

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : D'ÉLECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Électrotechnique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

ETUDE ET COMMANDE D'UNE CHAINE EOLIENNE

Présenté par :

BOUZIDI Ibtissem & MANSOUR Ibtissem

Encadrant :

BAHI Tahar

Grade : *Professeur*

Université Badji Mohtar Annaba

Jury de Soutenance :

| | | | |
|-------------------------|------|------|--------------|
| MOHAMMEDI Moufid | MCA | UBMA | Président |
| BAHI Tahar | Prof | UBMA | Encadrant |
| ZARZOURI Nora | MCB | UBMA | Examinatrice |

Année Universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Avant tout nous remercions Dieu Le Tout Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études. Aussi, c'est grâce à lui qu'on a pu réaliser ce travail.

Nous tenions aussi à exprimer nos sincères et meilleures remerciements et notre gratitude à Monsieur BAH Tahar pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, orienter et de conseiller tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'études.

Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

- Mon **PERE** qui ne cesse pas de m'encourager.

- Ma **MERE** pour sa tendresse profonde.

- Mes chers **Frères** et **Sœurs**.

- Mes camarades de promotion 2023, spécialité électrotechnique industrielle du Département de d'électrotechnique de l'université Badji Mokhtar Annaba.

« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité ».

BOUZIDI Ibtissem

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

- Mon **PERE** qui ne cesse pas de m'encourager.

- Ma **MERE** pour sa tendresse profonde.

- Mes chers **Frères et Sœurs.**

- Mes camarades de promotion 2023, spécialité électrotechnique industrielle du Département de d'électrotechnique de l'université Badji Mokhtar Annaba.

« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité ».

MANSOUR Ibtissem

LISTES DE NOTATIONS ET SYMBOLES

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation
GAGA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MLI : Modulation de largeur d'impulsion
CCM : Convertisseur coté machine.
CCR : Convertisseur coté réseau.
PI : Régulateur proportionnel intégral.
FTBO : Fonction de Transfer eu boucle ouverte.
FTBF : Fonction de Transfer eu boucle fermée
a, b, c : Indices des phases statorique.
dq : Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature
 $[V_{abc}]$: Vecteur de la tension statorique
 $[\varphi_{abc}]$: Vecteur de flux statorique
 $[I_{abc}]$: Vecteur de courant statorique
 R_s : Résistance par phase statorique.
 R_r : Résistance par phase rotorique
 L_s : Inductances cycliques statorique
 L_r : Inductances cycliques rotorique.
 M_s : Mutuelle statorique
 M_r : Mutuelle rotorique
 $[p(\theta)]$: Matrice de Park
 M_{rs} : Mutuelle cyclique entre rotor-stator.
 θ_s : Angle statorique.
 θ_r : Angle rotorique.
 θ : Angle électrique
 σ : Coefficient de dispersion
 ρ : Nombre de pair de pôles.
 λ : La vitesse spécifique de la turbine
 N_s : Nombre de spires des bobinages statorique.
 N_r : Nombre de spires des bobinages rotoriques
 ω_s : Pulsation électrique statorique.
 ω_r : Pulsation électrique rotorique.
G: Glissement.
 P_s : Puissance active statorique.
 P_r : Puissance active rotorique.
 Q_s : Puissance réactive statorique
 P_{mec} : Puissance mécanique.
 P_{res} : Puissance du réseau

