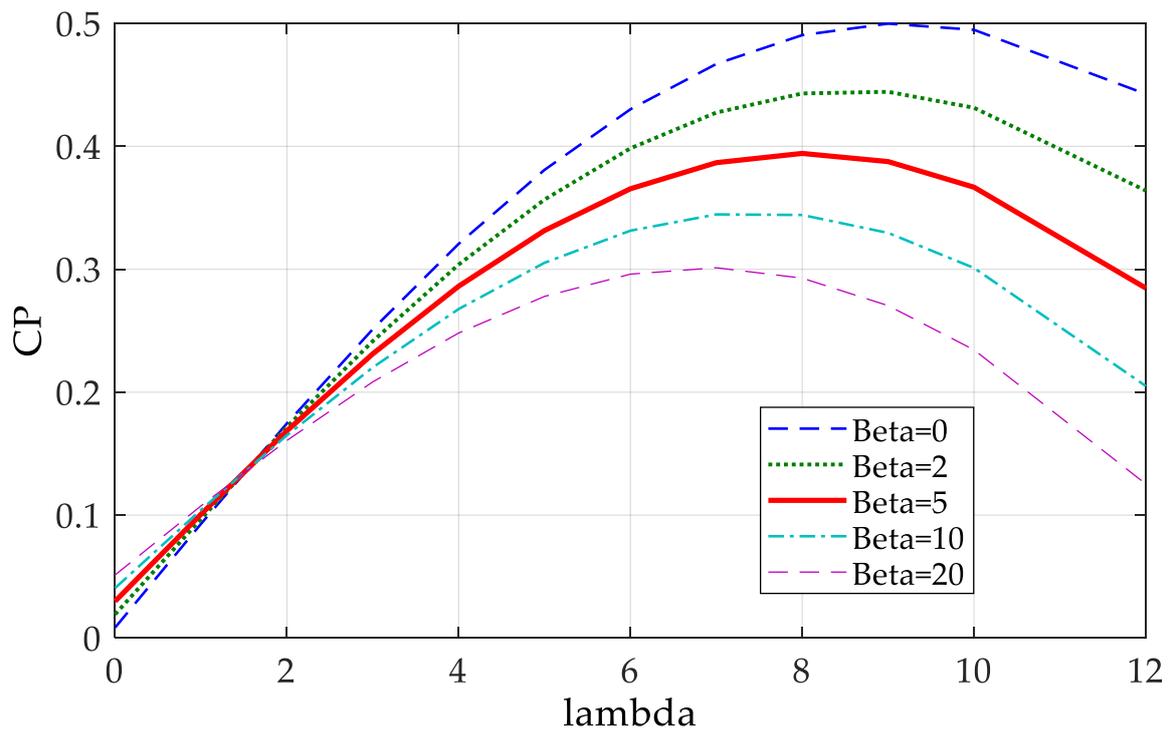


Figure (II.4) : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , (Figure II.4), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ( $C_p = 0.5$ ) qui correspond aux valeurs optimales ( $\lambda = 9.2$ ) et ( $\beta = 0$ ). Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale.

Une commande adaptée à ce système sera élaborée par la suite pour atteindre ce point de fonctionnement. On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout des pales de la turbine  $\Omega_t R_t$  sur la vitesse instantanée de vent  $v_w$  elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v_w} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\Omega_t$  : Vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s);

Le couple aérodynamique (turbine) peut être déterminé directement en utilisant la relation suivante lorsque la vitesse de la turbine est connue

$$C_e = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II.8})$$

$C_e$  : Le coefficient du couple.

### II.2.1.3 Modèle mécanique de la turbine éolienne

Le réducteur convertit la révolution de la turbine (arbre lent) en rotation du générateur (arbre rapide). Les deux équations suivantes modélisent mathématiquement ce multiplicateur :[6]

$$C_{mec} = \frac{C_t}{G} \quad (II.9)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.10)$$

$G$  : Gain du multiplicateur.

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice.

$C_t$  : Couple de la turbine (aérodynamique).

$\Omega_t$  : Vitesse de la turbine.

La représentation à deux masses de l'articulation de l'engrenage dans la transmission de puissance, reliée à la boîte de vitesses qui transmet le couple induit par l'impact du vent, a été représentée dans ce travail pour le modèle mécanique. La figure (II.5) illustre le modèle mécanique. [7]

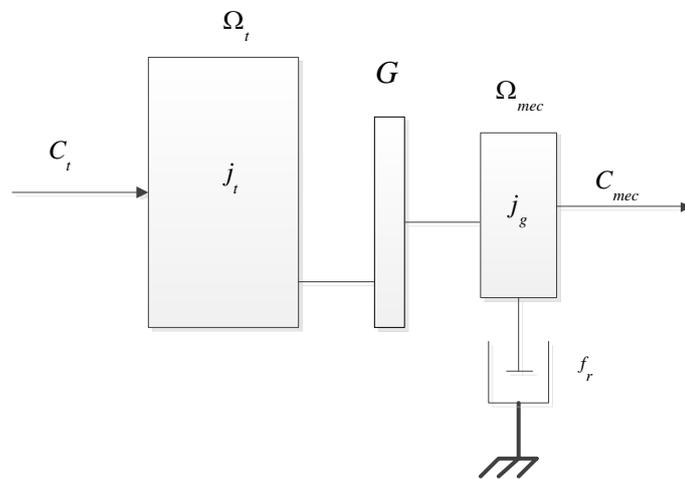


Figure (II.5) : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

La masse de l'éolienne est rapportée comme l'inertie  $J_t$  sur l'arbre de la turbine et comprend la masse des pales ainsi que la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé prend en compte l'inertie total  $J_T$ , qui se compose de l'inertie de la turbine transférée au rotor du générateur et de l'inertie du générateur  $J_m$  : [8]

$$J_T = \frac{J_t}{G^2} = J_m \quad (II.11)$$

Nous pouvons formuler l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique du générateur en disant que :

$$J_r \frac{d\Omega_t}{dt} + C_f = C_{mec} - C_{em} \tag{II.12}$$

Où  $C_{em}$  est le couple électromagnétique du GADA.

Le frottement des différentes sections du système de rotor, qui comprend les pales, l'essieu et l'arbre du générateur, est intégré dans un seul coefficient de frottement donné à l'arbre du générateur et appelé "coefficient de frottement"  $C_f$ .

$$C_f = f_r \Omega_{mec} \tag{II.13}$$

$f_r$  : Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

Le schéma bloc de la figure (II.6) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_{mec}$  de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la Machine Asynchrone à Double Alimentation. La vitesse du vent  $v_w$  considérée comme une entrée perturbatrice au système.

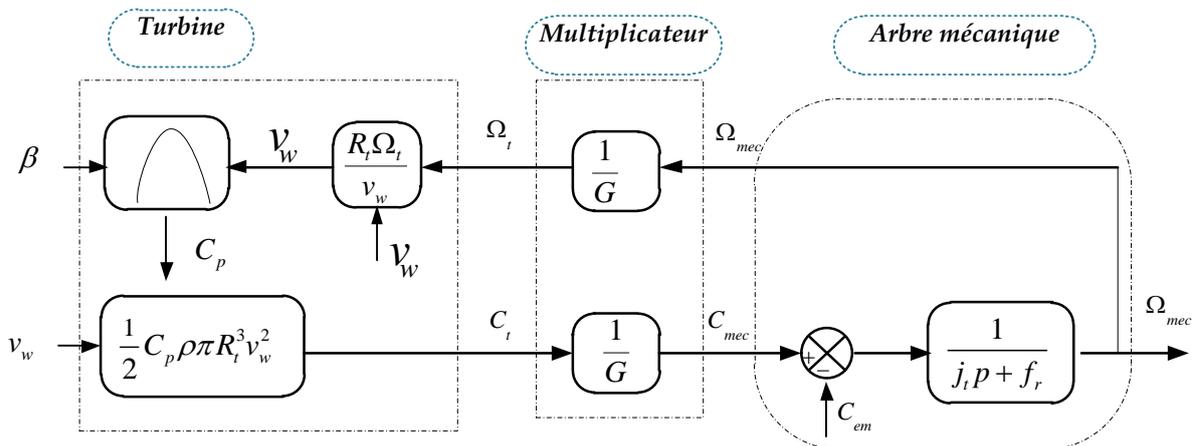


Figure (II.6) : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

### II.3 Stratégie de commande de la turbine éolienne

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de la puissance. Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de la puissance [4]. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la

terminologie : Maximum power point tracking (MPPT) doit être utilisée. Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la (MPPT), et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services de système [35].

Nous constatons dans le schéma bloc de la figure (II.6) que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de calage des pales  $\beta$  et le couple électromagnétique de la génératrice  $C_{em}$ . On a deux techniques de commandes à appliquer :

- L'une pour maximiser la puissance captée lorsque la vitesse du vent est inférieure à celle nécessaire pour atteindre la puissance nominale de la turbine.
- L'autre pour limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale lors des fortes vitesses du vent.

Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme une entrée perturbatrice, à ce système de nature très fluctuante.

Nous pouvons envisager deux types de stratégie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée nous utilisons une loi de contrôle de vitesse ou une loi de contrôle du couple. Si on utilise une loi de contrôle du couple, l'angle de calage reste fixe, on parle alors de contrôle indirect de la vitesse. Ce principe est connu sous la terminologie (MPPT). Par contre, si nous utilisons une loi de contrôle de vitesse, une action sur l'angle de calage permet de limiter cette puissance et nous parlons alors d'un contrôle direct de la vitesse. Donc on peut distinguer deux modes de contrôle : [35]

- le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique;
- le contrôle avec asservissement de vitesse mécanique.

Le but de la commande à vitesse variable de la MADA est d'extraire le maximum de puissance éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif étudié.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la génératrice (MADA) et ces convertisseurs sont idéaux, i.e., quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique sur l'arbre de la génératrice  $C_{em}$  est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande  $C_{em} = C_t^{ref}$ . Ainsi, le générateur et ces convertisseurs seront modélisés par un gain unitaire.

### II.3.1 La commande de la turbine MPPT (sans asservissement de vitesse).

Dans la pratique, la mesure de la vitesse du vent est difficile car l'anémomètre est placé derrière le rotor de l'éolienne et le diamètre balayé par les pales est assez grand. La distance entre le rotor de l'éolienne et le diamètre balayé par ses pales est critique.

Dans ces conditions, on utilise un contrôle de la vitesse de rotation sans asservissement, qui repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent par rapport aux constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de l'éolienne est nul. En outre, si l'on ne tient pas compte de l'influence du frottement visqueux  $C_f$ . L'équation mécanique du système éolien (II.12) est la suivante [10] [11] :

$$J_T \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{mec} = C_t - C_{em} - C_f \quad (II.14)$$

$$C_t = C_{em} \quad (II.15)$$

Le concept de contrôle MPPT sans contrôle de la vitesse est basé sur la mesure de la vitesse de rotation du générateur, nous pouvons donc estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit à partir de cette mesure. La vitesse de rotation de la turbine est la suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mrc}}{G} \quad (II.16)$$

La mesure exacte de la vitesse du vent étant difficile, une approximation, notée  $V$ , est obtenue en estimant la vitesse de rotation de l'éolienne :

$$V = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{opt}} \quad (II.17)$$

Avec la connaissance d'une estimation de la vitesse de rotation de la turbine (Eq. II.16) et l'estimation de la vitesse du vent (Eq. II.17), le couple de la turbine éolienne peut ensuite être s'exprimer par :

$$C_t = \frac{1}{2\Omega_t} \rho S V^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{II.18}$$

A partir des équations (II.9) et (II.15), on peut déterminer le couple électromagnétique de référence ou bien le couple de réglage comme suit :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_t}{G} = \frac{1}{2G\Omega_t} \rho S V^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{II.19}$$

En remplaçant les équations (II.16) et (II.17) dans (II.19), on obtient une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3 \lambda^3} \rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta) \Omega_t^2 \tag{II.20}$$

Pour obtenir la puissance la plus élevée, il faut régler la vitesse particulière à sa valeur idéale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance maximale  $C_{p\_max}$ . En conséquence, le couple électromagnétique de réglage augmente :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3 \lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 C_{p\_max} \Omega_t^2 \tag{II.21}$$

La figure (II.7) est un schéma fonctionnel qui décrit l'approche de contrôle MPPT pour une éolienne sans contrôle de vitesse. L'éolienne n'a pas de contrôle de vitesse.

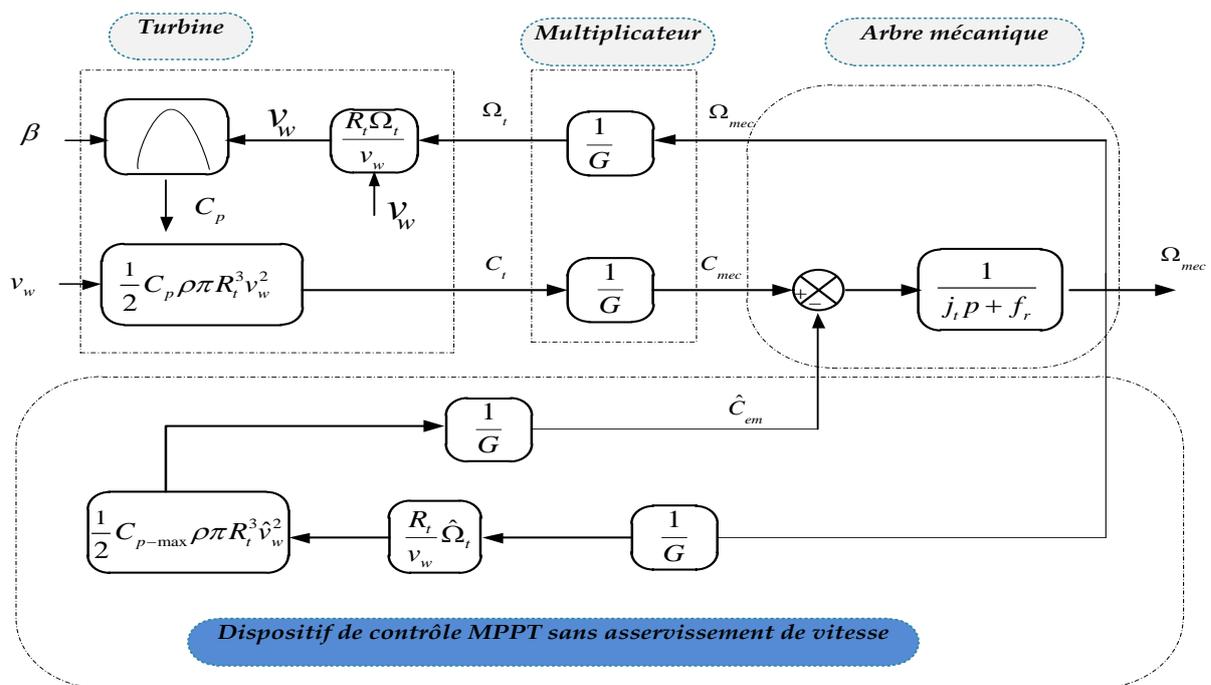


Figure (II.7) : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

## II.4 Fonctionnement et modélisation de la GADA.

### II.4.1 Modèle de la GADA dans le repère triphasé

La GADA se compose d'un stator identique à celui d'une machine asynchrone standard à cage d'écureuil et d'un rotor accessible par trois anneaux à contacts coulissants. Le stator est équipé d'enroulements triphasés isolés qui forment les pôles appropriés, et il est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé à partir du réseau à une amplitude et une fréquence constantes, formant ainsi le champ magnétique du stator .[6]

Le rotor, comme le stator, est alimenté par des tensions triphasées qui ont une amplitude et une fréquence variables en régime permanent pour répondre aux diverses conditions de fonctionnement de la machine (vitesse, couple, etc.). Comme la montre la figure II.1, ceci est réalisé en utilisant deux convertisseurs triphasés, l'un du côté du réseau (CCR) et l'autre du côté du générateur (CCG). Ces convertisseurs sont chargés d'imposer les tensions nécessaires au rotor pour gérer le point de fonctionnement global de la GADA et d'effectuer l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau, en conjonction avec la stratégie de contrôle appropriée[12].

Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.é.m.) dans les enroulements rotoriques.

Le rapport entre les f.é.m. créées au rotor et au stator est défini par :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r \omega_r}{N_s \omega_s} = \frac{N_r \omega_s - p\Omega_m}{N_s \omega_s} = u \frac{\omega_s - p\Omega_m}{\omega_s} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$N_r$  Et  $N_s$  : respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

$p$  : le nombre de paires de pôles de la GADA.

$u$  : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotoriques et statoriques.

$\omega_s$  Et  $\omega_r$  : respectivement les pulsations statorique et rotorique de la GADA. Ainsi, l'équation qui relie  $\omega_s$  (fréquence des tensions et des courants du stator),  $\omega_r$  (fréquence des tensions et des courants du rotor) et  $\omega_e$  (vitesse électrique du rotor) est la suivante

$$\omega_s = \omega_e + \omega_r \quad (\text{II.23})$$

La relation entre la vitesse mécanique de l'arbre  $\Omega_m$  et la vitesse électrique dépend des paires de pôles de la machine :

$$\omega_e = p\Omega_m \quad (\text{II.24})$$

Les unités de ces deux équations sont données en rad/s. Le glissement de la machine est défini comme suit :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (\text{II.25})$$

L'équation (II.22) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = u g \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$u = \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II.27})$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait.

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{u} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$i_s, i_r$  : sont les courants statoriques et rotoriques.

## II.4.2 Hypothèses simplificatrices

Le modèle GADA repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui sont appliquées lors de la modélisation[12] :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est correctement laminé et la saturation au niveau du stator et du rotor est négligeable.
- Dans la section des conducteurs élémentaires, la densité de courant est considérée comme uniforme.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

La construction générale simplifiée et idéalisée de la GADA peut être définie comme trois enroulements dans le stator et trois enroulements dans le rotor, comme illustré dans l'image ci-dessous. L'angle  $\theta_m$  représente l'angle formé par l'axe de la phase de référence du rotor Ra et l'axe fixe de la phase de référence du stator SA[12].

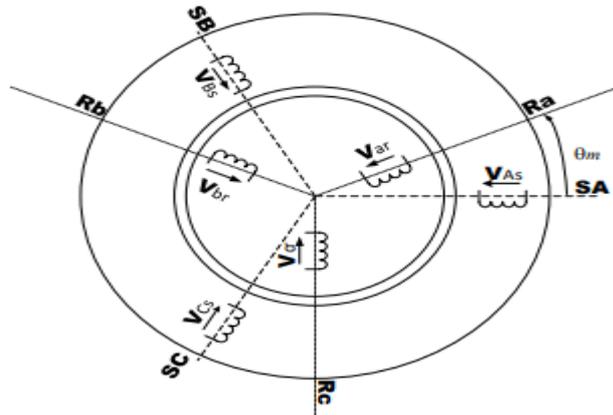


Figure (II.8) : Les enroulements triphasés idéaux (stator et rotor) de la GADA

Ces enroulements sont une représentation idéale de la génératrice réelle, ce qui aide à dériver un circuit électrique équivalent, comme le montre la figure (II.9).

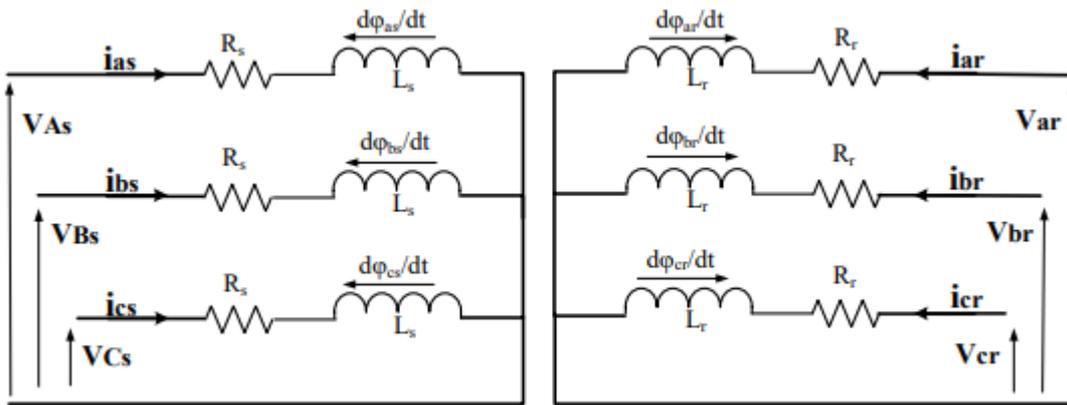


Figure (II.9) : Circuit électrique équivalent de la GADA.

- *Equations électriques.*

Les tensions instantanées du stator, le courant et les flux de la génératrice peuvent être décrits dans ce modèle idéalisé par le système d'équations électriques suivant :

$$\begin{cases} v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\phi_{as}(t)}{dt} \\ v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\phi_{bs}(t)}{dt} \\ v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\phi_{cs}(t)}{dt} \end{cases} \quad (II.29)$$

$$\begin{cases} v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\varphi_{ar}(t)}{dt} \\ v_{br}(t) = R_r i_{br}(t) + \frac{d\varphi_{br}(t)}{dt} \\ v_{cr}(t) = R_r i_{cr}(t) + \frac{d\varphi_{cr}(t)}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Où :

$R_s, R_r$  : Ils représentent la résistance du stator et du rotor.

$v_s, v_r$  : Les tensions électriques appliquées au stator et au rotor des phases a, b et c.

$i_s, i_r$  : sont les courants statoriques et rotoriques des phases a, b et c.

$\varphi_s, \varphi_r$  : sont les flux de stator et de rotor des phases a, b et c.

La plupart des applications relie les enroulements du stator directement au réseau électrique, qui est censé être stable et donc  $\omega_s$ . Cette fréquence est parfois appelée fréquence synchrone. Le  $\omega_r$ , quant à lui, dépend évidemment de la vitesse électrique de l'arbre  $\omega_m$ , ce qui se traduit par trois modes de fonctionnement de la machine en fonction de la vitesse[12].

- $\omega_m < \omega_s \Rightarrow \omega_r > 0 \Rightarrow g > 0$  hypo synchrone
- $\omega_m > \omega_s \Rightarrow \omega_r < 0 \Rightarrow g < 0$  hyper synchrone
- $\omega_m = \omega_s \Rightarrow \omega_r = 0 \Rightarrow g = 0$  synchrone

les équations sous forme matricielle pour le stator et le rotor est donnez par :

**Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

**Pour le rotor:**

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Ou de manière plus raccourcie.

$$[v_{abcs}] = [i_{abcs}] [R_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcs}] \quad (\text{II.33})$$

$$[v_{abcr}] = [i_{abcr}] [R_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcr}] \quad (\text{II.34})$$

**Equations des flux :**

Les équations de flux du stator et du rotor sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

**Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sb} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rb} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Ou d'autre manière :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Avec:

- $L_s$  Et  $L_r$  : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
- $M_s$  Et  $M_r$  : sont les inductances mutuelles entre deux phases stator-stator et rotor-rotor.
- $M_{1,2,3}$  : Inductance mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phase rotorique.
- $[L_s]$  Et  $[L_r]$  : Matrices des inductances cycliques statorique et rotorique.
- $[R_s]$  Et  $[R_r]$  : Matrices des résistances propres statorique et rotorique.
- $[M_{sr}]$  Et  $[M_{rs}]$  : Matrices des inductances mutuelles du couplage entre stator et rotor.
- $M_{\max}$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
- $\theta$  : L'écart angulaire entre une phase statorique et une phase rotorique.
- *Equation mécanique :*

L'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_s]^t \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta} [L] \right\} \cdot [i_r] \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$\theta_e = p\theta_m \quad (\text{II.43})$$

Et :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & M_{rs} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

L'équation dynamique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - C_f \quad (\text{II.45})$$

### II.4.3 Modèle de la GADA dans le repère de Park

Le modèle dynamique (d-q) de GADA serait extrêmement utile pour étudier le comportement dans les modes de fonctionnement sous-synchrones et sur-synchrones, ainsi que pour appliquer la stratégie de

contrôle vectoriel afin de contrôler la puissance active et réactive de sortie. Ce modèle est utilisé pour mettre en œuvre le contrôle vectoriel afin de contrôler la puissance active de sortie de la GADA [13].

❖ *Transformation de Park.*

Les transformations sont employées dans le cadre fixe pour convertir les quantités triphasées en quantités biphasées. La figure (II.9) représente la quantité dans un autre cadre de référence en projetant le vecteur sur les deux axes orthogonaux du nouveau cadre de référence, l'axe d de l'excitation étant aligné sur le flux du stator.

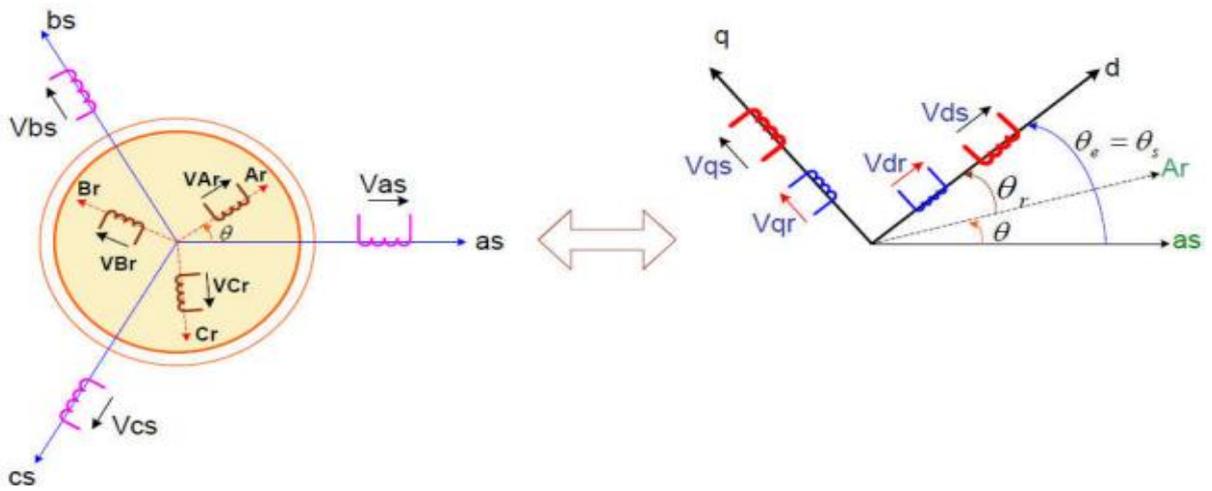


Figure (II.10) Modèle de GADA dans le Reppert de PARK.

La machine asynchrone étant une machine étroitement couplée, sa représentation dans le système triphasé est extrêmement compliquée. Pour améliorer le comportement d'une machine asynchrone, il faut utiliser un modèle précis et suffisamment simple. Par conséquent, le modèle d-q à deux axes de la transformation de Park est appliqué. Le nouveau modèle est créé en multipliant les équations de flux et de tension par la matrice de Park, qui est désignée par [14] :

$$[I_{dgo}] = [p(\theta)][I_{abc}] \tag{II.46}$$

Et

$$[I_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} = [I_{dgo}] \tag{II.47}$$

Celle des tensions :

$$[V_{dgo}] = [p(\theta)][V_{abc}] \tag{II.48}$$

Et

$$[V_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} = [V_{dgo}] \tag{II.49}$$

La transformation des flux :

$$[\varphi_{dgo}] = [P(\theta)][\varphi_{abc}] \quad (\text{II.50})$$

Et

$$[\varphi_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} = [\varphi_{dgo}] \quad (\text{II.51})$$

Avec la matrice de transformation de Park qui s'écrit par

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

En appliquant la transformée de Park (d, q) pour chaque vecteur parmi les vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques.

En supposant que le système est équilibré et que la composante homopolaire est donc nulle, les équations dynamiques d'une GADA triphasée peuvent être exprimées en rotation synchrone dans un cadre de référence en quadrature directe (d-q) comme suit [15] [16] :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

Où :

- $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$  sont respectivement les tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
- $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$  sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  sont respectivement les flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.

On peut décomposer le flux total qui traverse chaque bobine du stator en flux propre de la même bobine et en flux mutuels provenant des autres bobines.

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée comme suit :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II.55})$$

La puissance active et réactive du stator et du rotor sont écrites comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

Le modèle (d-q) peut également être représenté par des équations d'espace d'état. Le modèle GADA est fourni en réarrangeant les équations (II.52) et (II.53) et en considérant les flux comme des quantités d'état [12]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & -\omega_r & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

En développant cette dernière expression dans les composants d-q, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r & R_r L_m & \omega_m L_s L_r \\ -\omega_m L_m^2 - \omega_s \sigma L_s L_r & -R_s L_r & -\omega_m L_s L_r & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_s L_m & -R_s L_r & -\omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r \\ \omega_m L_s L_m & R_s L_m & \omega_m L_m^2 - \omega_s \sigma L_s L_r & -R_s L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Avec  $\sigma$  : Coefficient de dispersion  $\sigma = 1 - M^2 / L_s L_r$ .

**II.5 Définition de l'onduleur.**

Un convertisseur statique qui transfère l'énergie électrique du courant continu (DC) au courant alternatif (AC) est connu sous le nom d'onduleur. En réalité, cette conversion d'énergie est réalisée par l'utilisation d'un dispositif de contrôle (semi-conducteurs). Il permet aux bornes du récepteur de recevoir une tension alternative dont la fréquence et la valeur efficace peuvent être ajustées à l'aide d'une séquence de commande appropriée. L'onduleur est représenté schématiquement à la figure (II.11) :[17]

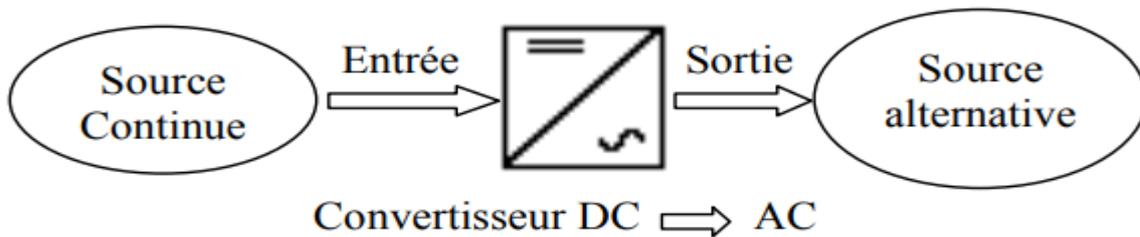


Figure (II.11) : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

**II.5.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux.**

Pour construire l'onduleur de tension, figure (II.12), nous considérons que son alimentation est une source parfaite (bus CC), composée de deux générateurs de  $f, \epsilon, m$  égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$  [18]

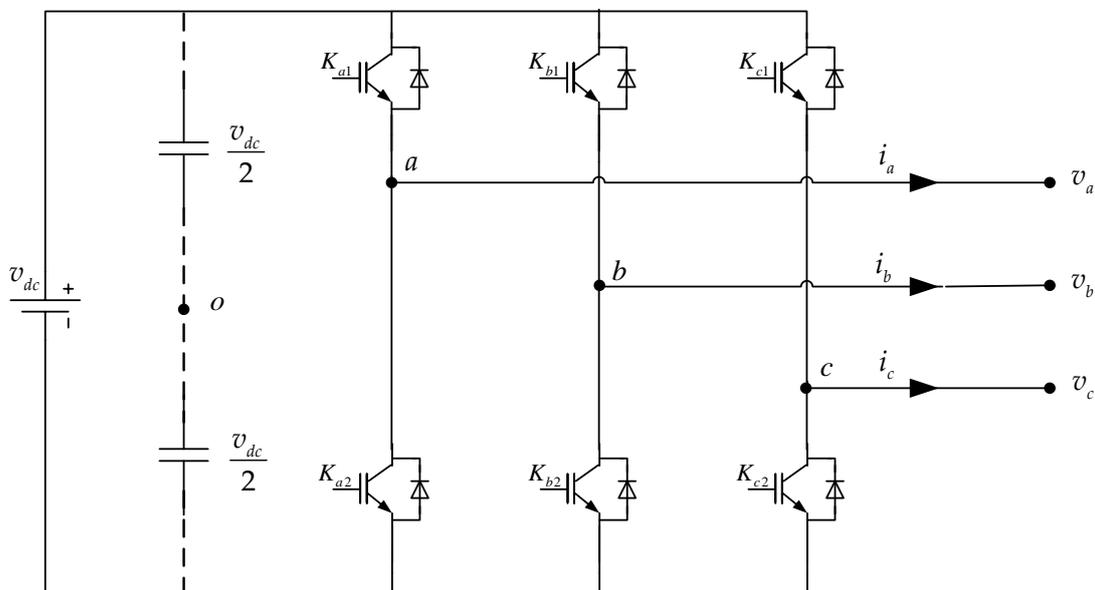


Figure (II.12) Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T'_i$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

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

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

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

Donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \frac{1}{3}[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = \frac{1}{3}[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

On peut les écrire en utilisant les tensions de sortie de l'onduleur, en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{II.63})$$

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

$$V_{in_0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (\text{II.64})$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.65})$$

En remplaçant l'équation (II.62) dans l'équation (II.65), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{2}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = \frac{1}{2}V_{an_0} + \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = \frac{1}{2}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{1}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

En remplaçant l'équation (II.62) dans l'équation (II.64), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.67})$$

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

### II.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

L'objectif fondamental de la commande MLI est de comparer chacune des trois tensions de référence sinusoïdales que nous souhaitons imposer à un signal triangulaire à haute fréquence que nous appellerons porteuse en temps réel. [19]

Les impulsions des commandes ( $S_a, S_b, S_c$ ) de l'onduleur sont les intersections des ondes modulantes (de référence) et de l'onde triangulaire (porteuse). L'état des interrupteurs du circuit de puissance (ouverture et fermeture) est déterminé par une comparaison des ondes de référence et de l'onde triangulaire (figure (II.14)) [20] [21].

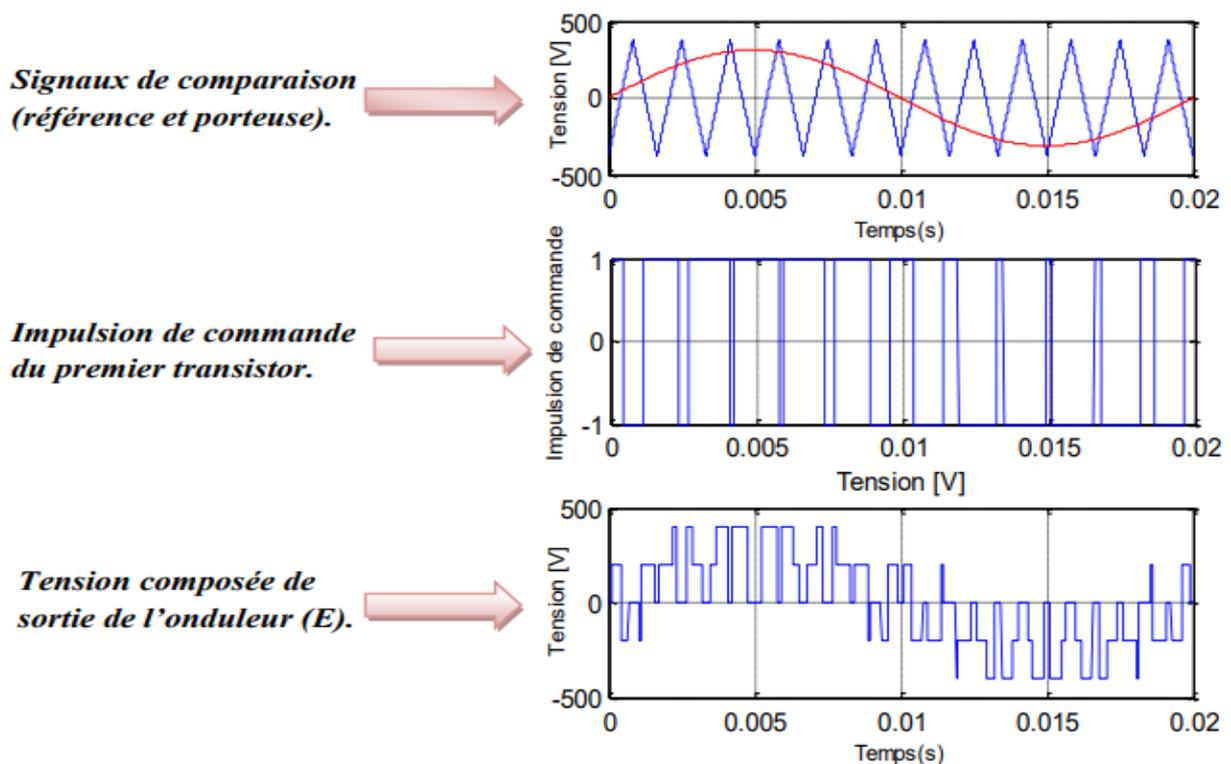


Figure (II.13) Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.

### II.6 Résultats de simulations

Nous avons utilisé le programme MATLAB Simulink pour modéliser tous les éléments du système, y compris la machine, l'onduleur, la commande MLI, les régulateurs et les nombreux composants nécessaires à la commande, afin de simuler le GADA en mode de production.

Les résultats de la simulation présentés dans les figures ci-dessous concernent le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation et générateur fonctionnant en mode "GADA".

Un modèle du système total est construit à l'aide de Matlab/Simulink pour exécuter la simulation afin d'évaluer la technique MPPT pour extraire la puissance maximale fournie par le générateur. Nous avons suggéré des étapes de vitesse du vent, qui sont représentées dans la figure II.14, avec la vitesse du vent commençant à 4 m/s et augmentant brusquement à 5 m/s au temps 2 s. La vitesse du vent est égale à 9 m/s au temps 4s. Enfin, la vitesse chute à 6 m/s.

La figure II.15 montre que la vitesse de rotation de l'éolienne et La figure II.16 illustre la fluctuation du coefficient de puissance  $C_p$  avec le  $C_p$  optimal et représente la variation du  $\lambda$  avec le  $\lambda$  optimal pour le temps. Est comparable à la vitesse du vent. Le coefficient de puissance est de 0,48, ce qui est proche du coefficient de puissance maximal.

Les courants du stator et du rotor augmentent avec la vitesse du vent, comme le montrent les figures II.17 et II.18. Lorsque la vitesse du vent augmente, les courants du stator et du rotor diminuent. De plus, ces courants ont des formes sinusoïdales, mais avec des fluctuations significatives dans le cas des courants statoriques, ce qui suggère la présence d'une grande quantité de courants statoriques générés par la GADA et fournis au réseau.

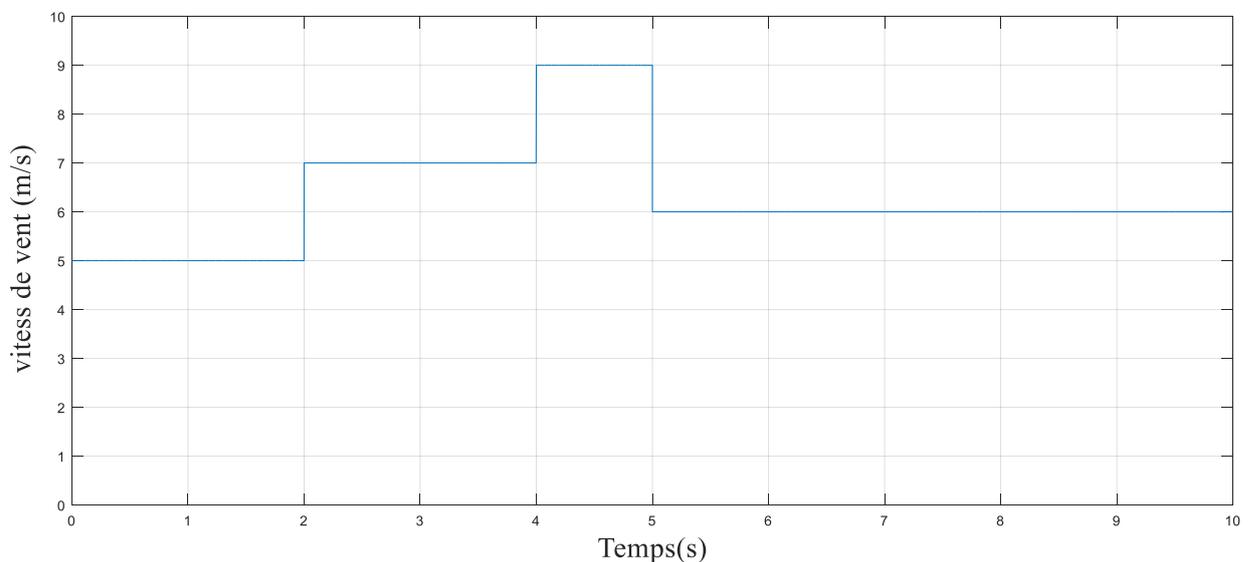


Figure (II.14) Profil du vent appliqué

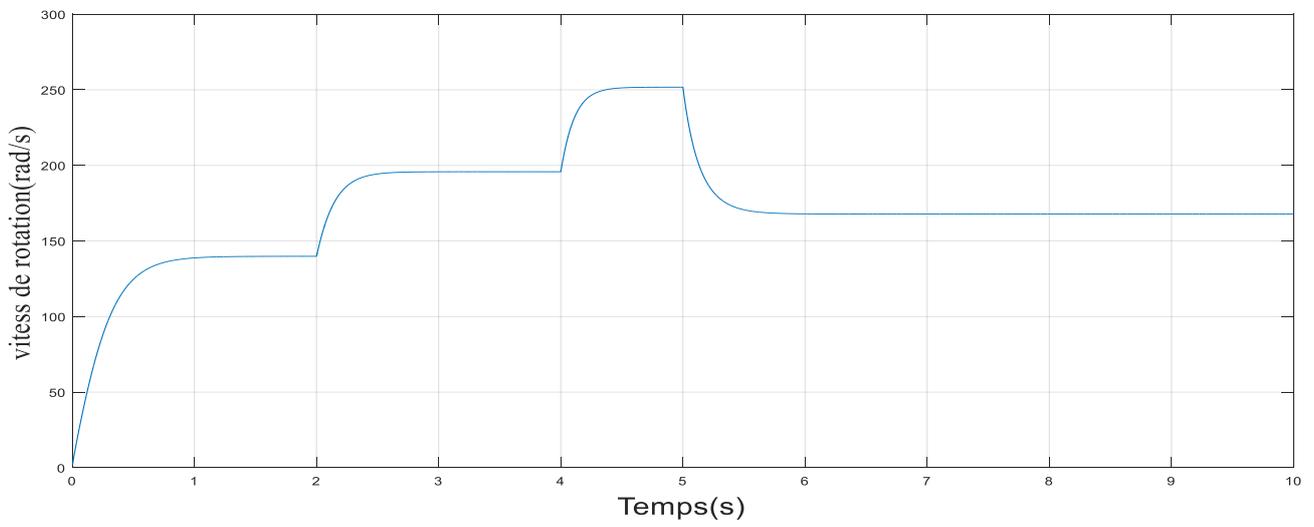


Figure (II.15) Vitesse de la turbine selon le MPPT

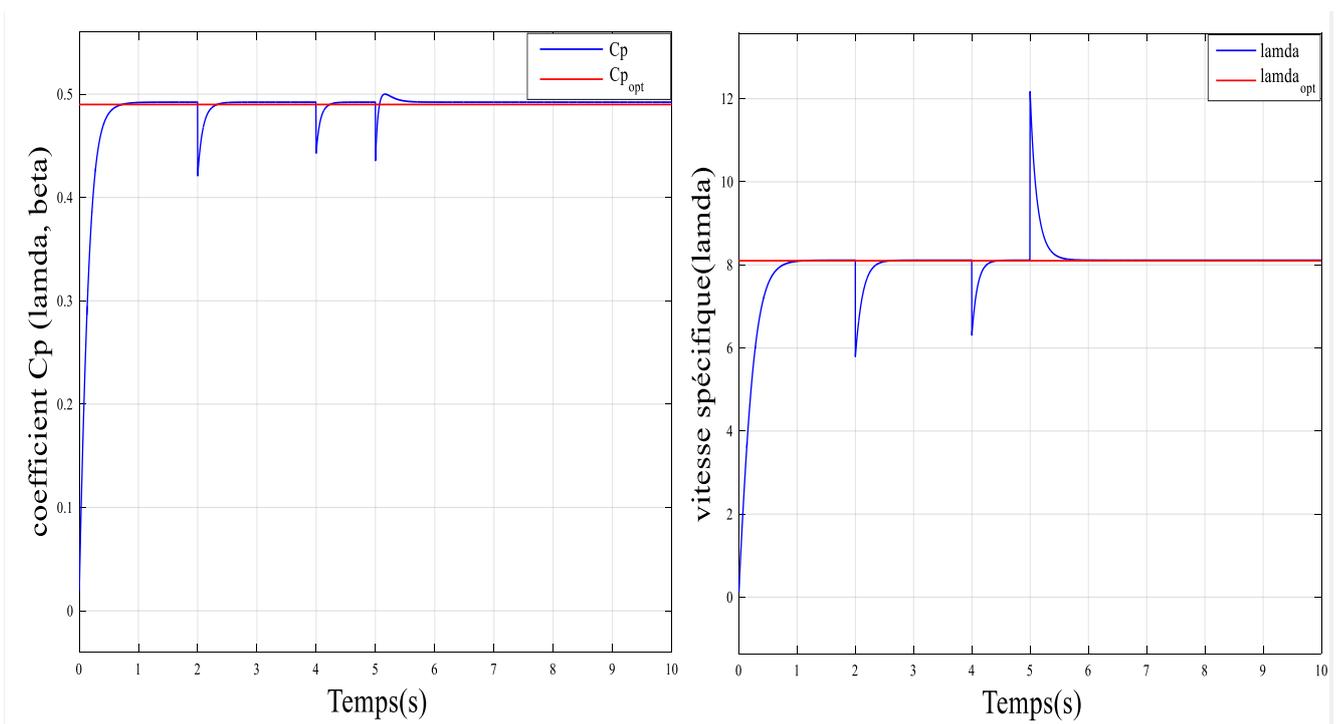


Figure (II.16) Variation du coefficient de puissance  $C_p$  et vitesse spécifique  $\lambda$