LISTE DES FIGURES

| | | |
|----------|---|----|
| Fig.1.1 | Eoliennes à axe vertical (a) et horizontal (b) | 9 |
| Fig.1.2 | Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne | 10 |
| Fig.1.3 | Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable | 11 |
| Fig.2.1 | Modèle de la turbine éolienne | 15 |
| Fig.2.2 | Cp en fonction de l pour différentes turbines | 15 |
| Fig.2.3 | Modèle mécanique simplifié du multiplicateur | 16 |
| Fig.2.4 | Caractéristiques Cp (λ , θ) pour différentes valeurs d'angles de calage. | 17 |
| Fig.2.5 | Caractéristiques Puissance-Vitesse pour différentes vitesses du vent | 18 |
| Fig3.1 | profil de la vitesse de rotation de la GADA | 22 |
| Fig3.2 | tension, courant et puissance de la GADA | 22 |
| Fig3.3 | couple de la GADA | 23 |
| Fig3.4 | tension, courant, puissances active et réactive de GADA | 23 |
| Fig3.5 | convertisseur côté réseau CCR | 24 |
| Fig3.6 | Détermination des instants d'échantillonnage | 25 |
| Fig3.7 | Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour m=9 | 26 |
| Fig3.8 | Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour m=15 | 26 |
| Fig3.9 | Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour m=21 | 27 |
| Fig4.1 | Modèle simplifié du GADA | 30 |
| Fig4.2 | Schéma synoptique de la commande de CCR | 31 |
| Fig4.3 | Modèle du GADA dans le référentiel dq | 34 |
| Fig4.4 | Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA | 35 |
| Fig4.5 | Schéma bloc de la commande directe | 37 |
| Fig4.6 | Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte | 37 |
| Fig4.7 | Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée | 38 |
| Fig.4.8 | Evolution des grandeurs relatives à la turbine | 39 |
| Fig.4.9 | Tension et Courant rotoriques de la GADA | 40 |
| Fig.4.10 | Zooms sur les tensions et courant de la phase « a » rotorique | 40 |
| Fig.4.11 | Tension et courant du réseau | 41 |
| Fig.4.12 | Zooms sur les tensions et courant de la phase « a » du réseau | 41 |
| Fig.4.13 | Tension du bus continu | 42 |
| Fig.4.14 | Zoom sur la tension continue | 42 |
| Fig.4.15 | Couple et vitesse de la GADA | 42 |
| Fig.4.16 | les superpositions des puissances actives et réactives réelles avec leurs références | 43 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|---------------|--------------------|----|
| Tableau 3.2.3 | Données de la GADA | 21 |
|---------------|--------------------|----|

SOMMAIRE

| | |
|---------------------------------|---|
| Dédicaces | |
| Remerciements | |
| Listes de notations et symboles | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Résumés | |
| Introduction générale | 7 |

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENNES

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Introduction | 8 |
| 1.2 | Energie éolienne et types d'éoliennes | 9 |
| 1.3 | Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne | 9 |
| | a Avantages | |
| | b Inconvénients | |
| 1.4 | Principe de fonctionnement d'une éolienne | 10 |
| 1.5 | Principales composantes des éoliennes à axe horizontal | 10 |
| 1.6 | <i>Zones de fonctionnement de l'éolienne</i> | 11 |
| 1.7 | Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique | 11 |
| 1.8 | Classement des types d'éoliennes | 12 |
| 1.9 | Conclusion | 13 |

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Introduction | 14 |
| 2.2 | Modélisation de la chaîne de conversion | 14 |
| | 2.2.1 Modèle de la turbine | 16 |
| | 2.2.2 Model du multiplicateur | |
| | 2.2.3 Modèle de l'arbre | 17 |
| | 2.2.4 <i>Simulation</i> | |
| 2.3 | Conclusion | 18 |

CHAPITRE 3

MODELISATION DE LA GADA ET DES CONVERTISSEURS STATIQUES

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | introduction | 19 |
| 3.2 | Modélisations de GADA | 19 |
| | 3.2.a) <i>Avantages de la GADA</i> | |
| | 3.2.b) <i>Inconvénients de la GADA</i> | |
| 3.2.1 | Equations électriques | 20 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.2 | Equation mecanique | 20 |
| 3.2.3 | Simulations et discussion | 21 |
| 3.3.1 | <i>Modélisation des convertisseurs de puissance</i> | 24 |
| 3.3.2 | <i>Modèle de convertisseur côté réseau CCR</i> | |
| 3.3.3 | <i>Modélisation de Convertisseurs d'électronique de puissance connectés au réseau</i> | |
| 3.4 | Commande M.L.I | 24 |
| 3.5 | Simulations et discussion | 25 |
| 3.6 | Conclusion | 27 |