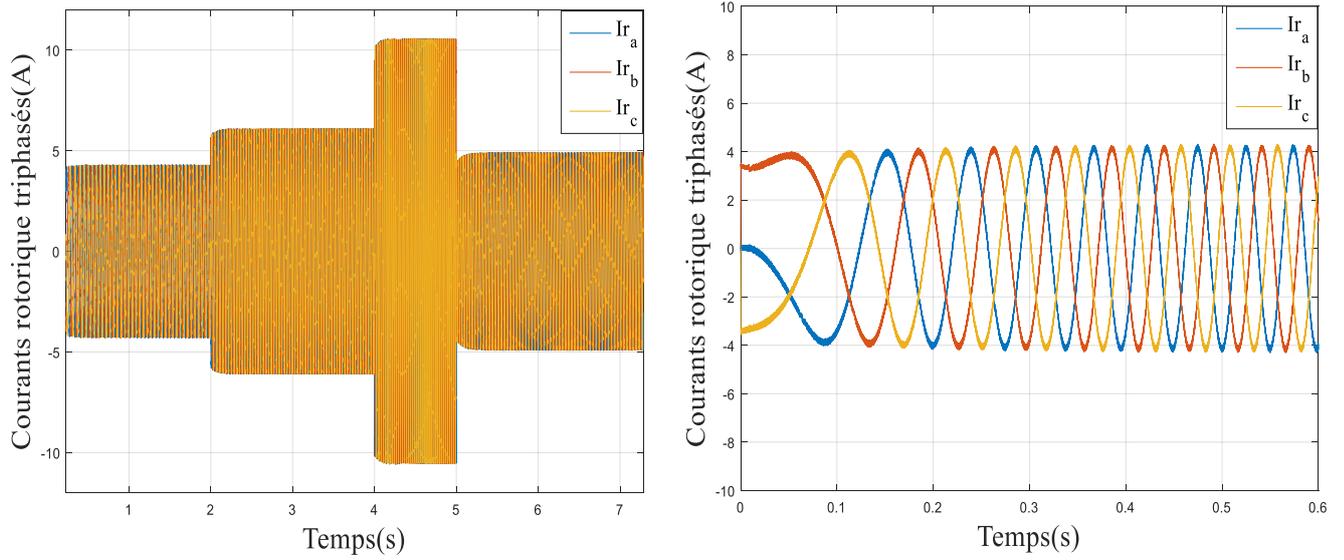


Figure (II.17) Courants rotoriques avec un zoom

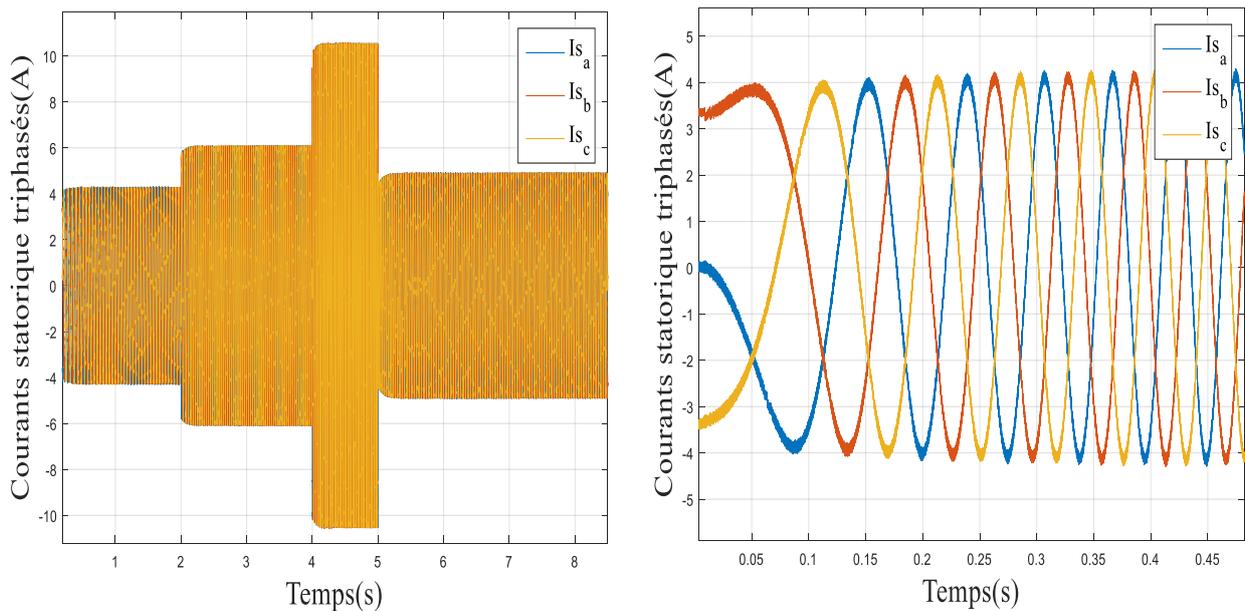


Figure (II.18) Courants statoriques avec un zoom

❖ **Profil du Vent Aléatoire**

Dans cette partie, Nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse de vent. Les résultats de simulation que nous allons présenter ont été faits pour un système éolien basé sur une MADA.

La figure II.19 représente le profil de vent et la figure (II.20) représente la vitesse de rotation de la turbine, on constate que le profil est similaire à la vitesse du vent. Le coefficient de puissance est de 0,48, ce qui est proche du coefficient de puissance maximum comme la montre la figure II.21.

En termes de puissance active, elle pourrait suivre le profil de vitesse du vent représenté sur le figure II.24 Comme indiqué dans le figure II.25, nous avons supposé que la puissance réactive égale à zéro.

En outre, l'augmentation de la vitesse du vent entraîne une augmentation des courants du stator et du rotor (figures II.26 et II.27).

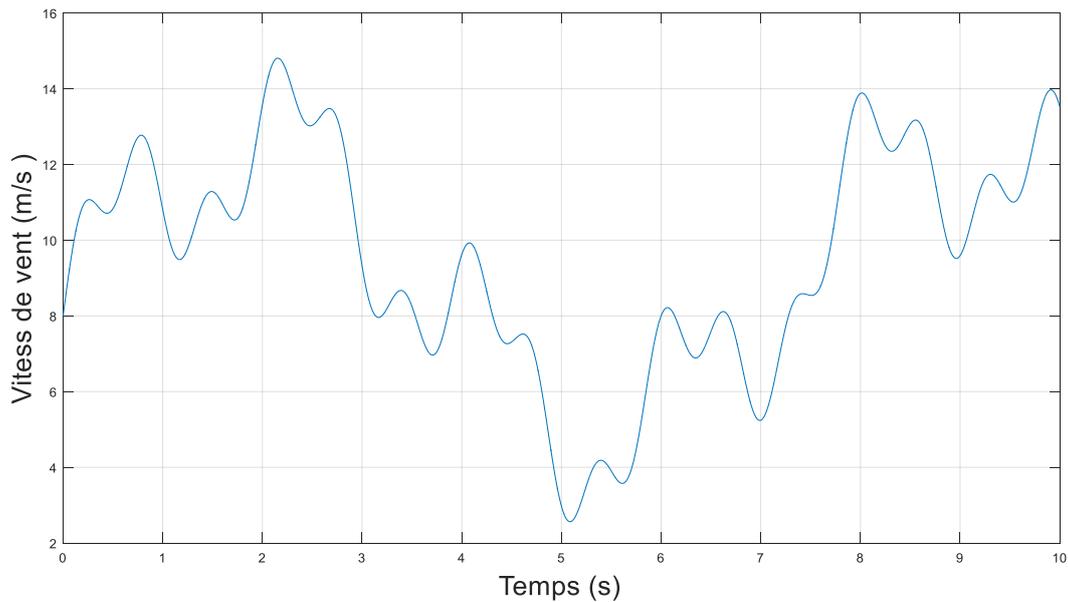


Figure (II.19) Profil du vent appliqué

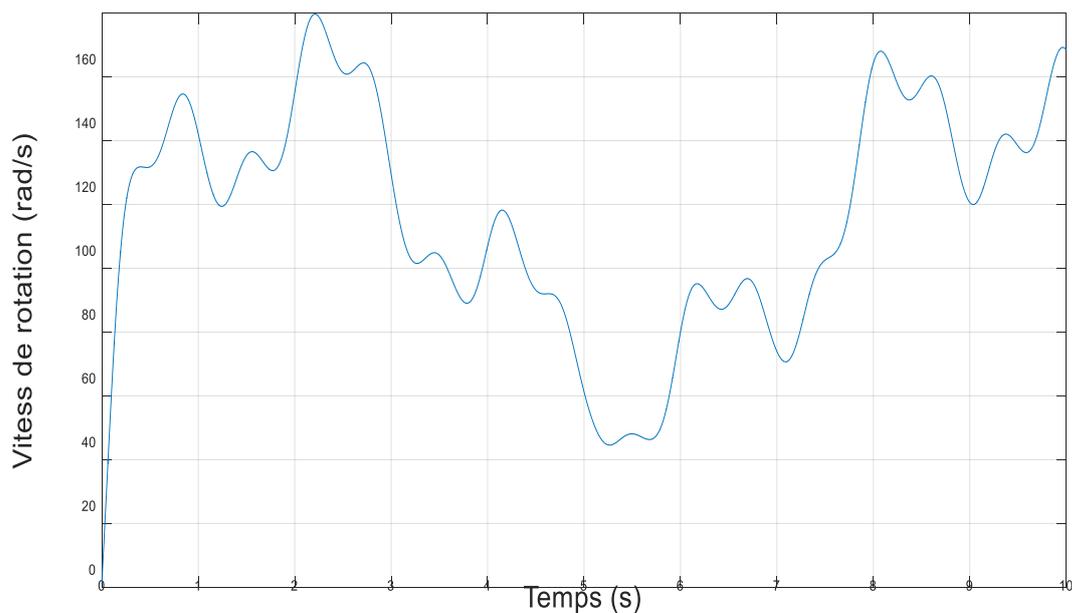


Figure (II.20) Vitesse de la turbine selon le MPPT

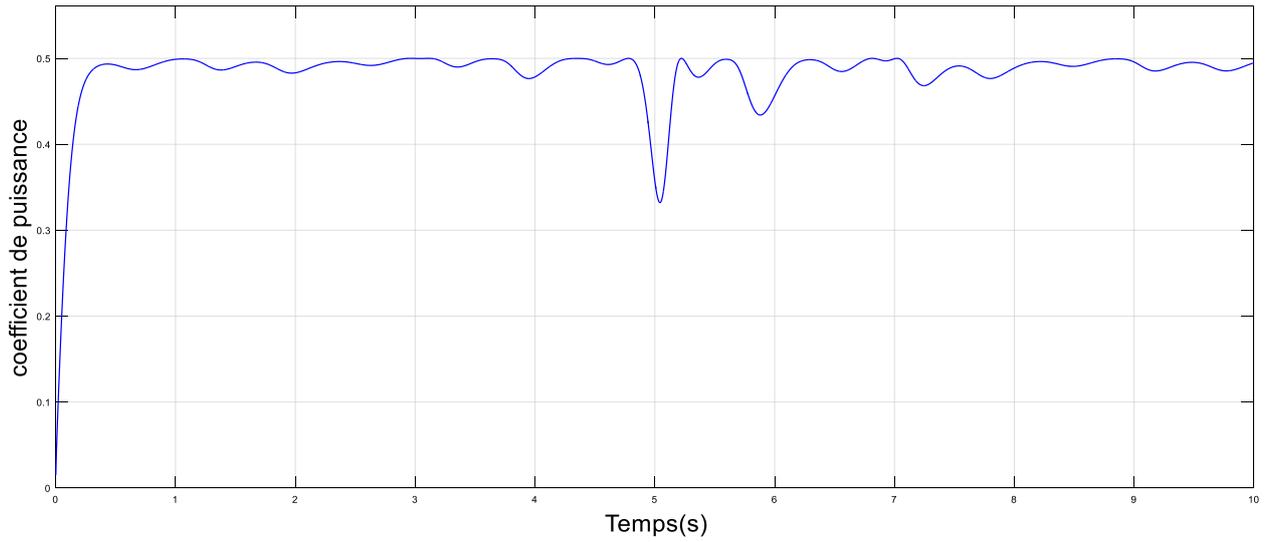


Figure (II.21) Variation du coefficient de puissance  $C_p$

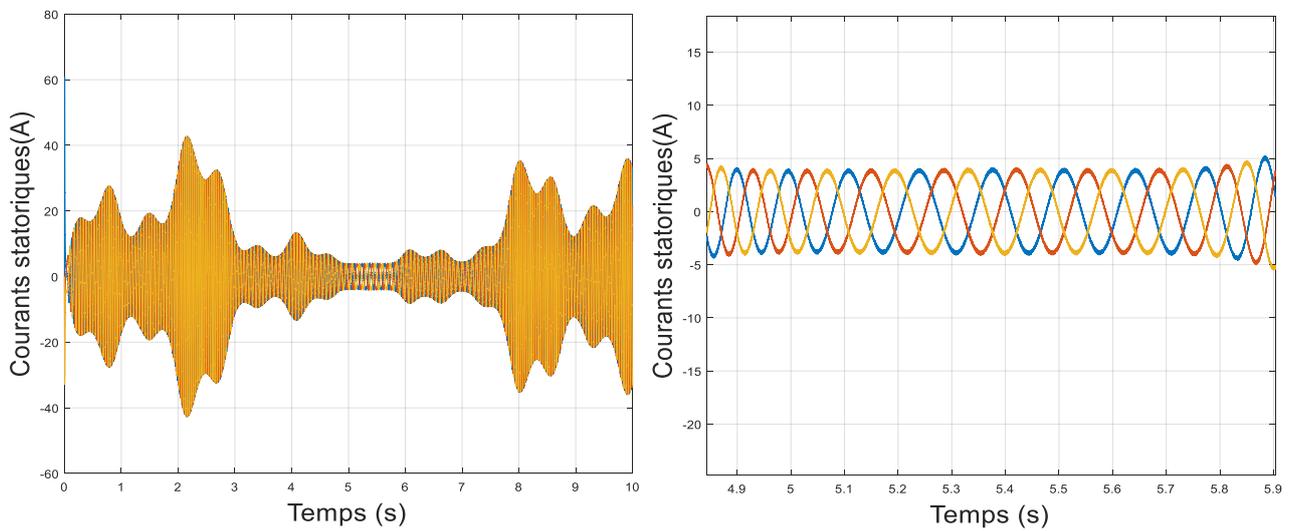


Figure (II.22) Courants statoriques avec un zoom

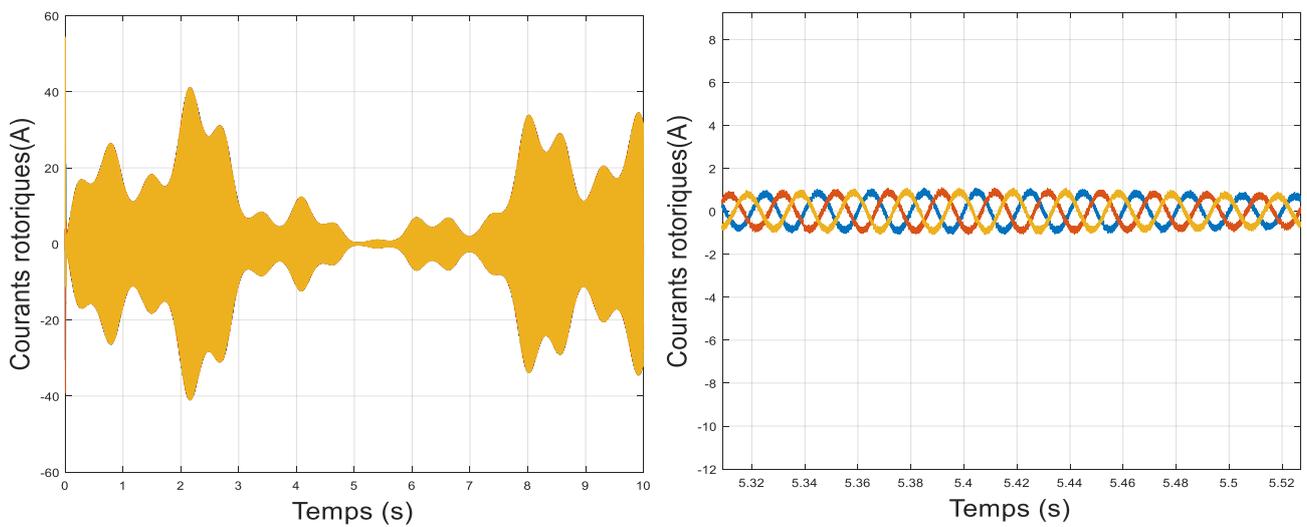


Figure (II.23) Courants rotoriques avec un zoom

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique les courants statoriques prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence constante égale (50Hz) pour les courants statoriques du MADA et une fréquence variable pour les courants rotoriques (figure II.22, II.23).

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le canal de transmission en général, puis nous avons modélisé la vitesse du vent. Ensuite, nous avons modélisé le générateur éolien étape par étape. Nous avons ensuite présenté une méthode de suivi du point de puissance maximale pour le système de turbine éolienne proposé. Ensuite, nous avons abordé la modélisation du générateur GADA, suivie de la transformation de PARK et de la discussion sur les commutations à deux niveaux. Enfin, nous avons procédé à la simulation de toutes les modélisations réalisées et analysé les formes d'onde présentées à la fin.

# Chapitre III

## **Commande de Puissances Active et Réactive d'un Système Eolien à Vitesse Variable Basé Sur une MADA**

### III.1 Introduction

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions statoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques.

Pour garantir une haute qualité de l'énergie électrique produite par un système éolien basé sur une génératrice à double alimentation, il est nécessaire d'appliquer des techniques de contrôle appropriées qui permettent de réguler les puissances générées par le stator de la machine. Plus précisément, la puissance active doit être réglée sur la puissance de référence générée par la turbine afin d'assurer une efficacité optimale du système éolien, tandis que la puissance réactive doit être maintenue à zéro pour conserver un facteur de puissance unitaire du côté stator. Sur cette base, nous proposons deux types de contrôle :

- Contrôle vectoriel basé sur des régulateurs PI
- Contrôle en backstepping avec des gains.

### III.2 Commande vectorielle des puissances active et réactive

La commande vectorielle des machines à double alimentation sans balais est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable des systèmes de génération de l'énergie électrique. Cette commande est l'une des méthodes utilisées pour optimiser la qualité d'énergie produite et injectée au réseau.

Dans cette technique, nous proposons un algorithme de contrôle basé sur l'orientation du flux statorique de la machine, qui met en évidence les relations entre les niveaux de puissance du stator et les tensions du rotor générées par l'onduleur. Ces relations permettent de contrôler les signaux de tension du rotor afin de réguler de manière indépendante l'échange des puissances active et réactive générées dans le stator de la machine.

Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée; à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique  $I_{rq}$ , et la puissance réactive dépend uniquement du courant  $I_{rd}$  (figure III.1) [1], [ 2.], [ 3.].

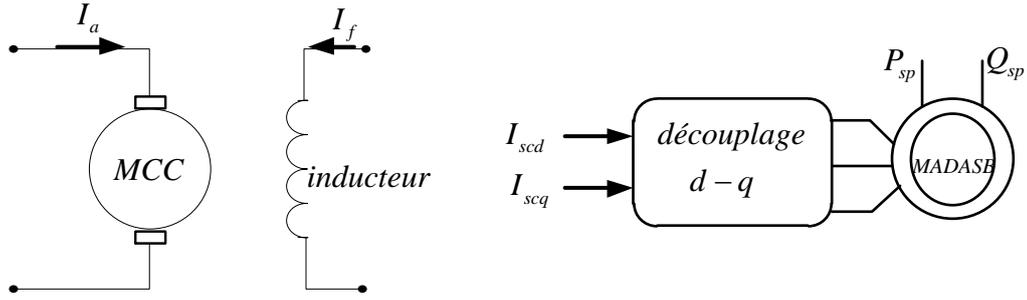


Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle

### III.2.1 Modele de la MADA à flux statorique oriente

Dans cette commande, la machine est conçue de telle façon à ce que le flux statorique dans le repère de Park suivant l'axe  $q$  soit nul. Ce choix est justifié par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau de tension et de fréquence constante [4.], [5], [6.], [7], [8.].

Rappelons le système d'équations différentielles (II.53) décrivant la machine asynchrone dans un référentiel fixe se déplaçant avec le champ, qui peut être exprimé par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sa} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{ra} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

avec :

un flux statorique direct constant  $\varphi_{sd} = \varphi_s$ .

et un flux statorique en quadrature orienté  $\varphi_{sq} = 0$ .

Ces équations peuvent être simplifiées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sa} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{ra} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

Si nous négligeons la résistance  $R_s$ , qui est une hypothèse couramment acceptée pour les machines de grande puissance utilisées dans la production d'énergie éolienne, l'expression de la tension de la machine se réduit à la forme suivante [6], [7], [9]

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sa} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{ra} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L I_{rd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

### III.2.2 Relations entre les courants statoriques et rotoriques

En se basant sur les équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique (équation (III.4)), les équations reliant les courants statoriques aux courants rotoriques seront les suivantes :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut être simplifié comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{rq} \\ Q_s = V_s I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadrature par leurs expressions dans les équations de la puissance active et réactive, on obtient ce qui suit :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Il ressort de l'expression (III.7) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique de l'axe  $q$ , et la puissance réactive sera proportionnelle au courant rotorique de l'axe  $d$  avec une valeur appropriée  $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$  imposée par le réseau.

### III.2.3 Relations entre les tensions et courants rotoriques

En se basant sur le système d'équations (III.5), les expressions des flux rotoriques peuvent être formulées comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{sd} + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.9)$$

Dans le cas de régime permanent, les dérivées des courants rotoriques biphasés se réduisent à zéro, ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[ R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rd} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[ R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rq} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

avec :

- $(\frac{V_s^M}{L_s})$ : le terme de couplage entre les deux axes;
- $g. (\frac{M^2}{L_s})$ : représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

### III.2.4 Etablissement des angles nécessaires aux transformations

Pour déterminer l'angle de transformation de Park des grandeurs statoriques, on peut utiliser une méthode simple qui consiste à appliquer la matrice de Concordia aux tensions statoriques. Cela permet d'extraire la phase  $\theta_s$  formée par le vecteur de tension avec l'axe de la première phase du stator.

Pour aligner le flux statorique avec l'axe  $d$ , on soustrait  $\frac{\pi}{2}$  de cet angle. Cette méthode est fiable lorsque les tensions statoriques ont des fréquences constantes avec peu de fluctuations, ce qui permet d'effectuer des mesures précises.

Le rotor forme un angle  $\theta_m$  avec la phase  $A$  du stator, l'angle  $\theta_r$  nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques sera donc :  $\theta_r = \theta_{sn} - \theta_m$  [10]

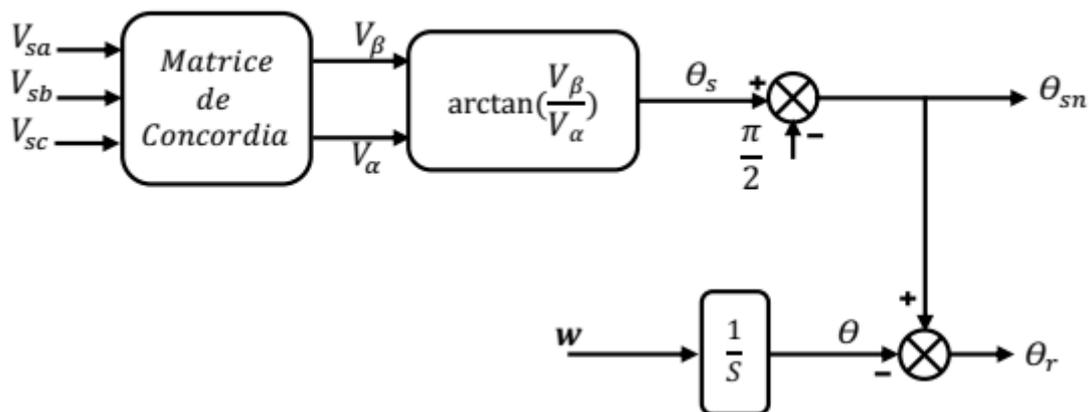


Figure III-2 : Calcul des angles de transformations

### III.3 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive

Pour réaliser une commande vectorielle de ce générateur, il est nécessaire de choisir un référentiel lié au champ tournant, avec une fréquence de référence fixée à 50 Hz. En conséquence, le repère de Park est synchronisé avec le flux statorique, où l'axe  $d$  est aligné avec le vecteur de flux statorique. Cela est illustré dans la Figure (III.3).

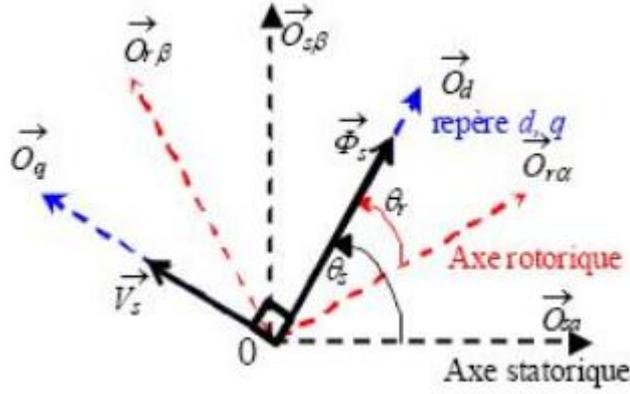


Figure (III.3) Orientation du repère de Park

Basant sur l'hypothèse de négliger la résistance statorique  $R_s$  et que le flux statorique est constant et

$$\varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (\text{III.12})$$

$$\varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \quad (\text{III.13})$$

$$V_{sd} = 0 \quad (\text{III.14})$$

$$V_{sq} = V_s \approx \omega_s \varphi_s \quad (\text{III.15})$$

orienté selon l'axe  $\mathbf{d}$ , on peut en déduire que.

La puissance active et réactive du rotor peuvent être exprimées en utilisant les courants du rotor comme suit :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \quad (\text{III.16})$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \quad (\text{III.17})$$

Si l'on suppose que l'inductance mutuelle  $M$  est constante, il est clair à partir de l'équation III.16 que la puissance active statorique  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$ .

De plus, la puissance réactive statorique  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{rd}$ , avec une

constante d'environ  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  [13.],

La disposition des équations donne les expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques [14].

À partir des équations que nous avons établies, il est possible de créer des relations entre la tension appliquée au rotor de la machine et les puissances statoriques qui en découlent. Par conséquent, il est

possible de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera régulé ultérieurement. Le schéma bloc représentant le modèle mathématique simplifié de la machine asynchrone à double alimentation est illustré dans la Figure III-4

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \quad (III.18)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad \text{:coefficient de dispersion} \quad (III.19)$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad \text{:coefficient de glissement} \quad (III.20)$$

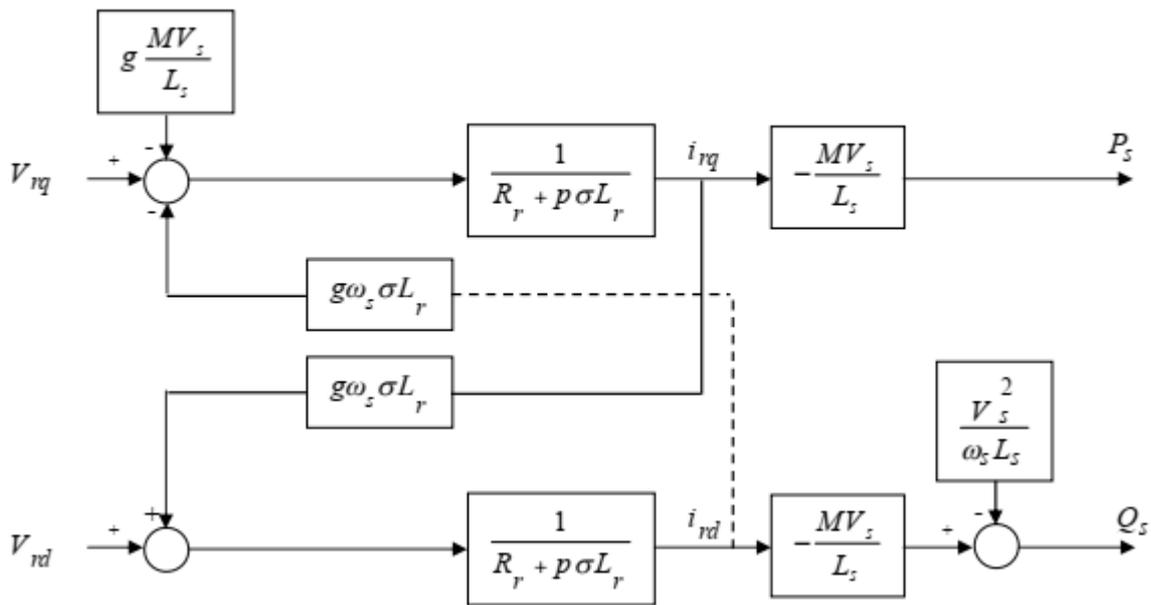


Figure III-4 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

A Ce schéma montre la présence de fonctions de transfert de première classe pour chacun des axes connectés à la tension de rotor et à la puissance statorique. Il indique également la possibilité de créer un contrôle vectoriel en raison de la capacité de contrôler chaque axe de manière indépendante, ainsi que des effets résultant des interactions. Les références de mesure de courant pour le moteur synchrone seront définies pour chaque axe en considérant la puissance active comme référence pour l'axe **q** et les puissances réactives comme référence pour l'axe **d**. La référence de puissance réactive sera maintenue à zéro pour garantir la présence du facteur de puissance résultant de la tension produite par chaque stator pour améliorer la qualité de l'énergie transmise au réseau. La référence de puissance active sera ajustée

pour maintenir le facteur de puissance optimal du générateur. Il convient de noter que les capacités et les tensions sont interconnectées par la fonction de transfert de première classe. De plus, en raison de la faible valeur de glissement, il sera possible de créer un contrôle vectoriel facilement en raison des effets d'interférence faibles, et chaque axe (d et q) pourra être contrôlé séparément avec un contrôle indépendant pour chaque axe. [13].

Il existe deux solutions pour commander la puissance de cette machine, selon [15]:

- La première consiste à ignorer les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant pour chaque axe afin de contrôler les puissances active et réactive de manière indépendante. Cette méthode est 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 utilisant un système à deux boucles pour contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode est appelée méthode indirecte.

D'après la méthode directe est facile à mettre en œuvre, tandis que la méthode indirecte présente l'avantage de contrôler les courants rotoriques, permettant ainsi de protéger la machine en limitant ces courants. Cependant, elle est plus complexe à mettre en œuvre[13],.

Dans la suite, les deux méthodes précédentes seront appliquées au GADA pour examiner l'efficacité de ces commandes sur le générateur.

### **III.4 Commande Directe des Puissances Active et Réactive**

Dans cette méthode, la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA est présentée en utilisant deux régulateurs PI, où la première boucle régule la puissance active  $P_s$  et la seconde boucle régule la puissance réactive  $Q_s$ . Pour réguler la machine, une boucle de régulation est mise en place sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la Figure III-4[16.], [13]. Les termes de couplage entre les deux axes de contrôle sont négligés en raison de la faible valeur du glissement. On obtient ainsi une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, comme présenté dans la Figure III.5 [13]

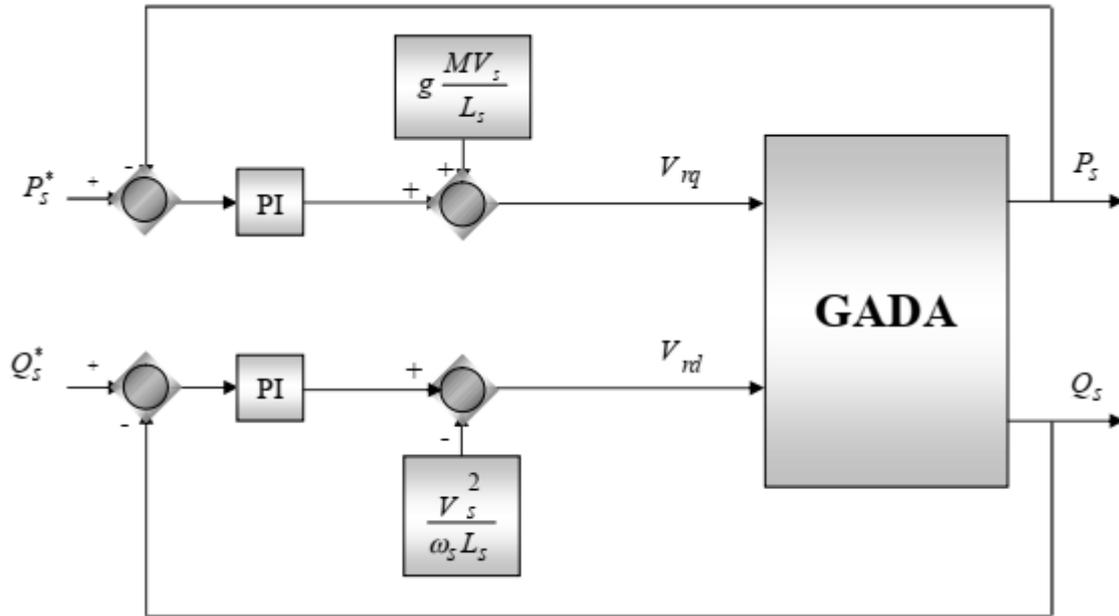


Figure (III.5) Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA

### III.4.1 Dimensionnement du Régulateur PI

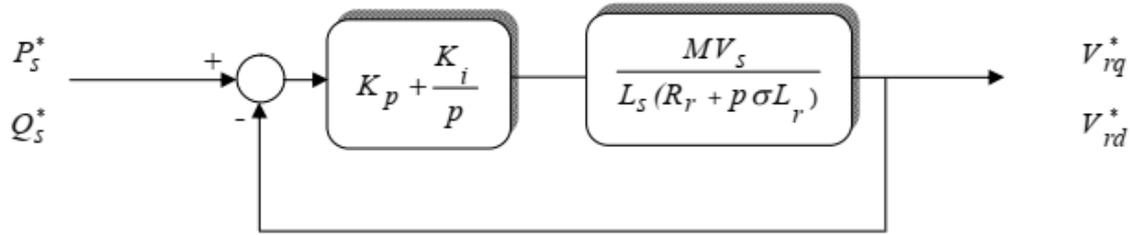
Pour mettre en œuvre une commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur, il est nécessaire d'utiliser des régulateurs proportionnels intégraux (PI), en raison des avantages qu'ils offrent (rapidité, simplicité, autorisant la fréquence du MLI, etc...).

Le rôle des régulateurs sur chaque axe est de réduire la différence entre les valeurs de référence des puissances active et réactive et les valeurs mesurées des puissances active et réactive.

Le dimensionnement des régulateurs PI sera calculé selon la méthode de compensation afin d'obtenir les performances les plus élevées possible).

Afin de garantir le suivi des consignes de puissance active et réactive de la GADA, l'utilisation d'un régulateur PI est indispensable. L'objectif du régulateur PI est d'assurer une meilleure robustesse face aux perturbations internes ou externes.

Les boucles de régulation de la puissance active ( $P_s$ ) et de la puissance réactive ( $Q_s$ ) peuvent être représentées par le schéma bloc illustré dans la Figure (III.6)

Figure (III.6) Schéma de régulation des puissances  $P_s$  et  $Q_s$ 

Il est à noter que les gains des régulateurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q.

Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (III.21)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) correspondant à la Figure III.6 peut être exprimée comme suit :

$$FTBO(p) = \frac{K_i}{p} \left( p \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \frac{MV_s / L_s R_r}{(p\sigma T_r + 1)} \quad (III.22)$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (III.23)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.24)$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i MV_s}{p L_s R_r} \quad (III.25)$$

Afin d'obtenir un comportement similaire à celui d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (III.26)$$

Par conséquent, la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la Figure III-6 sera :

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + p \frac{L_s R_r}{K_i M V_s}} \quad (\text{III.27})$$

Par analogie l'expression (III.27) par l'expression (III.26), on trouve :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} \quad (\text{III.28})$$

De l'expression (III.23) et (III.28), on a :

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_s L_s}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{L_s R_r}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

La constante de temps électrique du système dans notre cas est  $\tau_e = \sigma T_r = 0.0067s$ . Nous avons choisi  $\tau = 0.001$  s pour obtenir une dynamique du processus plus rapide.

Nous avons utilisé la méthode de compensation des pôles ici en raison de sa rapidité, mais il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour le dimensionnement du régulateur PI.

### III.5 Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive

#### III.5.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances

Le courant rotorique  $i_{rq}$  représente l'image de la puissance active statorique  $P_s$ , tandis que le courant rotorique  $i_{rd}$  représente l'image de la puissance réactive statorique  $Q_s$ , et ils doivent tous les deux suivre leurs courants de référence [17].

#### III.5.2 Découplage par Compensation

En examinant l'équation (III.18), on constate que les équations de tension contiennent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q. Nous devons donc introduire un système de découplage en présentant les termes de compensation.

$$\begin{cases} E_{rd} = g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ E_{rq} = -g \frac{M}{L_s} V_s - g \omega_s \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont: Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA et son équivalent sous Matlab/Simulink sont représentés, respectivement, par les Figure III.7 et III.8. La Figure III.7 consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes directe et en

quadrature du courant rotorique à l'aide de régulateurs PI. Les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer au GADA.

$$\begin{cases} V_{rdl} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (III.31)$$

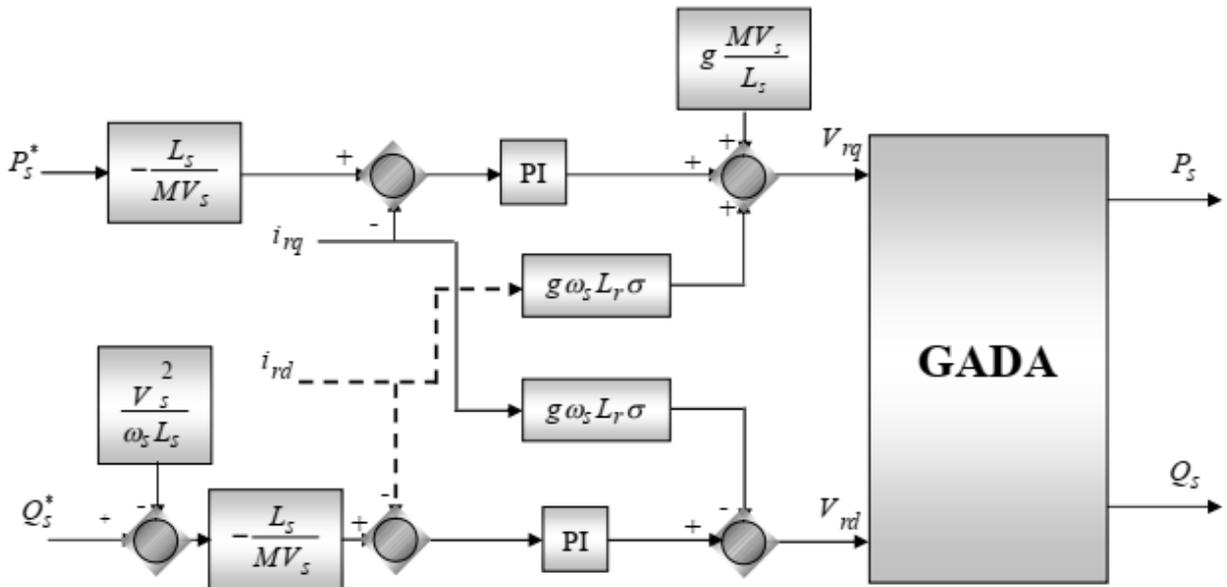


Figure III.7 Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA

### III.5.3 Dimensionnement du Régulateur PI :

Les fonctions de transfert des courants rotoriques direct et quadrature sont dérivées de l'équation (III.18) en annulant les termes de découplage à l'aide des termes de compensation.

$$\frac{I_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \text{ et } \frac{I_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad (III.32)$$

La boucle de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  peut être représentée par le schéma bloc de la Figure (III.8).

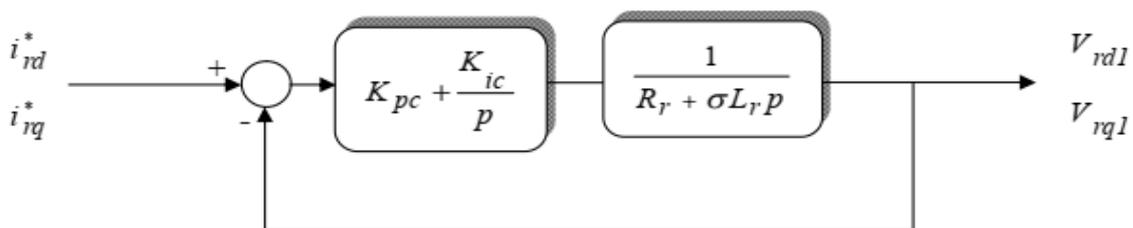


Figure III.8 Schéma de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$

On remarque que les gains des correcteurs PI sont les mêmes pour l'axe d et l'axe q. Considérons un régulateur PI avec la fonction de transfert :

$$PI(p) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p} \quad (III.33)$$

La FTBO de la figure II.49 sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{p} \left( p \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \frac{1}{R_r \left( 1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} p \right)} \quad (III.34)$$

En utilisant la méthode de compensation de pôle, ce qui se traduit par la condition, on obtient :

$$\frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \sigma T_r \quad (III.35)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.36)$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p} \quad (III.37)$$

Donc la FTBF de la figure II.22 sera :

$$FTBO(p) = \frac{\frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}}{1 + \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}} = \frac{1}{\frac{R_r}{K_{ic}} \cdot p + 1} \quad (III.38)$$

Par analogie de l'expression (III.38) par l'expression (III.26), on trouve :

$$\tau = \frac{R_r}{K_{ic}} \quad (III.39)$$

De l'expression (III.35) et (III.39) on a :

$$\begin{cases} K_{pc} = K_{ic} \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} \\ K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \quad (III.40)$$

### III.6 Commande Indirecte avec Boucles des Puissances

Pour améliorer le contrôle précédent, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système [13]. Cela nous conduit au schéma bloc présenté en Figure III.9, qui distingue clairement les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

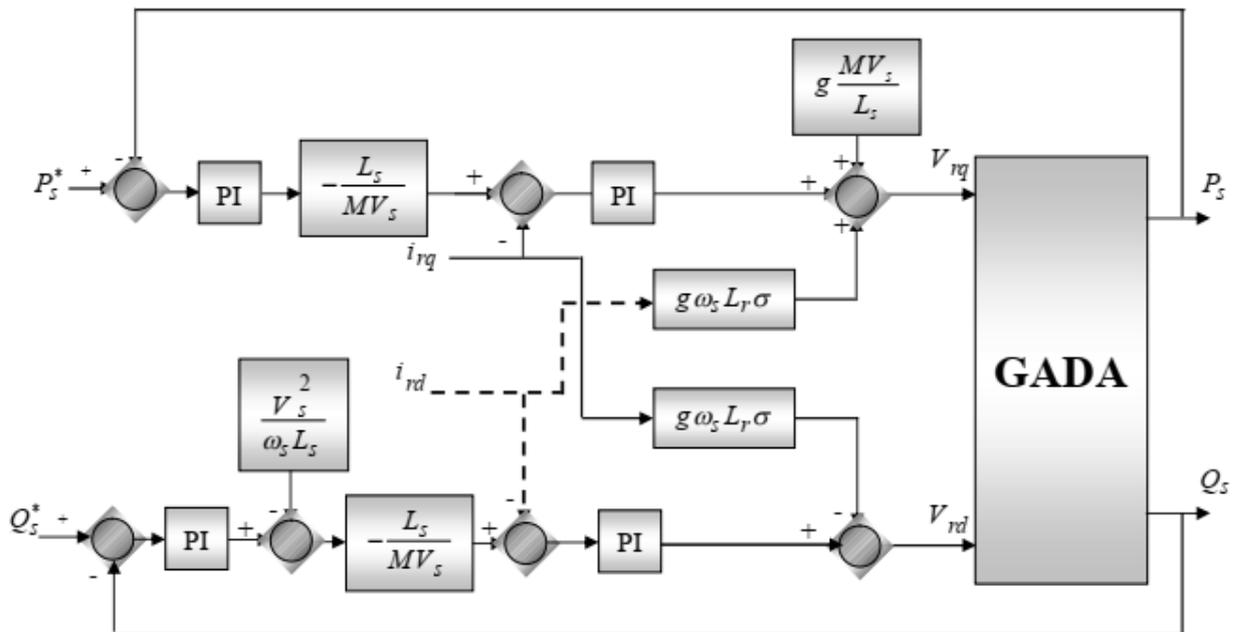


Figure III.9 Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA

### III.7 Résultats de simulations.

Dans notre travail, pour contrôler la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur la MADA, et tester les différents algorithmes pour la commande du reste des éléments de cette chaîne, on a opté pour la commande directe et indirecte avec boucle de puissance comme commande vectorielle et la comparer avec la commande par backstepping.