CHAPITRE 4

COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA ET CONTROLE DE PUISSANCE DE LA CHAINE EOLIENNE

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Introduction | 28 |
| 4.2 | Commande vectoriel de la GADA | 28 |
| 4.3 | Modélisation de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique | 31 |
| 4.4 | Relation entre puissances statoriques et courants rotorique | 33 |
| 4.5 | Expressions des tensions et courants rotorique | 33 |
| 4.6 | Principe de Contrôle indépendant des puissances active et réactive | 35 |
| 4.6.1 | Commande vectorielle directe des puissances | 35 |
| 4.6.2 | Commande vectorielle indirecte des puissances | 36 |
| 4.6.3 | Commande en boucle ouverte | 36 |
| 4.6.4 | Commande en boucle fermée | 37 |
| 4.8 | Synthèse et conception du régulateur (PI) | 38 |
| 4.8.1 | Simulations et discussion | 39 |
| 4.9 | Conclusion | 43 |
| | CONCLUSION GENERALE | 44 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 45 |

Résumé :

L'énergie éolienne est une source de production d'énergie renouvelable, abordable, efficace et abondante. Le développement de la technologie éolienne à vitesse variable et à fréquence constante est devenu aujourd'hui un domaine d'intérêt majeur. Ce travail constitue une initiation et une contribuera à la recherche et au contrôle des systèmes de conversion des éoliennes.

Cette étude décrit le contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne avec un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Son stator est directement connecté au réseau, tandis que son rotor est connecté à un convertisseur statique contrôlé par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les puissances active et réactive sont contrôlées par les grandeurs du rotor (indirectement contrôlée par la boucle de puissance), le contrôle vectoriel (VOC) est appliqué pour le convertisseur MLI côté réseau électrique, et le courant du filtre et la tension du bus sont contrôlés. Cette commande a pour but d'agir sur les grandeurs rotoriques pour contrôler l'échange de puissance active et réactive produites par la machine asynchrone avec le réseau. Les résultats obtenus par simulations numériques indiquent un intérêt croissant pour la construction de tels systèmes de conversion éolienne.

Mots clés : Energies renouvelables, énergie éolienne, GADA, gestion de puissance, Commande.

Abstract

Wind energy is a renewable, affordable, efficient and abundant source of energy production. The development of variable-speed, constant-frequency wind turbine technology has become a major area of interest. This work provides an introduction to and contribution to the research and control of wind turbine conversion systems.

This study describes the control of a wind energy conversion system using a double-fed asynchronous generator (GADA). Its stator is directly connected to the grid, while its rotor is connected to a static converter controlled by pulse-width modulation (PWM). The active and reactive powers are controlled by the rotor quantities (indirectly controlled by the power loop), vector control (VOC) is applied for the PWM converter on the mains side, and the filter current and bus voltage are controlled. The aim of this control is to act on the rotor quantities to control the exchange of active and reactive power produced by the asynchronous machine with the grid. The results obtained by numerical simulations indicate a growing interest in the construction of such wind conversion systems.

Key words : Renewable energy, wind energy, GADA, power management, Control.

ملخص

تعد طاقة الرياح مصدرًا متجددًا وميسور التكلفة وفعالًا ووفيرًا لإنتاج الطاقة . أصبح تطوير تكنولوجيا توربينات الرياح متغيرة السرعة وذات التردد الثابت مجال اهتمام رئيسي يش كل هذا العمل بداية وسيساهم في البحث والتحكم في أنظمة تحويل توربينات الرياح.

تصف هذه الدراسة التحكم في نظام تحويل طاقة الرياح باستخدام مولد غير متزامن مزدوج التغذية (ADAG). يتم توصيل الجزء الثابت الخاص به مباشرة بالشبكة ، بينما يكون الجزء المتحرك متصلًا بمح ول ثابت يتم التحكم فيه عن طريق تعديل عرض النبضة (MWP). يتم التحكم في القوى النشطة والمتفاعلة بواسطة كميات الدوار (يتم التحكم فيها بشكل غير مباشر بواسطة حلقة الطاقة) ، ويتم تطبيق التحكم المتجه (COV) لمحول MWP على جانب التيار الكهربائي ، ويتم التحكم في تيار المرشح والجهد الناقل. الغرض من هذا الأمر هو العمل على كميات الدوار للتحكم في تبادل الطاقة النشطة والمتفاعلة التي تنتجها الآلة غير المتزامنة مع الشبكة. تشير النتائج التي تم الحصول عليها من خلال عمليات المحاكاة العددية إلى اهتمام متزايد ببناء أنظمة تحويل طاقة الرياح هذه.