Le logiciel Matlab/Simulink a été utilisé pour effectuer des simulations. Afin de vérifier que les commandes discutées dans ce chapitre sont valides. Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande active et réactive sur le modèle MADASB obtenu et validé dans le chapitre II.

#### III.7.1 Résultats de simulation du système par la commande vectorielle directe

Le premier test consiste à imposer des paliers de puissance active et réactive alors que la GADA est alimentée par l'éolienne à une vitesse de vent constante vitesse de vent variable. Ce test permet de confirmer le découplage de la puissance de la GADA.

❖ *Fonctionnement à vitesse du vent fixe*

Les figures (III.10) et (III.11), (III.12) et (III.13)(III.14), (III.15),(III.16), (III.17) représentent successivement, les résultats obtenus de la CVD des puissances active et réactive de la GADA, les courants statoriques et rotorique générée par la GADA

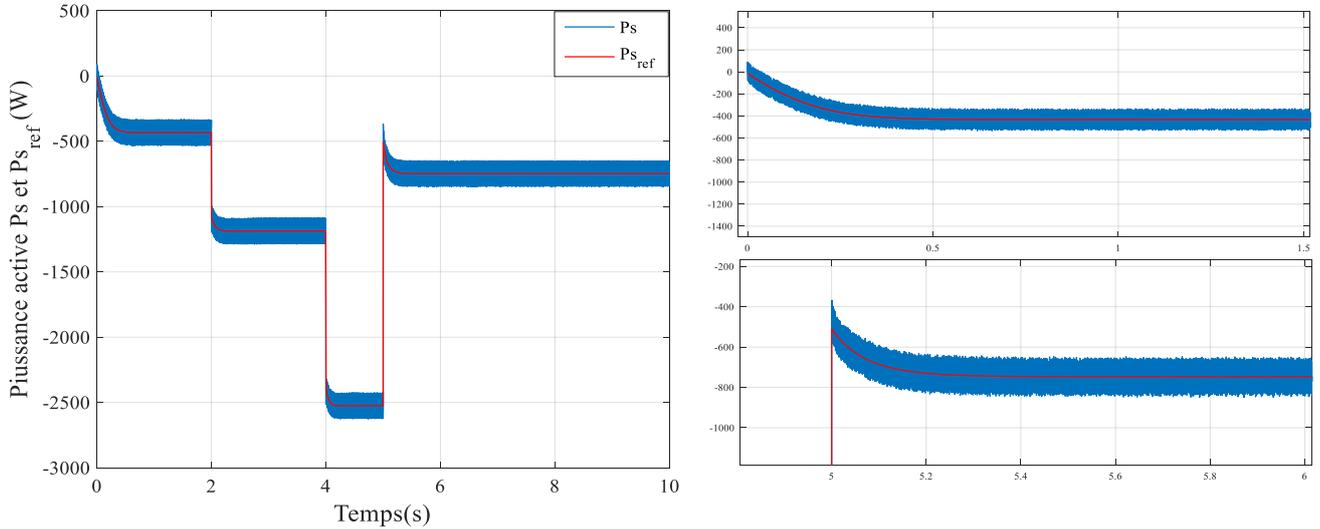


Figure (III.10) Puissance active statorique zoom la commande directe avec zoom

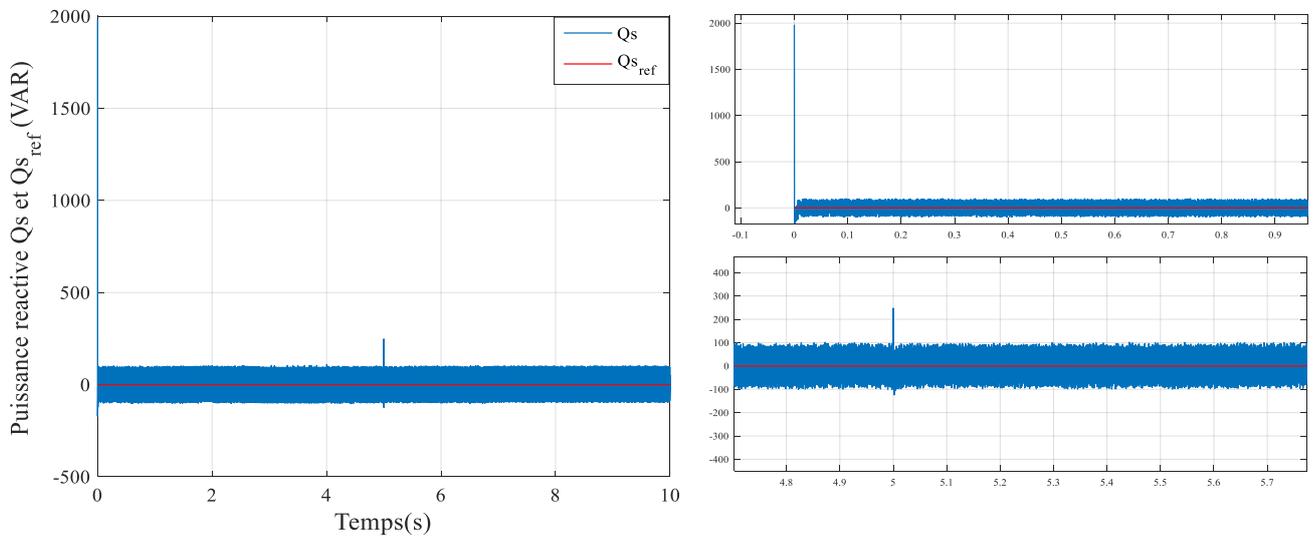


Figure (III.11) Puissance réactive statorique avec zoom la commande directe avec zoom

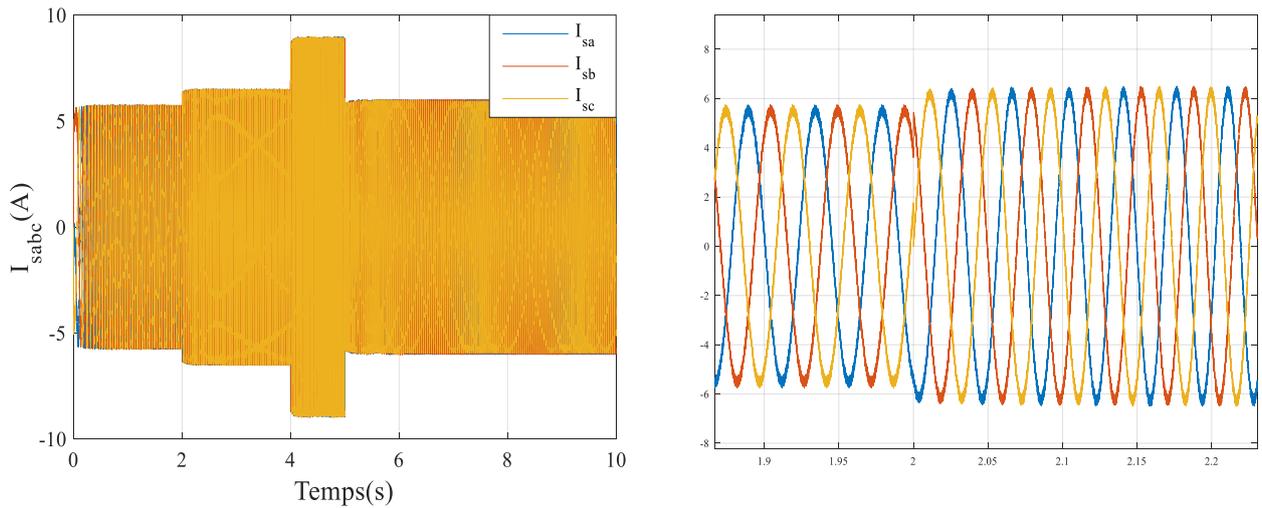


Figure (III.12) Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom

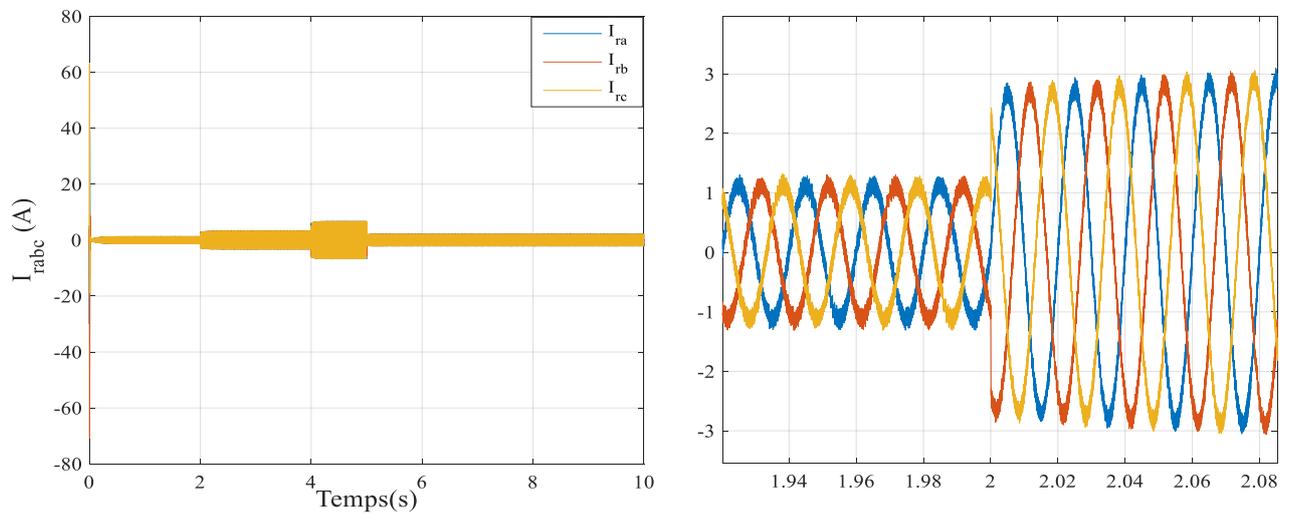


Figure (III.13) Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom

❖ **Fonctionnement à vitesse du vent variable**

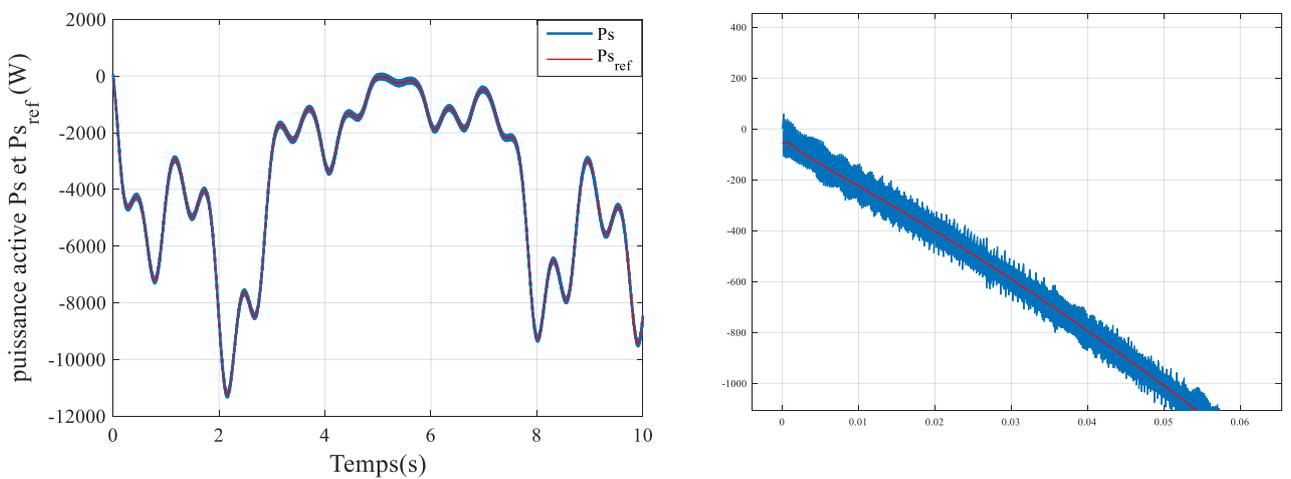


Figure (III.14) Puissance active statorique de la commande directe avec zoom

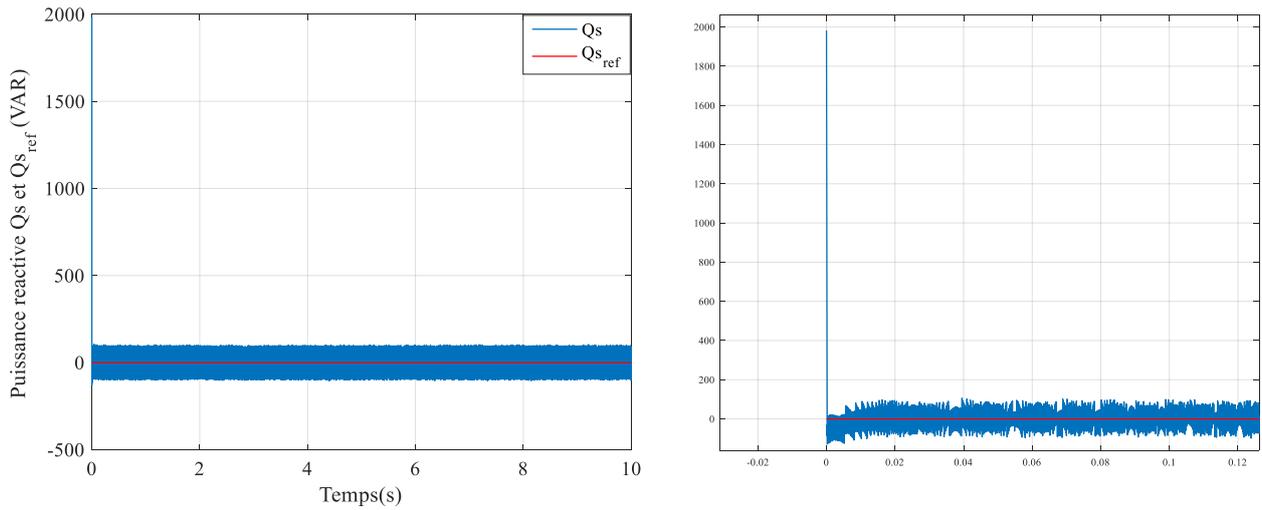


Figure (III.15) Puissance réactive statorique de la commande directe avec zoom

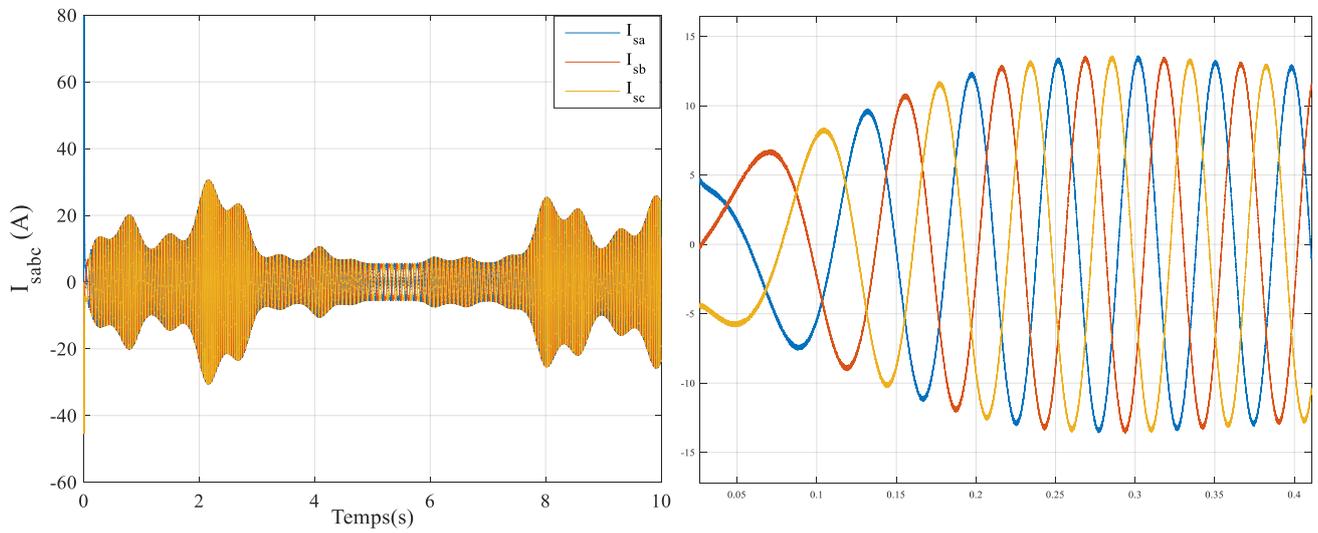


Figure III.16 Courants statoriques de la commande directe avec zoom

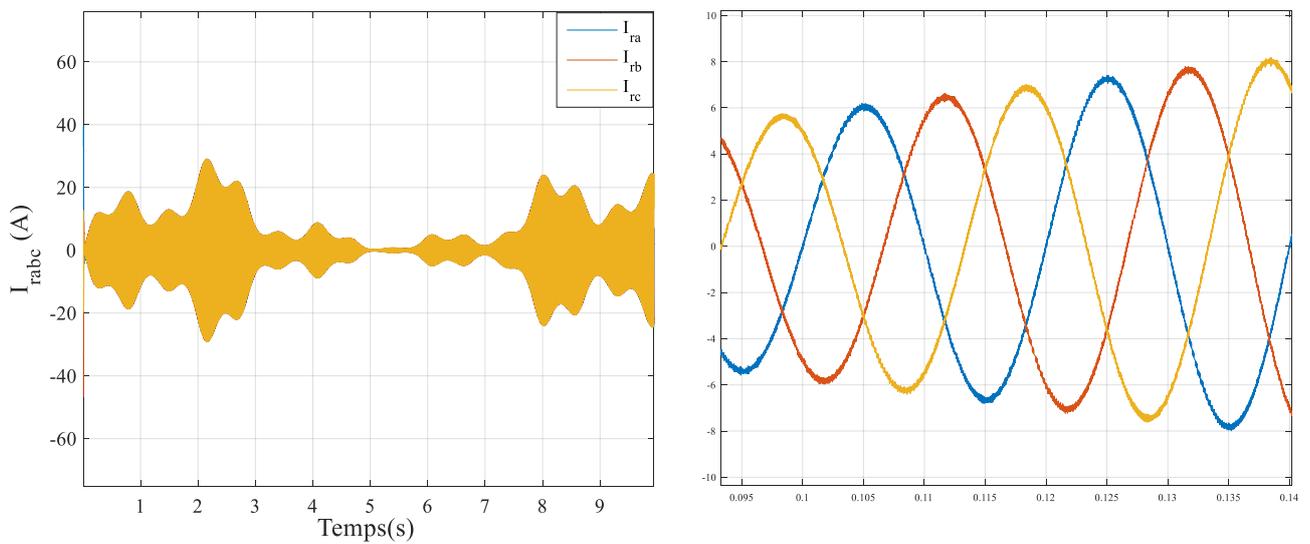


Figure (III.17) Courants rotoriques de la commande directe avec zoom

❖ **Commande indirecte.**

Le premier test consiste à imposer des paliers de puissance active et réactive alors que la GADA est alimentée par une turbine éolienne à une vitesse de vent constante et changeante. Ce test valide le découplage de la puissance de la GADA.

Les figures III.18 et III.19, III.22 et III.23 montrent les résultats du CVI de la puissance active et réactive de la GADA, respectivement. Les figures III.20 et III.21, III.24 et III.25 représente les courants statorique et rotorique de la GADA.

**Profile vitesse fixe**

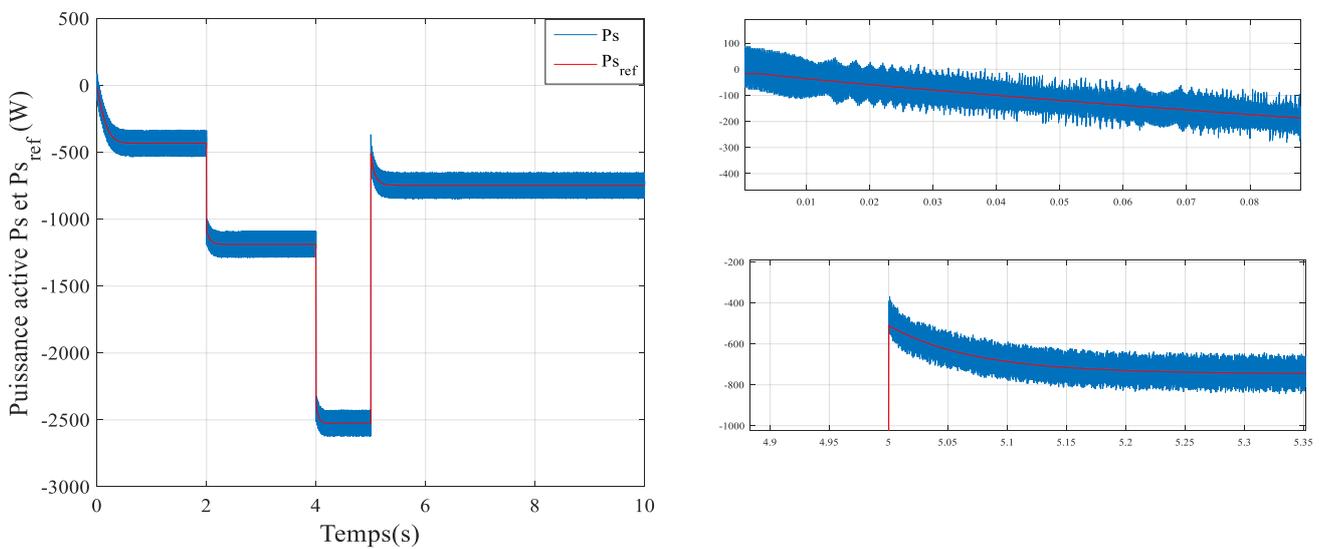


Figure III.18 Puissance active statorique de la commande indirecte avec zoom

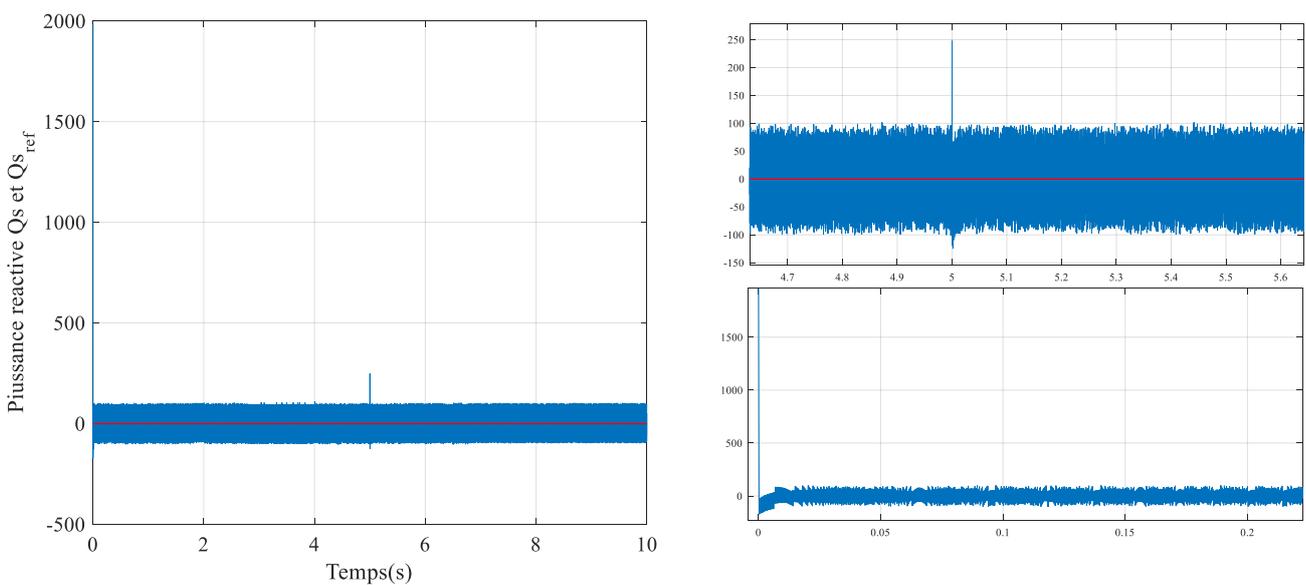


Figure III.19 Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec zoom

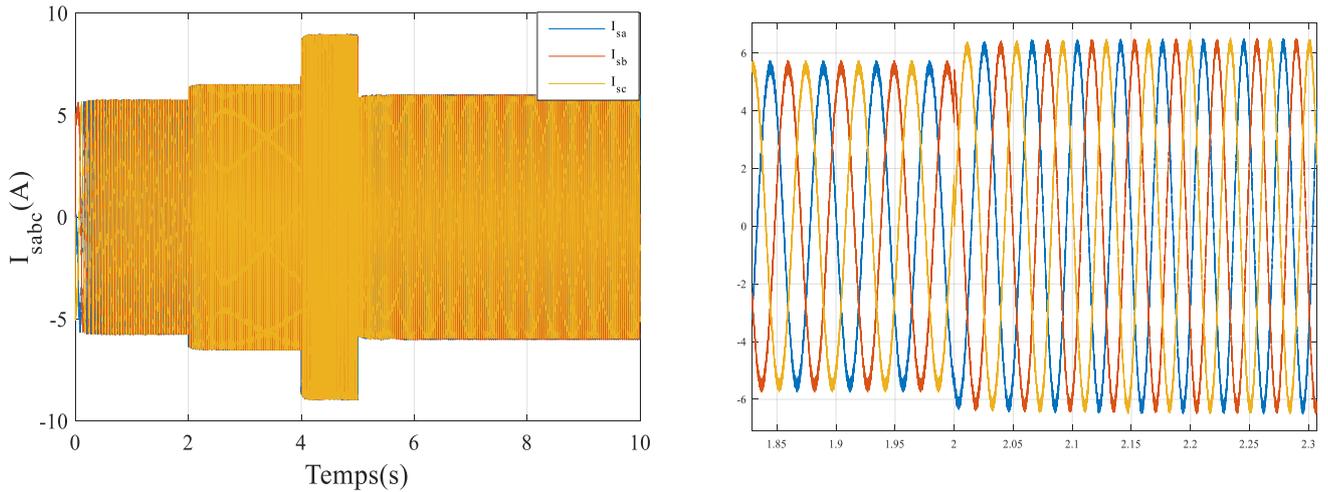


Figure III.20 Courants statoriques de la commande indirecte avec zoom

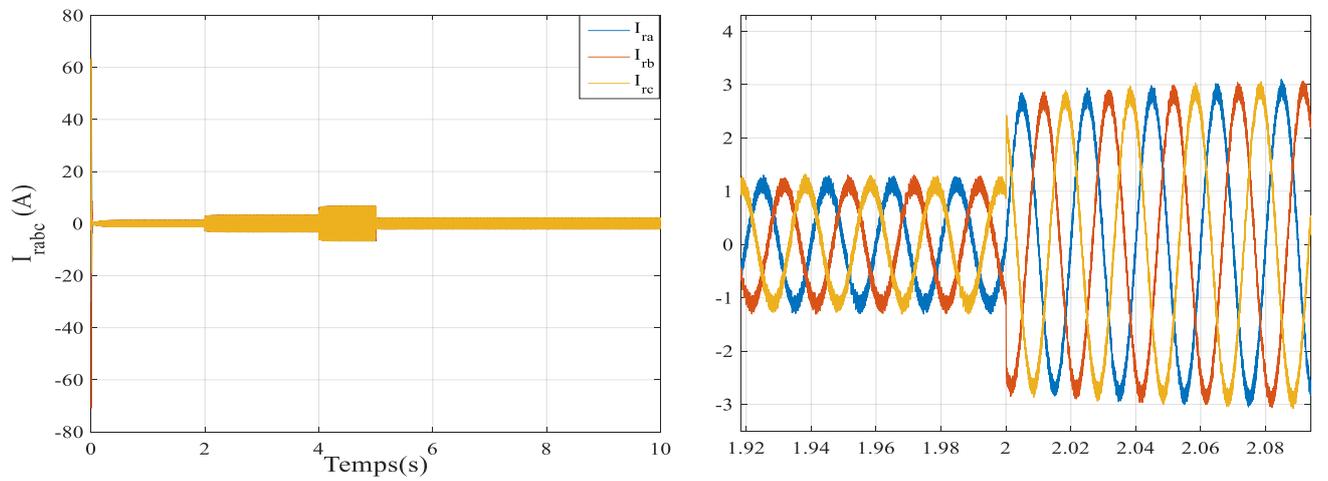


Figure III.21 Courants rotoriques de la commande indirecte avec zoom

❖ **Vitesse de vente variable**

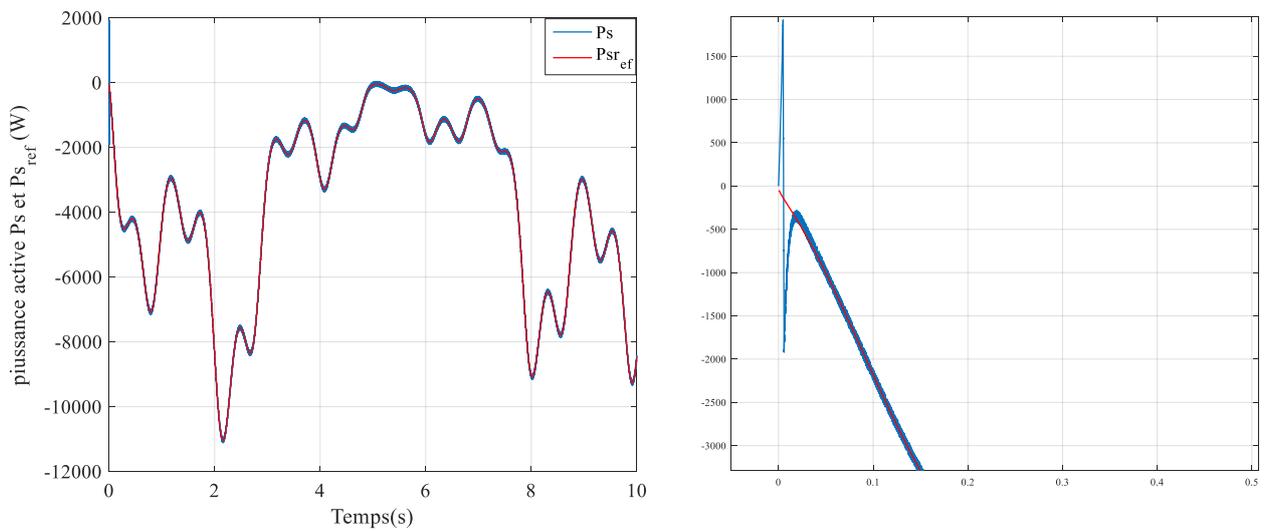


Figure III.22 Puissance active statorique de la commande indirecte avec zoom

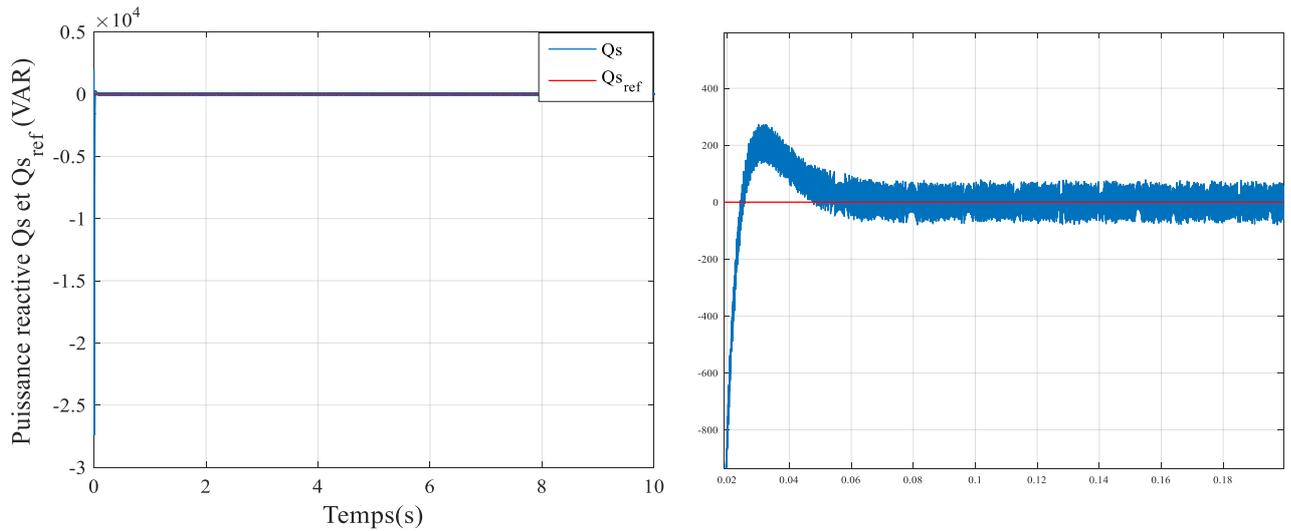


Figure III.23 Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec zoom

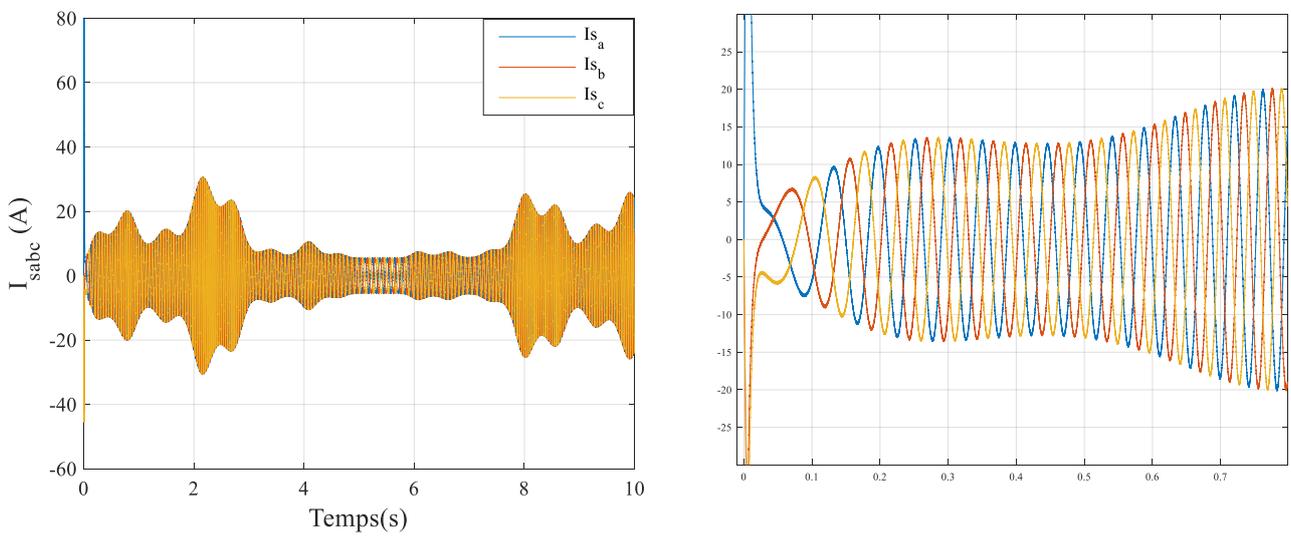


Figure III.24 Courants statoriques de la commande indirecte avec zoom

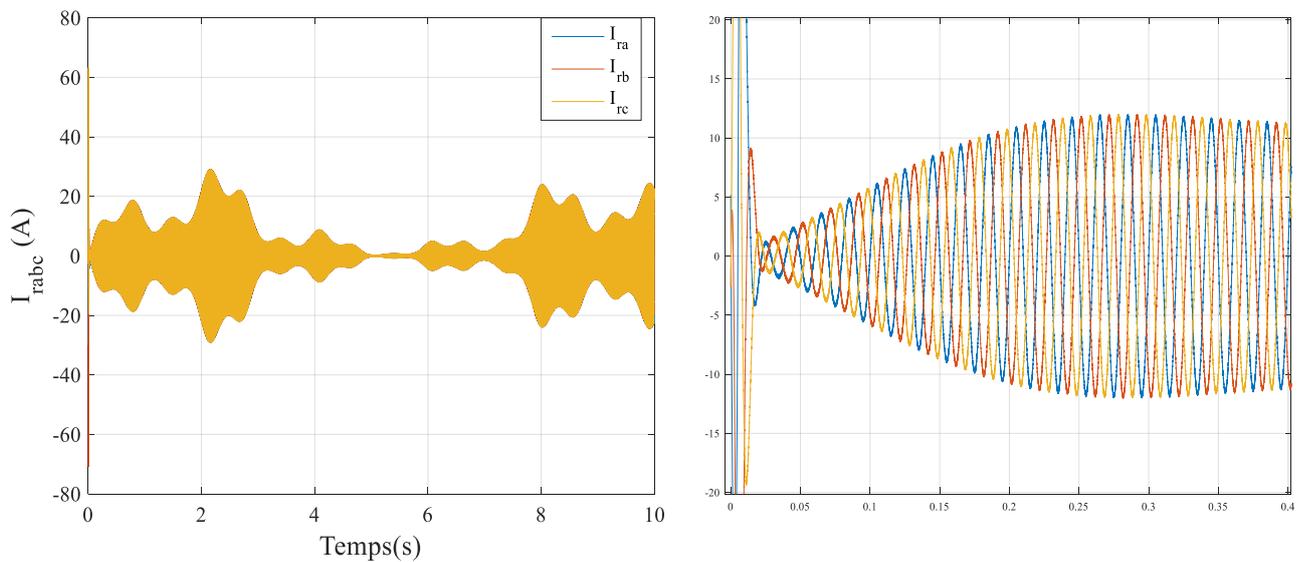


Figure III.25 Courants rotoriques de la commande indirecte avec zoom

Il est évident que les deux méthodes de gestion permettent un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance active et réactive statorique, comme le montrent les courbes des figures (III-10) et (III-25) qui représentent les résultats de la simulation.

De plus, il est démontré que la commande vectorielle utilisant des correcteurs PI offre un découplage et un réglage efficaces des puissances actives et réactives au niveau du stator, ainsi qu'une bonne poursuite des valeurs de référence imposées. Cependant, lorsque la MADA fonctionne à vitesse variable, ces commandes sont moins efficaces. Ceci est dû à des perturbations sur les puissances actives et réactive.

### **III.8 Principe la commande backsteeping des puissances active et réactive**

Des progrès importants ont été réalisés dans le domaine du contrôle des systèmes non linéaires ces dernières années, et la technique de backstepping est l'une des nouvelles percées dans ce domaine [18], [19]. Cette technique permet une méthode de synthèse pour une classe de systèmes non linéaires de forme triangulaire. Elle repose sur l'analyse du système de contrôle global, qui est généralement multivariable (MIMO) et de haut ordre, en une série de systèmes de contrôle de premier ordre. La méthode de cette technique consiste à calculer une loi de contrôle virtuelle, appelée "loi de contrôle virtuelle", pour chaque sous-système de contrôle, et cette loi sera utilisée comme référence pour le système de contrôle suivant jusqu'à ce que la loi de contrôle complète du système soit obtenue. En outre, cette technique est capable de préserver les non-linéarités utiles pour les performances et la robustesse du contrôle, contrairement aux approches linéaires classiques. La détermination des lois de contrôle résultant de cette approche repose sur l'utilisation de fonctions de Lyapunov pour le contrôle (CLF).

#### **III.8.1 Méthodes de Lyapunov**

Le contrôle des systèmes non linéaires repose sur deux approches possibles. La première vise à linéariser le système à contrôler, tandis que la deuxième approche consiste à trouver une fonction de commande de Lyapunov qui garantit certaines performances pour le système en boucle fermée.

##### **III.8.1.1 Première méthode de Lyapunov**

Cette approche permet d'examiner la stabilité locale en linéarisant la dynamique autour d'un point d'équilibre et en utilisant cette information pour analyser la stabilité d'un système. Cette méthode n'est cependant que marginalement significative car elle ne peut pas être utilisée pour rechercher la stabilité globale ou fournir des détails sur le domaine de stabilité globale. En outre, les approximations du premier ordre (linéarisation) limitent les types de phénomènes non linéaires qui peuvent être pris en compte. L'étude locale joue en fait un rôle important dans la défense de la poursuite de l'étude de stabilité.[ 20]

### III.8.1.2 Deuxième méthode de Lyapunov

L'idée d'énergie dans un système est à la base de cette approche. L'idée derrière cette approche est d'évaluer la stabilité du système sans même résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent. Seule l'analyse de l'évolution de l'énergie, ou d'une fonction qui lui est comparable, le long de la trajectoire du système permet de déterminer la stabilité. [20].

### III.8.2 Méthode générale de synthèse récursive par backstepping

Comme le montre le diagramme ci-dessous, cette approche est utilisée pour les systèmes ayant une forme triangulaire.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3, \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u, \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Avec

$$x_1 = [x_1 x_2 \dots x_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad u \in \mathbb{R}$$

Nous supposons que le système étudié a une sortie représentée par  $y = x_1$  un signal de référence et qu'il souhaite suivre ce signal afin de démontrer le processus récursif de la méthode de la marche à reculons. Cette hypothèse servira d'illustration pour les principales étapes de l'approche backstepping.  $y_{ref}$  Le système est implémenté en  $n$  étapes puisqu'il est d'ordre  $n$ . [21] , [ 22].

#### ❖ Etape 1 :

Nous commençons par examiner l'équation initiale du système (III.41), où  $x_1$  est considéré comme une commande virtuelle intermédiaire. La source désirée initiale est  $r_1$ .

$$(x_1)_d = a_0 = y_r \quad (\text{III.42})$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_1 - a_0 \quad (\text{III.43})$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{a}_0 \\ &= f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{a}_0 \end{aligned} \quad (\text{III.44})$$

Nous commençons par créer une fonction de Lyapunov  $V$  quadratique pour ce système.

$$\ll Q_s \gg \quad (III.45)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{a}_0] \quad (III.46)$$

Le rendre négatif et assurer la stabilité de la dynamique de (III.44) serait un choix judicieux. Faisons-le en utilisant:

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{a}_0 = -K_1 e_1 \quad (III.47)$$

Où  $K_1 > 0$  est une constante de conception

Ainsi, la loi de commande pour le système(III.44) sera donnée par :

$$a_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} [-K_1 e_1 + \dot{a}_0 - f_1(x_1)] \quad (III.48)$$

Ci qui impliquer

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad (III.49)$$

### ❖ *Etape 2 :*

La variable de contrôle du sous-système précédent servira de nouvelle référence.

$$(x_2)_d = a_1 \quad (III.50)$$

L'erreur de régulation c'est :

$$e_2 = x_2 - a_1 \quad (III.51)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{a}_1 \\ &= f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{a}_1 \end{aligned} \quad (III.52)$$

Pour le système (III.52), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \\ V_2 &= \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2] \end{aligned} \quad (III.53)$$

Dont la dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &-K_1 e_1 + e_2 [f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{a}_0] \end{aligned} \quad (\text{III.54})$$

Le choix de qui stabilisera la dynamique du système (III.52), et rendra négative est :

$x_3 = a_2$  telle que :

$$-K_1 e_1 + e_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{a}_1 \quad (\text{III.55})$$

Où  $K_2 > 0$  est une constante de conception

Ainsi, la loi de commande pour le système (III.52) sera donnée par :

$$a_2 = \frac{1}{g_1(x_1, x_2)} [-K_2 e_2 + \dot{a}_1 - f_2(x_1, x_2)] \quad (\text{III.56})$$

Avec :

$$\dot{a}_1 = \frac{g_0(x_1) [-K_1 \dot{e}_1 + \ddot{a}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-K_1 e_1 + \dot{a}_0 - f_1(x_1)] \dot{g}_0(x_1)}{g_0^2(x_1)} \quad (\text{III.57})$$

Un tel choix implique que :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0 \quad (\text{III.58})$$

### Etape n:

De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$x_n = a_{n-1} \quad (\text{III.59})$$

D'où l'erreur de régulation :

$$e_2 = x_n - a_{n-1} \quad (\text{III.60})$$

Sa dérivée est

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_n - \dot{a}_{n-1} \quad (\text{III.61})$$

$$= f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{a}_{n-1}$$

Pour le système (III.61), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_n = V_1 + V_2 + \dots + \frac{1}{2} e_{n-1}^2 \quad (\text{III.62})$$

$$= \frac{1}{2} [e_{1^2} + \dots e_{n^2}]$$

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dots e_n \dot{e}_n \quad (\text{III.63})$$

$$= -K_1 e_{1^2} + \dots e_n [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{a}_{n-1}]$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier. Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{a}_{n-1} = -K_n e_n \quad (\text{III.64})$$

Où  $K_n \succ 0$  est une constante de conception

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} [-K_n e_n + \dot{a}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n)] \quad (\text{III.65})$$

Ce qui garanti la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V} = -K_1 e_{1^2} - \dots - K_n e_{n^2} \leq 0 \quad (\text{III.66})$$

### III.9 Application de la commande par Backstepping à la GADA

Afin de fournir de bonnes performances tout en assurant la régulation et la limitation des courants, la commande à contre-courant utilisée avec la machine asynchrone à double alimentation est construite de manière à conserver la même structure de base qu'une commande à vecteur de flux.