الكلمات الدالة :

الطاقات المتجددة، طاقة الرياح، ADAG ، إدارة الطاقة ، التحكم

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies renouvelables sont devenues une solution incontournable pour répondre aux besoins énergétiques actuels tout en préservant notre planète de la pollution atmosphérique. Parmi ces énergies, celle à base d'éolienne est l'une des plus connues et des plus prometteuses. En effet, l'énergie éolienne est produite par la force du vent qui actionne les pales d'une éolienne pour générer de l'électricité. Cette énergie est propre, renouvelable et sans émission de gaz à effet de serre, ce qui la rend particulièrement attrayante pour les acteurs du secteur de l'énergie. De plus, les avancées technologiques dans ce domaine ont permis de rendre l'énergie éolienne plus compétitive sur le marché de l'énergie. Cependant, l'énergie éolienne est l'une des plus importantes et des plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement notamment car elles sont non polluantes. L'émergence des énergies renouvelables pour la production de l'électricité se caractérisent par leur stock inépuisable et durable.

Les systèmes de conversion éolienne dotée de génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) sont actuellement l'un des types de générateurs les plus couramment utilisés dans les éoliennes modernes. Ils sont très efficaces pour la production d'énergie verte et sont de plus en plus utilisés pour répondre aux besoins énergétiques croissants de la planète. Dans ce système, le stator est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté à des convertisseurs de puissance pour la gestion de la puissance active et réactive. Pour cette configuration la puissance électrique à fréquence fixe est extraite du stator tandis que le rotor du générateur est alimenté avec une tension et une fréquence variables. A cet fin, le convertisseur électronique commandé en puissance doit être utilisé pour une tension et une fréquence variables et la régulation de vitesse pour le suivi de la puissance maximale. Le principal avantage de ces systèmes est que le convertisseur électronique de puissance placé entre le rotor et le réseau gère uniquement la puissance de glissement du rotor qui est une fraction de la puissance totale.

Le mémoire est structure principalement en quatre (4) chapitres :

Le premier chapitre présente des notions et généralités sur les systèmes de conversion éolienne.

Le deuxième chapitre présente la structure, modélisation de différentes parties de la chaîne.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la GADA dans le repère de Park lié au champ tournant et ainsi que la modalisation de convertisseurs de puissance.

Le quatrième chapitre, présente les techniques de commandes pour obtenir une bonne qualité d'énergie électrique produite par le système. La commande vectorielle de la GADA, et la gestion des puissances active et réactive pour améliorer le facteur de puissance côté réseau ainsi au réglage du bus continu.

Finalement, on clôture ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

1.1 Introduction

Le vent, est une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires, l'entraînement des moulins, le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Les éoliennes convertissant l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique. [1.1-1.3]

Sachant qu'en 1891 qu'une turbine à vent générant de l'électricité a été construite.

Puis à cause de la crise pétrolière de 1974 les travaux d'amélioration de la technologie des aérogénérateurs ont réellement décollé, ce qui a permis un développement important de cette industrie de l'éolienne [1.4].

Cependant, le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés). Alors, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte par mettant ainsi de disposer de machines ayant des performances remarquables en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement.

Un système de conversion éolien (SCE) est constitué d'un générateur électrique, entraîne par une turbine éolienne à travers un multiplicateur, un système de commande, des convertisseurs statiques, un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

Une éolienne (aérogénérateur) est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (une génératrice asynchrone a double alimentation dans les dés de ce mémoire).