Grâce à la théorie de Lyapunov, nous pouvons utiliser cette méthode pour identifier les tensions de contrôle de l'alimentation de la machine tout en assurant la stabilité globale. Le contrôle hybride qui en résulte permet une observation et une gestion indépendantes de la production de puissance active et réactive tout en assurant une dynamique stable pour les différences entre les quantités de puissance de référence et de puissance réelle. [23]

#### III.9.1 Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation

La technique backstepping est basé sur le contrôle vectoriel comme nous avons fait dans le précédent chapitre.

Dans ce cas, la commande sera appliquée dans le repère (d,q) en considérant l'orientation du flux statorique suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.67})$$

Dans cette partie, on considère le nouveau modèle de la MADA dans le repère  $(d,q)$  donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s = V_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.68})$$

- **Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques**

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr}^{ref} \end{cases} \quad (\text{III.69})$$

$$\begin{cases} I_{qr}^{ref} = -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot P_s^{ref} \\ I_{dr}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (\text{III.70})$$

- **Equations des dérivées de courants rotoriques de références**

$$\begin{cases} \dot{I}_{qr}^{ref} = -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} \\ \dot{I}_{dr}^{ref} = -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \end{cases} \quad (\text{III.71})$$

- **Equations des dérivées de courants rotoriques**

$$\begin{cases} \frac{dI_{qr}^{ref}}{dt} = \left( V_{qr} - R_r I_{qr} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{dr} \cdot \sigma - g \cdot \omega_s \cdot \frac{V_s M}{L_s W_s} \right) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{dr}^{ref}}{dt} = \left( V_{rd} - R_r I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma \right) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \end{cases} \quad (\text{III.72})$$

### III.9.2 Synthèse de la loi de commande

Nous pouvons éliminer les contrôleurs PI dans le contrôle vectoriel en utilisant une technique de contrôle lorsque le contrôle vectoriel et le backstepping sont utilisés ensemble. Les calculs des valeurs de référence pour les courants et les tensions de commande sont basés sur les fonctions de Lyapunov. [23]

Ce commandement s'appuie sur les deux phases suivantes :

Le but de cette étape est d'identifier les erreurs  $\ll E_1 \gg$   $\ll E_2 \gg$  qui représentent respectivement l'erreur entre la puissance active réelle du stator  $\ll P_s \gg$  et la puissance de référence  $\ll P_s^{ref} \gg$ , qui sera directement proportionnelle au courant q de l'axe du rotor, et la puissance réactive du stator  $\ll Q_s \gg$  et la puissance de référence  $\ll Q_s^{ref} \gg$ , qui sera proportionnelle au courant de l'axe d du rotor.

$$\begin{cases} E_1 = I_{ar}^{ref} - I_{ar} \\ E_2 = I_{dr}^{ref} - I_{dr} \end{cases} \quad (III.73)$$

La dérivée de cette erreur est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_{ar}^{ref} - \dot{I}_{ar} \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_{dr}^{ref} - \dot{I}_{dr} \end{cases} \quad (III.74)$$

La première fonction de Lyapunov est définie par :

$$V = \frac{1}{2} |E_1^2 + E_2^2| \quad (III.75)$$

Pour avoir la dérivée de la fonction de Lyapunov nulle, il faut choisir les erreurs comme suit :

$$\dot{E}_1 = -K_1 E_1$$

Et :

$$\dot{E}_2 = -K_2 E_2$$

Alors la dérivée de la fonction de Lyapunov par rapport au temps devient :

$$V = -K_1 E_1^2 - K_2 E_2^2 \quad K_1 \text{ et } K_2 > 0 \quad (III.76)$$

A partir des équations (III.71), (III.72) et (III.74) la dérivée des erreurs  $\ll \dot{E}_1 \gg$ ,  $\ll \dot{E}_2 \gg$  devient:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} \right) - \left( V_{qr} - R_r I_{qr} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{dr} \cdot \sigma - g \cdot \omega_s \cdot \frac{V_s M}{L_s W_s} \right) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \right) \\ \dot{E}_2 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \left( V_{rd} - R_r I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma \right) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \right) \end{cases} \quad (III.77)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} \right) - V_{qr} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( -R_r I_{qr} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma - g \cdot \omega_s \cdot \frac{V_s M}{L_s W_s} \right) \right) \\ \dot{E}_2 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - V_{rd} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( V_{rd} - R_r I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma \right) \right) \end{cases} \quad (III.78)$$

$$\begin{cases} -K_1 E_1 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} \right) - V_{qr} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( -R_r I_{qr} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma - g \cdot \omega_s \cdot \frac{V_s M}{L_s W_s} \right) \right) \\ -K_2 E_2 = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - V_{rd} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( V_{rd} - R_r I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma \right) \right) \end{cases} \quad (III.79)$$

$$\begin{cases} V_{rq} = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} + K_1 E_1 \right) - V_{qr} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( -R_r I_{qr} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma - g \cdot \omega_s \cdot \frac{V_s M}{L_s W_s} \right) \right) \\ V_{rd} = \left( \left( -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot \dot{Q}_s^{ref} + K_2 E_2 \right) - V_{rd} \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot \left( V_{rd} - R_r I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot I_{qr} \cdot \sigma \right) \right) \end{cases} \quad (III.80)$$

Le schéma bloc de la commande par backstepping est illustré par la figure ci-dessous

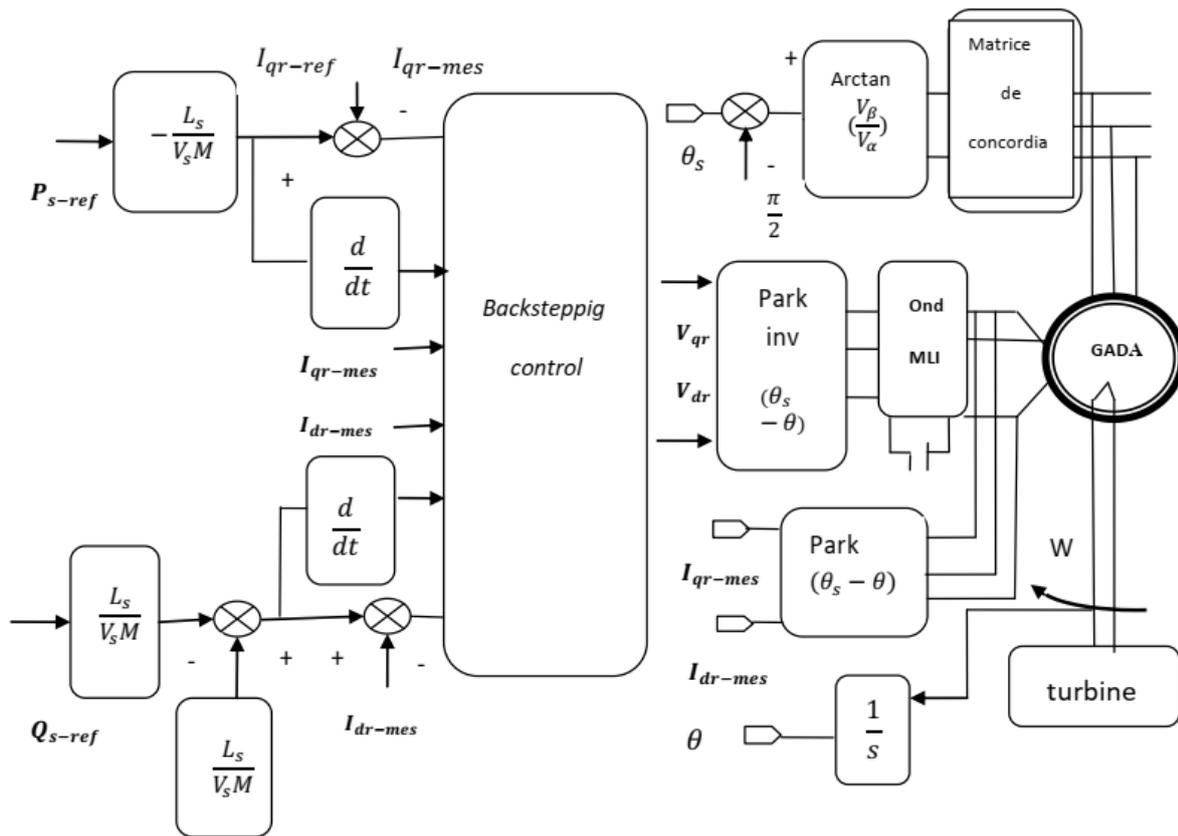


Figure III.26 Schéma bloc de la structure de commande par Backstepping.

### III.9.3 Résultats de simulations

L'approche de backstepping a été utilisée pour évaluer la performance du contrôle direct de la puissance. Nous avons effectué un test de simulation dans l'environnement MATLAB/Simulink.

### ❖ Fonctionnement à vitesse du vent fixe

Les résultats suivants sont obtenus en appliquant les principes de contrôle de la puissance active et réactive que nous venons de fournir au modèle de machine asynchrone.

Les signaux suivent leur trajectoire de référence tout en restant dans les limites de la puissance active et réactive et de l'erreur statique en régime permanent.

Les figures II.27 et II.28 représentent les courbes de puissance active et réactive avec leurs références appropriées. Elles nous permettent de valider les performances exceptionnelles et les tendances positives de la puissance active et réactive.

La GADA génère un courant de stator de forme quasi-sinusoïdale. En raison du contenu harmonique élevé induit par l'approche proposée, le courant du rotor est également quasi-sinusoïdal. Comme illustré dans les deux figure (II.29), (II.30).

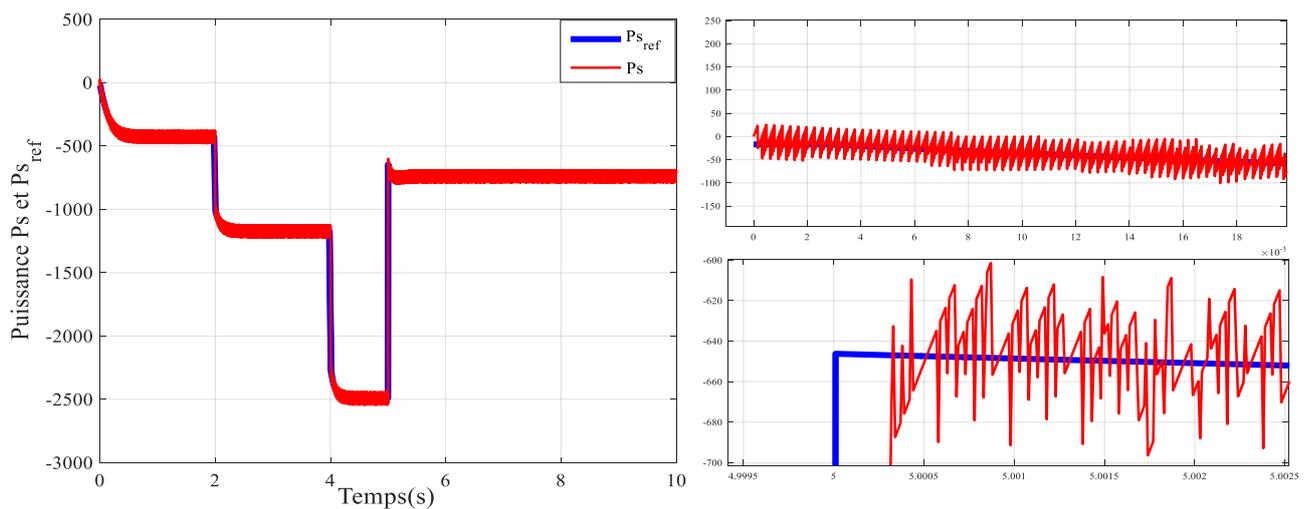


Figure (II.27) : La puissance active statorique pour la commande de backstepping.

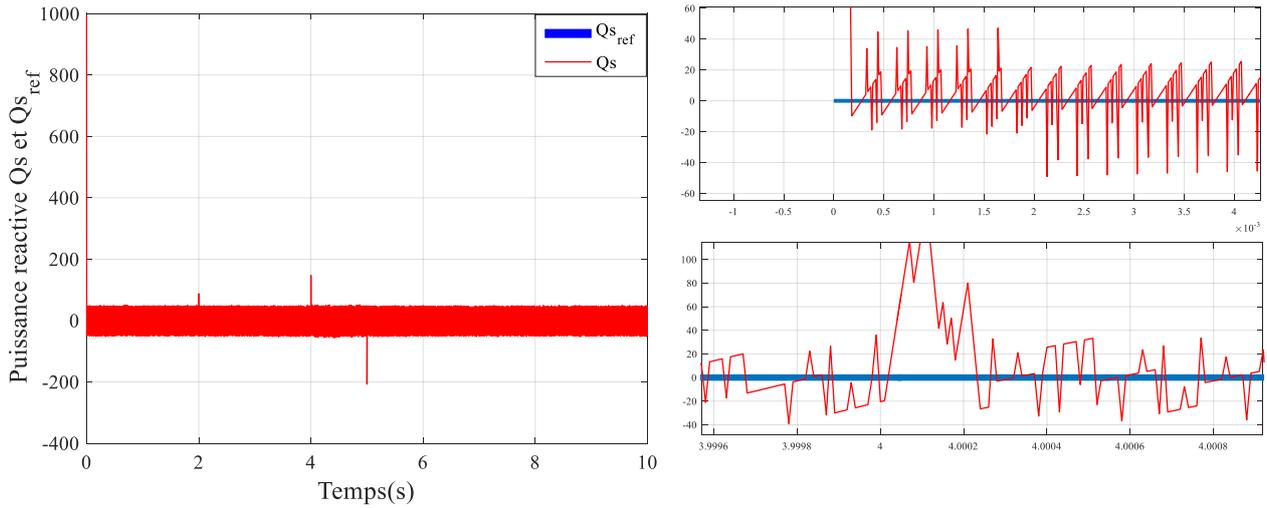


Figure (II.28) : La puissance réactive statorique pour la commande de backstepping

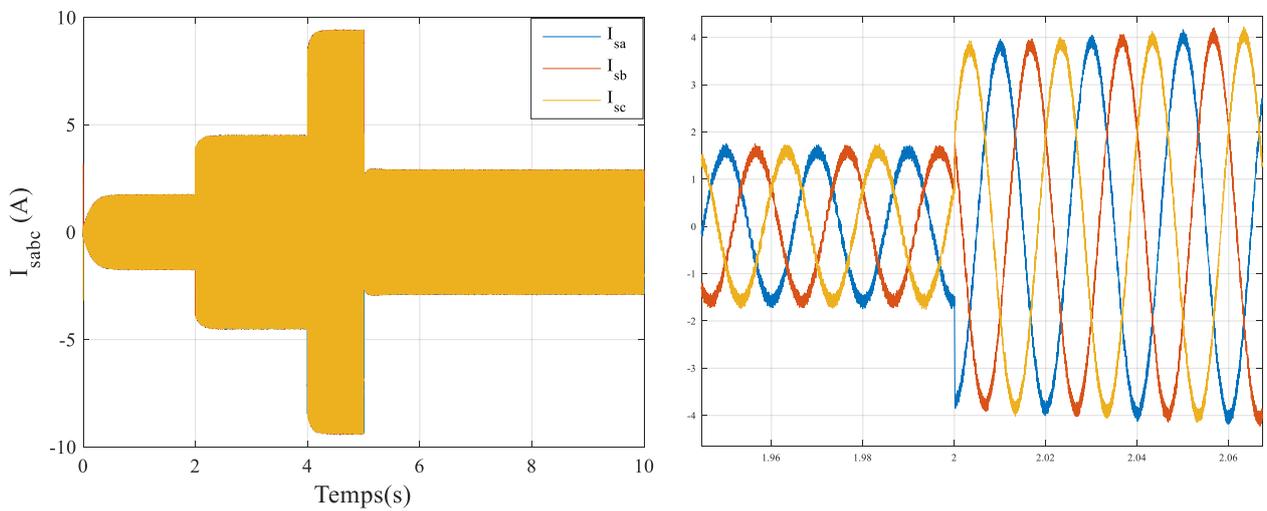


Figure (II.29) : Le courants statorique pour la commande de backstepping

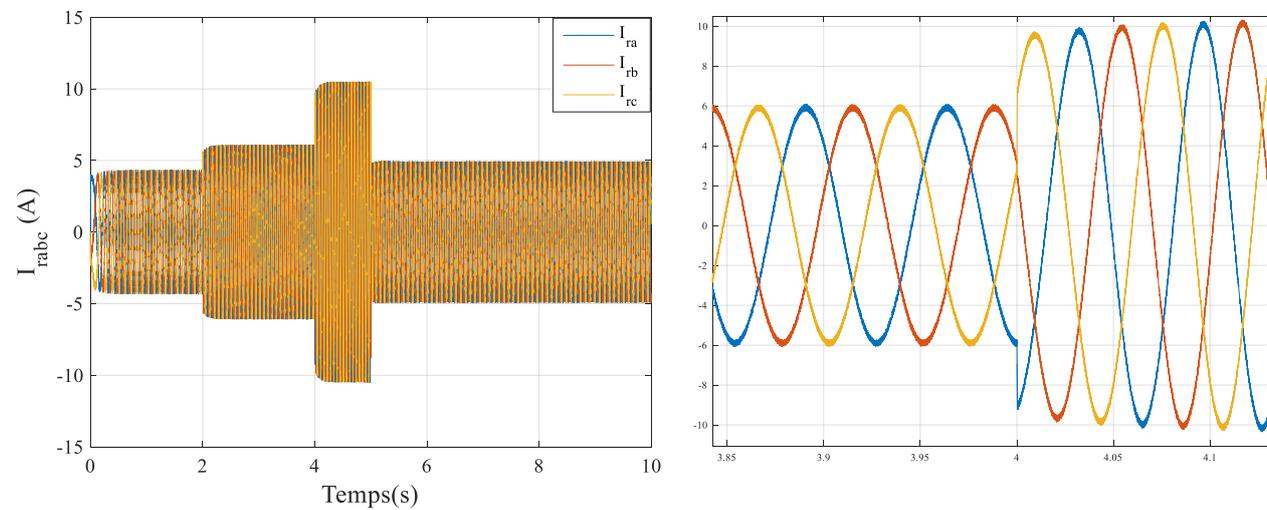


Figure (II.30) : Le courants rotorique pour la commande de backstepping

### ❖ Fonctionnement à vitesse du vent variable

Les résultats suivants sont obtenus en appliquant les principes de contrôle de la puissance active et réactive au modèle de machine asynchrone que nous venons de présenter.

La puissance active du stator suit exactement sa référence générée par l'éolienne. Pour une puissance réactive nulle, le facteur de puissance est égal à l'unité. Comme illustré dans les deux figure (II.31), (II.32).

Les courants sont proportionnels à la puissance active ; le courant du rotor montre que le GADA passe du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, en fonction du profil du vent utilisé pour alimenter l'éolienne. Comme illustré dans les deux figure (II.33), (II.34).

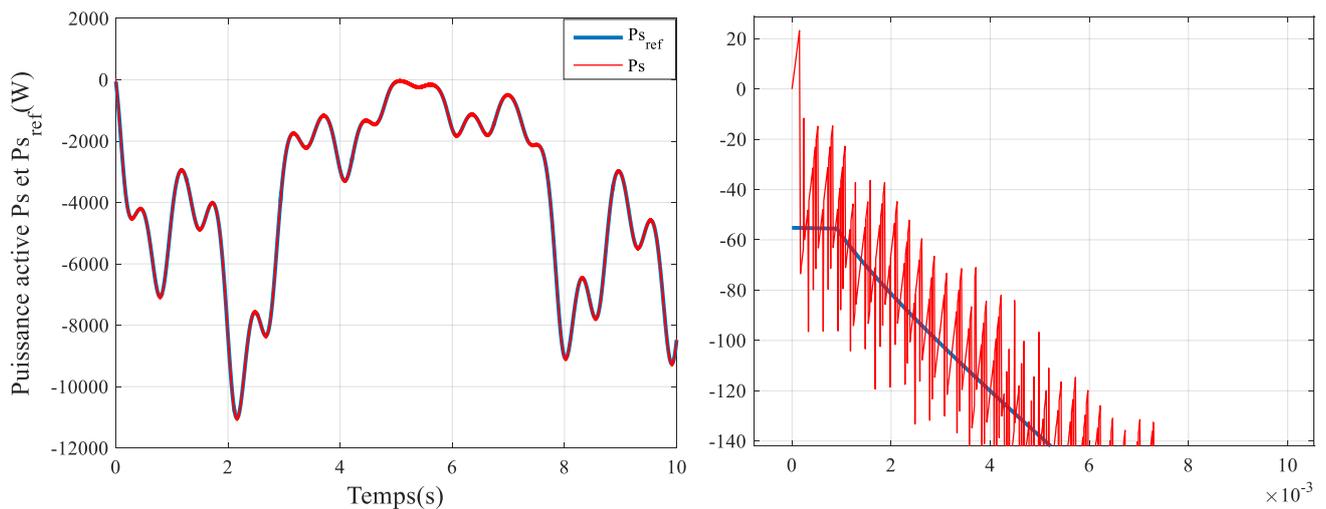


Figure (II.31) : La puissance active statorique pour la commande de backstepping.