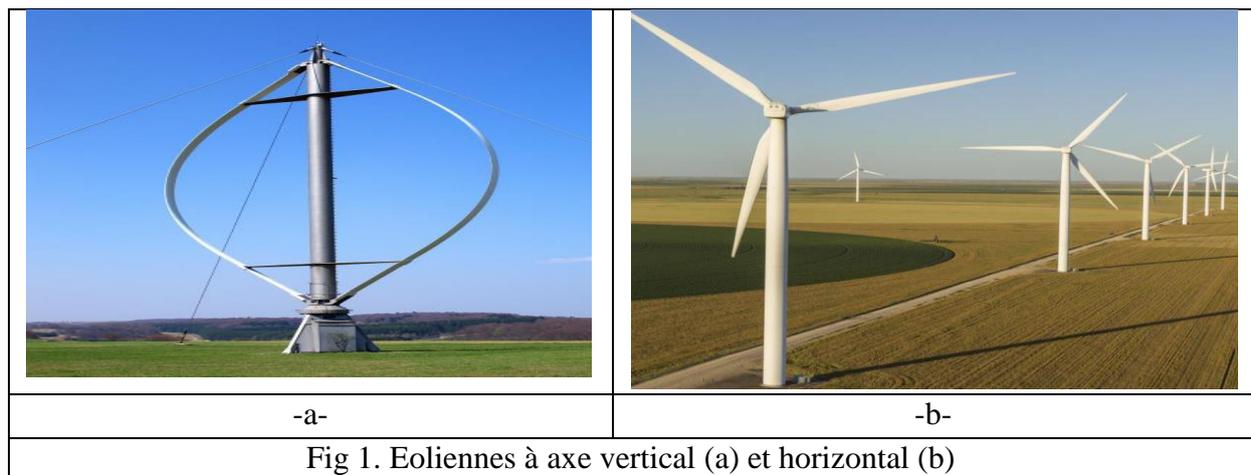
Le maximum d'énergie développé ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. Ainsi le SCE est généralement équipé d'un système de contrôle électrique (machine électrique associée à la commande) et d'un système de contrôle mécanique (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).

En Algérie, les objectifs fixés par la compagnie NEAL (New Energie Algeria) se focalisent sur l'augmentation de production d'énergies de sources renouvelables a 1400 MW d'ici 2030 et de 7500 MW a l'horizon de 2050.

I.2 Energie éolienne et types d'éoliennes

Les éoliennes sont généralement installées sur des sites élevés et exposés au vent, tels que les collines, les montagnes ou les côtes. L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable, car elle ne dépend pas des combustibles fossiles et ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle est donc considérée comme une alternative propre à l'énergie produite à partir de combustibles fossiles.

Il existe plusieurs types d'éoliennes, mais les deux principaux sont les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal comme montre les figures 1a et 1b.



1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [1.5]

a- Avantages

- l'énergie éolienne est renouvelable est non polluante, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique ;
- une source d'énergie gratuite : le vent est disponible gratuitement ;
- les fermes éoliennes sont plus petites que les centrales électriques traditionnelles, ce qui les rend plus adaptées aux zones rurales et éloignées ;
- le vent souffle régulièrement, ce qui signifie que l'énergie éolienne peut être produite de manière constante, sans interruption ou panne ;
- l'utilisation de l'énergie éolienne aide à réduire la demande en combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

b- Inconvénients

- bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur ;
- qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante ;
- impact sur les oiseaux;
- coût élevé de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

1.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

La conversion de l'énergie se fait en deux étapes :

- la première au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;
- la second niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique pour être en suite transmise au réseau électrique ;
- Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement [1.6].

1.5 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; la tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants : arbre, multiplicateur, roulements, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA, les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent). Les pales permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité. Le moyeu c'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [1.7].

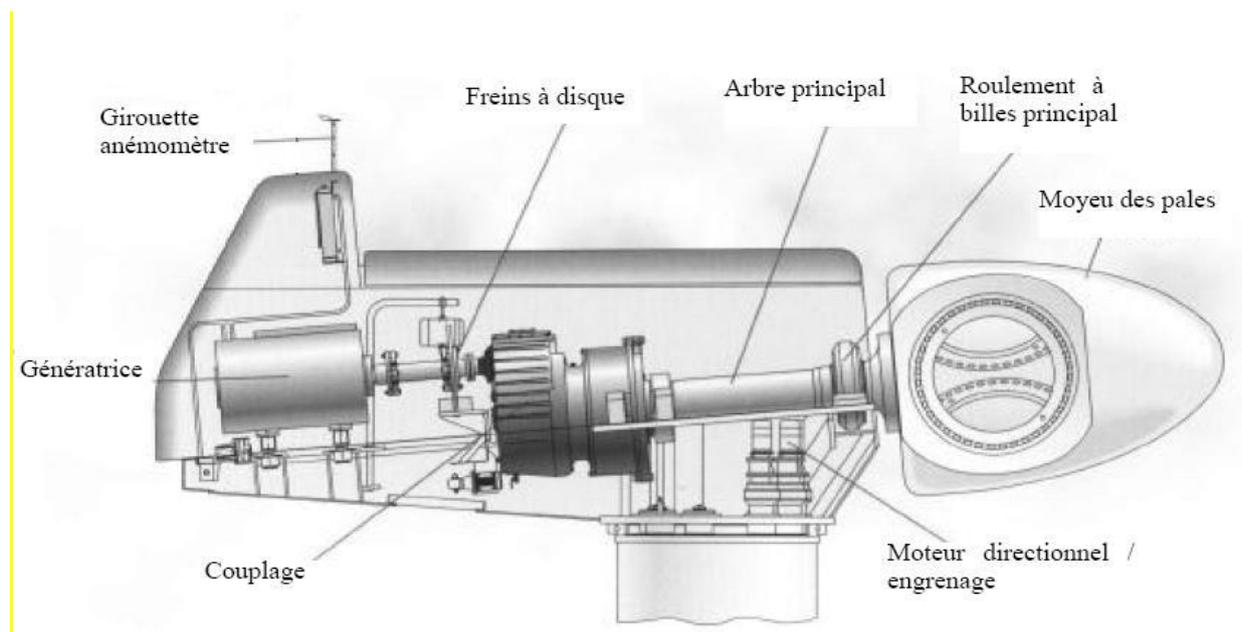


Fig 1.2 – Principales composantes intérieures de la nacelle d’une turbine éolienne

1.6 Zones de fonctionnement de l’éolienne

Généralement une éolienne fonctionne suivant la vitesse du vent des ces zones:

- Zone I : $V < VD$: la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l’énergie à capter est trop faible.
- Zone II : $VD < V < Vn$: le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l’énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- Zone III : $Vn < V < VM$: la puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine [1.8].

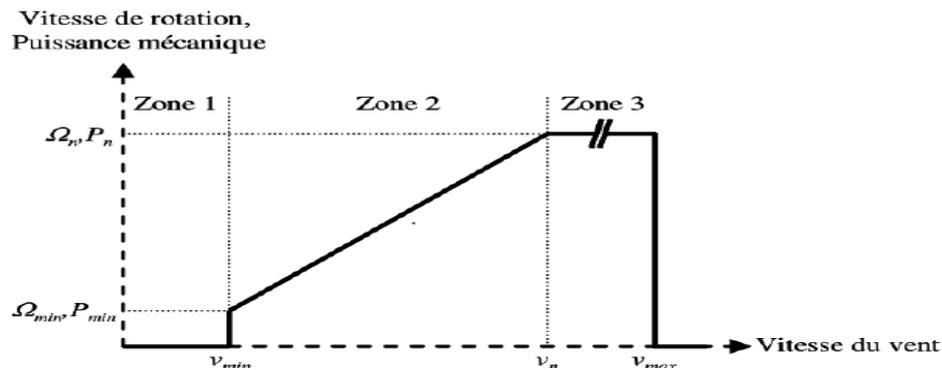


Fig 1.3 Zones de fonctionnement d’une éolienne à vitesse variable

1.7 Énergie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique

▪ Loi de Betz – notions théoriques

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit m la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des Pales en une seconde est :

$$m = \rho \cdot S \cdot V_1 + \frac{V_2}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = 0.5 \cdot m \cdot V_2 \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant « m » par son expression dans :