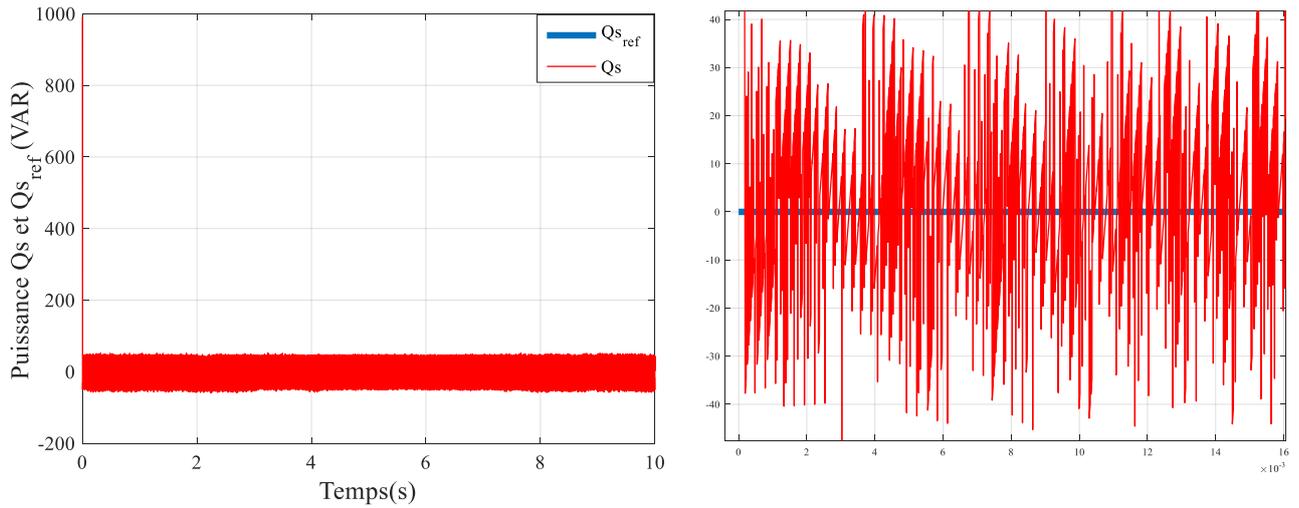


Figure (II.32) : La puissance réactive statorique pour la commande de backstepping.

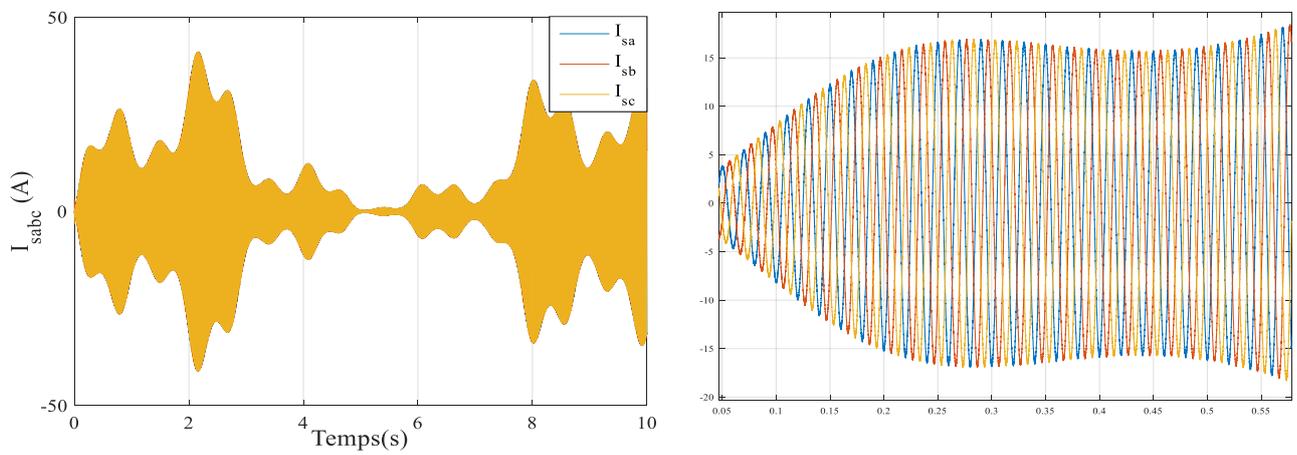


Figure (II.33) : Le courants statorique pour la commande de backstepping

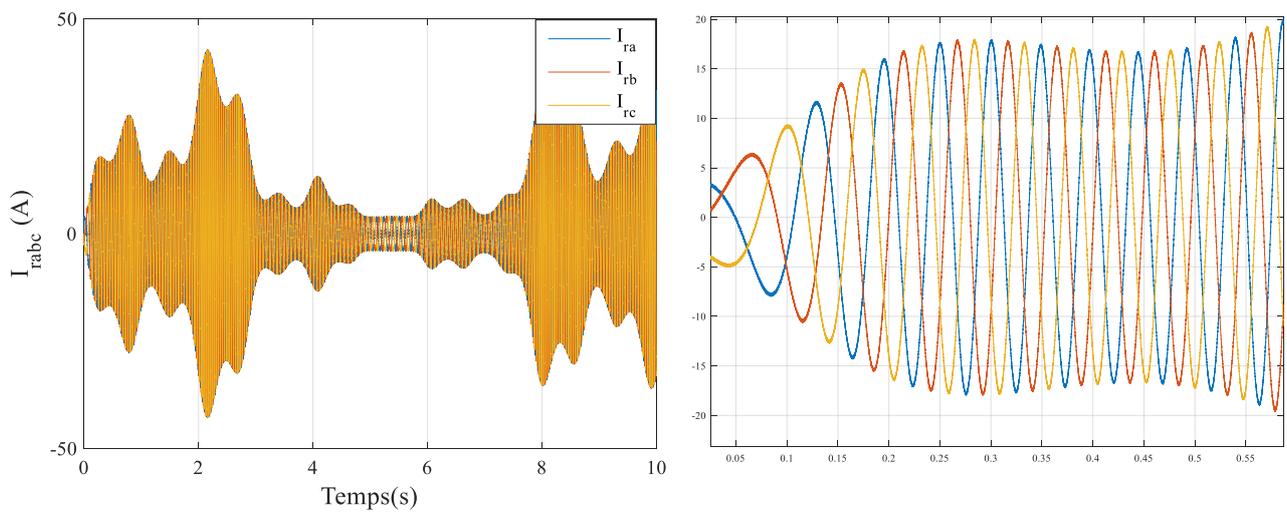


Figure (II.34) : Le courants rotorique pour la commande de backstepping

Les résultats obtenus montrent également que l'utilisation des deux commandes permet de maintenir les puissances active et réactive aux valeurs recherchées, ainsi qu'un bon suivi de consigne avec une rapidité et une précision remarquables tout en observant l'apparition du phénomène de chattering. En outre, nous constatons que les résultats de la technique de commande par Backstepping sont supérieurs à ceux de la technique de commande vectorielle. En cas de décalage de référence, nous constatons également que le backstepping n'a pas de dépassement des deux puissances active et réactive lors du phénomène transitoire.

### **III.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'approche de la commande vectorielle directe pour contrôler directement les courants. Nous avons ensuite examiné et simulé la commande vectorielle indirecte, qui fonctionne avec des transformateurs tels que les onduleurs. Les résultats ont fait l'objet d'une brève discussion. Ensuite, nous avons présenté un nouveau système de contrôle basé sur le backstepping à partir du modèle simplifié de l'axe électromagnétique ajustable (GADA). Le contrôle par backstepping est utilisé pour réguler les puissances active et réactive de l'axe électromagnétique réglable du stator. Les contrôleurs PI inclus dans le contrôle directionnel traditionnel sont remplacés par des fonctions de Lyapunov, assurant une stabilité globale à tout moment. Enfin, ce système de contrôle a été simulé et comparé au contrôle vectoriel.

# Conclusion générale

Dans le cadre de notre thèse, nous nous sommes concentrés sur la production et la conversion de l'énergie éolienne. Nos objectifs étaient d'étudier et de simuler une chaîne de conversion d'énergie éolienne comprenant une turbine de puissance moyenne et un générateur asynchrone à double alimentation. Cette chaîne de conversion d'énergie éolienne est connectée à un dispositif électronique de puissance qui transfère l'énergie électrique générée au réseau électrique ou à la charge à alimenter. Nous avons également intégré les techniques de contrôle nécessaires au bon fonctionnement de chaque composant.

L'état actuel de l'art des systèmes d'énergie éolienne a été présenté, mettant en évidence l'importance croissante de la production d'énergie éolienne et les avancées technologiques dans le domaine des grandes éoliennes. Les progrès rapides sont attribuables au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les systèmes de contrôle. Les politiques énergétiques jouent également un rôle significatif dans le développement durable de cette industrie.

Notre recherche nous a permis de modéliser un système complet de conversion d'énergie éolienne. Une différence clé dans notre approche de modélisation réside dans l'incorporation de calculs aérodynamiques pour estimer les corrélations entre la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Nous avons utilisé le modèle MADA comme base de notre étude.

Le premier chapitre présente une introduction à l'énergie éolienne et aux technologies utilisées pour sa production. Nous avons ensuite fourni un aperçu général de tous les composants du système que nous avons choisi pour notre recherche. Le deuxième chapitre propose un modèle complet de ces composants connectés au réseau, y compris la machine asynchrone à double alimentation, qui est alimentée par une turbine à vitesse variable pour optimiser et limiter la puissance extraite. Un onduleur entraîne le rotor et un bus CC est placé en aval de ce convertisseur. Un redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) relie le bus CC au réseau, permettant un contrôle régulé du bus CC. Le troisième chapitre détaille deux techniques de contrôle utilisées pour réguler l'échange de puissance entre le stator de la machine et le réseau. La première technique est la commande vectorielle, qui permet de contrôler le rotor de la machine en fonction des grandeurs statoriques et rotoriques. Les deux nouvelles techniques de

commande visent à contrôler indépendamment la puissance active et réactive générée par la machine asynchrone à découplage de flux. Des simulations ont été réalisées pour valider ces deux approches de commande, et une comparaison des résultats a été effectuée.

En conclusion, nous avons identifié plusieurs perspectives de développement basées sur notre travail de thèse, notamment :

- ✓ La création d'une plateforme expérimentale pour mettre en pratique et expérimenter les méthodes de commande proposées.
- ✓ L'intégration potentielle d'un système de stockage d'énergie et l'optimisation technico-économique de la chaîne de conversion éolienne.
- ✓ L'exploration d'autres techniques de commande non linéaires et intelligentes pour dépasser les limitations des régulateurs classiques.
- ✓ L'étude et l'utilisation de convertisseurs de niveau supérieur, tels que les convertisseurs à trois et cinq niveaux, dans une chaîne de conversion éolienne.
- ✓ Le développement de commandes tolérantes aux défauts pour améliorer la fiabilité des installations de production d'énergie éolienne.
- ✓ L'étude des problèmes liés à la production d'énergie éolienne en relation avec le déséquilibre du réseau, les chutes de tension et les variations de tension.
- ✓ La création d'un modèle MADA prenant en compte la saturation magnétique.
- ✓ L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance basé sur différentes techniques telles que la logique floue, les réseaux neuronaux, le mode glissant, etc.

Ces perspectives ouvrent de nouvelles voies de recherche et permettent d'explorer des aspects clés de l'énergie éolienne afin d'améliorer ses performances et son intégration dans les réseaux électriques.

# Bibliographies

- [ 1 ] Lebsir, A., A. Bentounsi, and M. Benbouzid, Performances comparées de machines synchrones à aimants permanents et à réluctance variable associées à une chaîne de conversion d'énergie renouvelable. 2017.
- [ 2 ] Pierre, R., Dynamic modeling and control of multi-terminal HVDC grids. 2014, Ecole Centrale Lille, France.
- [ 3 ] Abdelli, A., Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive. 2007, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [ 4 ] Bouderbala, M., et al., Direct and indirect vector control of a doubly fed induction generator based in a wind energy conversion system. 2019. 9(3): p. 1531.
- [ 5 ] Poitiers, F., Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau. 2003, Université de Nantes.
- [ 6 ] Benalla, H. and F. Kendouli, Centrale eolienne et qualite de l'énergie électrique. 2017.
- [ 7 ] Dumitru, M., et al., Corporate reporting practices in Poland and Romania—an ex-ante study to the new non-financial reporting European directive. 2017. 14(3): p. 279-304.
- [ 8 ] Djemaa, D., Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type savonius simulation des performances de l'éolienne. 2011, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des Sciences.
- [ 9 ] Multon, B., et al. Le génie électrique dans le vent: recherches dans le domaine de la génération éolienne. in congrès Jeunes Chercheurs en Génie Electrique 2003. 2003.
- [ 10 ] Olsen, D.H. and D.J. Timothy, Routledge handbook of religious and spiritual tourism. 2022: Routledge.
- [ 11 ] Multon, B., et al., Etat de l'art des aérogénérateurs. 2002, Ed. NOVELECT-ECRIN, ISBN 2-912154-8-1.
- [ 12 ] LARABI, A., Conception de la commande d'une machine asynchrone destinée à l'énergie renouvelable. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ....
- [ 13 ] Eddine, Z.S.J.M.d.m., Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau. 2017. 2.
- [ 14 ] SMAI, D.A. and M.L.J.R.é.e.m. Zahi, Les Potentialites De L'algerie En Energies Renouvelables.

2016. 19: p. 7902-1112.

[ 15 ] Merzouk, N.K. and H. Daaou, Cartes saisonnières du vent en Algérie. 2001, journée d'études: météorologie et climatologie entre sciences et prise de ....

[ 16 ] Merzouk, N.K.J.D.e.p., Université de Tlémcen, Evaluation du gisement énergétique éolien Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. 2006.

[ 17 ] Laverdure, N., Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires.

2005, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.18. Metatla, S., Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA. 2009,

Ecole nationale polytechnique.

[ 19 ] Sajid, M.R., Load & Stress Analysis of Horizontal Axis Wind Turbine and Comparison between Fiberglass & Carbon Fiber Blades.

[ 2 ] Nuñez, J.C.A.J.U.d.C., Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. 2004.

[ 21 ] FAWZI, D., Commande d'un système éolien basé sur une GADA Par différentes techniques. 2019,

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.

[ 22 ] HASSAD, M.A., Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. 2016.

[ 23 ] LAMA, A., Sensorless Optimal Power Control of Doubly fed Induction Generator in Variable Speed Wind Turbine System. 2019.

[ 24 ] Ghennam, T., 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. 2011.

[ 25 ] Hammoutene, M.I., Contribution à l'optimisation d'une pale d'éolienne à axe horizontal. 2022.

[ 26 ] Kulka, A., Pitch and torque control of variable speed wind turbines. 2004.

[ 27 ] Latreche, M.-T., Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée

dans un système éolien. 2018.

[ 28 ] Boumaraf, F., Commande d'un aérogénérateur-Apport des techniques de l'intelligence artificielle. 2014, Université de Batna 2.

[ 29 ] Fergani, M., L. Gasmi, and Y. Chiba, Contribution a l'étude d'un système éolien pour la production

de l'électricité. 2019.

[ 30 ] Khelfat, L. and L.J.M.D.M.U.B.M.-A. Maataoui, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. 2017.

[ 31 ] Allam, M., et al., Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne. 2014. 1(2): p. 88-100.

[ 32 ] MOUSSAOUI, T.Y. and M. HADA, Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. 2015.

[ 33 ] Elbia, Y., Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté. 2009, Université de Batna 2.

[ 34 ] Tamaarat, A.J.U.M.K., Biskra, Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2015.

[ 35 ] Multon, B., et al., Le Génie Electrique dans le vent: état de l'art et recherches dans le domaine de

la génération éolienne. 2003. 3(5): p. 141-145.36. Boyette, A., Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec

système de stockage pour la production éolienne. 2006, Université Henri Poincaré-Nancy I.

[ 37 ] Engelhardt, S., et al., Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators. 2010. 26(1): p. 364-372.

[ 38 ] Pena, R., J. Clare, and G.J.I.P.-E.p.a. Asher, Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. 1996. 143(3): p. 231-241.

[ 39 ] Kendouli, F., et al., Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable

basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation. 2011. 14(1): p. 109–120-109–120.

[ 40 ] Tir, Z., Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade. 2018.

[ 41 ] Aouzellag, D., K. Ghedamsi, and E.J.R.E. Berkouk, Network power flux control of a wind generator. 2009. 34(3): p. 615-622.

[ 42 ] Pozo, A., et al., Indirect speed control strategy for maximum power point tracking of the DFIG wind turbine system. 2021. 17(2): p. 92-101.

[ 43 ] Mohamed, A., Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable. 2017, université djilali liabes.

- [ 44 ] Ramuz, D., Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs: contribution à l'étude et à la commande avec et sans capteur. 2000, Besançon.
- [ 45 ] El Aimani, S., Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004, Ecole Centrale de Lille.
- [ 46 ] ZOUGGAR, E.O., Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones. 2021, Université de Batna 2.
- [ 47 ] Masaud, T.J.-M.T. and Dissertations, Modeling, analysis, control and design application guidelines of doubly fed induction generator (DFIG) for wind power applications. 2013.
- [ 48 ] Wang, C., Control, stability analysis and grid integration of wind turbines. 2008.
- [ 49 ] Mirecki, A., Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. 2005.
- [ 50 ] Boukaroura, A., Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bond-Graph. 2018.
- [ 51 ] Bekakra, Y., Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées. 2010, University of Eloued .
- [ 52 ] BEN FEHIMA, O. and H. ZROUG, Commande par Backstepping d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA). 2020, Université M'sila.
- [ 53 ] LOUKAL, K., Commande robuste des machines asynchrones a double alimentation a base des systèmes flous type deux. 2017, Université de M'sila.
- [ 54 ] Rouabhi, R. [, Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée. 2016, Université de Batna 2.55. Loucif, M., A. Boumediene, and A. Mechernene. Backstepping control of double fed induction generator driven by wind turbine. in 3rd international conference on systems and control. 2013. IEEE.
- [ 56 ] Song, L.-p. and H. Li. Simulation for strategy of maximal wind energy capture of doubly fed induction generators. in 2010 Sixth International Conference on Natural Computation. 2010. IEEE.
- [ 57 ] Jadhav, H., R.J.I.J.o.E.P. Roy, and E. Systems, A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator. 2013. 49: p. 8-18.
- [ 58 ] Kassem, A.M., et al., Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine

at infinite grid. 2013. 44(1): p. 375-382.

[ 59 ] Hachicha, F. and L. Krichen. Performance analysis of a wind energy conversion system based on a

doubly-fed induction generator. in Eighth International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices.

2011. IEEE.

[ 60 ] Ouari, K., T. Rekioua, and M.J.I.t. Ouhrouche, Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer. 2014. 53(1): p. 76-84.

[ 61 ] Taib, N., et al., Performance and efficiency control enhancement of wind power generation system based on DFIG using three-level sparse matrix converter. 2013. 53: p. 287-296.

[ 62 ] Abdeddaim, S., A.J.I.J.o.E.P. Betka, and E. Systems, Optimal tracking and robust power control of

the DFIG wind turbine. 2013. 49: p. 234-242.

[ 63 ] Ghedamsi, K., D. Aouzellag, and E.J.R.E. Berkouk, Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system. 2008. 33(9): p. 2145-2156.

[ 64 ] Bekakra, Y., D.B.J.I.j.o.s.a.e. Attous, and management, Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT. 2014. 5: p. 219-229.

[ 65 ] Boyette, A., S. Saadate, and P. Poure. Direct and indirect control of a Doubly Fed Induction Generator wind turbine including a storage unit. in IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. 2006. IEEE.

[ 66 ] Bekakra, Y., D.B.J.A.J.o.B. Attous, and A. Sciences, Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion. 2011. 5(12): p. 2274-2286.

[ 68 ] M. Krstic, I. Kannellakopoulos, P. Kokotovic, « Non linear and Adaptive Control Design », Wiley and Sons Inc., New York, 1995

[ 69 ] Laurent Praly, «An Introduction To Some Lyapunov Designs Of Global Asymptotic Stabilizers », Part 1, Lecture notes, HYCON-ECCI Graduate School on Control, January 26- 30, 2009, Supelec, France

[ 70 ] M. BADRAOUI , M. BEREKSI REGUIG , « Etude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone », Mémoire de Master, Université de Abou BekrBelkaïd – Tlemcen, Algérie ,2016

[ 71 ] Fateh MEHAZZEM , « Contribution à la Commande d'un Moteur Asynchrone destiné à la Traction

électrique », Thèse de doctorat 2010, Université Paris Est

[ 72 ] Abder Rezak Benaskeur, « Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires », Thèse PhD, Université de Laval, 2000

## ANNEXES

### ANNEXES :

1. Les paramètres de la machine asynchrone double alimentée :

<i>Paramètre</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeur numérique</i>
Puissance nominale	$P_n$	5 kw
Résistance statorique	$R_s$	0.435 $\Omega$
Résistance rotorique	$R_r$	0.816 $\Omega$
Inductance mutuelle	$M$	0.069 H
Inductance statorique	$L_s$	0.071 H
Inductance rotorique	$L_r$	0.071 H
Nombre de paires de pôles	$P$	2
Tension du réseau utilisé	$V$	220/380 V
Fréquence du réseau	$F$	50 Hz
Moment d'inertie	$J$	0.089 Kg.m <sup>2</sup>
La vitesse nominale	$N$	1450 tr/min
Coefficient de frottement visqueux	$f$	0.001 N.m.s /rd

**Tableau A-1: Paramètres de la MADA.**

2. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

<i>Paramètre</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeur numérique</i>
Nombre de pales	$B_t$	2
Rayon de l'éolienne	$R_t$	50 m
Densité de l'air	$\rho$	1.225 Kg /m <sup>3</sup>
Gain du multiplicateur de vitesse	$G$	90
Moment d'inertie de la turbine	$J_t$	50 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f_v$	0.0071 N.m. s <sup>2</sup>

**Tableau A-2: Paramètres de la turbine éolienne.**