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)(V_2 - V_1)}{4} \quad (1.3)$$

▪ **Tube de courant autour d'une éolienne**

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P correspondante serait alors :

$$P_{mt} = R.S. \frac{V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \frac{(V_2 - V_1).2}{V_1}\right) \quad (1.5)$$

Coefficient de puissance :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p . S . V^3 . \lambda . \rho \quad (1.6)$$

Puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_m}{P_v} \quad (1.7)$$

Le coefficient de vitesse réduite :

La vitesse réduite est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \quad (1.8)$$

vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales

▪ **La limite de Betz**

Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de la turbine, seuls 1627^{nièmes} (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Coefficient de puissance:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (1.9)$$

1.8 Classement des types d'éoliennes

Voici les différents types d'éoliennes classées selon leur technologie [1.8 ,1.9] :

1-éolienne à axe horizontal : c'est le modèle le plus courant. L'éolienne est constituée d'un rotor horizontal qui tourne comme une hélice, qui est relié à un générateur électrique.

2-éolienne à axe vertical : cette éolienne à un rotor vertical qui tourne autour d'un axe vertical. Elle est moins efficace que l'éoliennes à axe horizontal mais est plus pratique dans les zones urbaines en raison de sa plus petite taille.

3-éolienne offshore : ces éoliennes sont situées sur un plan d'eau comme la mer ou un lac. Elles sont plus grandes et plus puissantes que les éoliennes terrestres et peuvent produire plus d'énergie.

4-éolienne flottante : cette éolienne est fixée sur un plateforme flottante plutôt que sur un socle fixe.

Ce type d'éolienne est particulièrement utile dans les zones où la profondeur de l'eau ne permet pas l'installation d'une éolienne offshore traditionnelle.

5-éolienne à vitesse variable : cette éolienne peut ajuster la vitesse de son rotor en fonction de la force du vent pour maximiser l'efficacité de la production d'électricité.

6-éolienne à roue de pales : cette éolienne utilise une turbine à vent à rotation horizontale plutôt qu'un rotor. Elle est plus silencieuse et nécessite moins d'entretien que les éoliennes traditionnelles.

1.9 Conclusion

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est intermittente, car elle dépend de la force du vent. Cela nécessite donc souvent d'avoir une source d'énergie de secours pour pallier à ce manque, tel que des centrales thermiques ou des batteries de stockage d'énergie et aussi des commandes faibles pour extraire le maximum de puissance et ce quelque soient les conditions climatiques, notamment, la vitesse du vent.

L'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. En effet, elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre. Néanmoins, l'énergie éolienne reste une source d'énergie propre, abondante et prometteuse pour l'avenir de notre planète [10].

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA CHAÎNE EOLIENNE

2.1 Introduction

La modélisation de l'énergie éolienne consiste à modéliser le comportement des différents éléments d'un système éolien, à savoir les éoliennes, les générateurs, les transformateurs, les réseaux électrique. Cette modélisation permet d'analyser le fonctionnement du système et de prédire sa performance en fonction des différentes conditions météorologiques.

La modélisation de l'énergie éolienne intègre également la modélisation du générateur, qui convertit l'énergie mécanique fournie par l'éolienne en énergie électrique. Cette modélisation se base sur les caractéristiques électromécaniques du générateur et sur les lois physiques de l'électricité.

2.2 Modélisation de la chaîne de conversion

2.2.1 Modèle de la turbine

La puissance mécanique sur l'arbre du rotor extraite de la turbine éolienne dépend du coefficient aérodynamique de puissance $C_p(\lambda, \theta)$, la vitesse V_w du vent donnée et peut être représentée par :

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_w^3 \quad (2.1)$$

Avec :

ρ : Densité de l'air, environ 1.225 Kg/m^3 ; R : rayon de l'aérogénérateur et V_w : vitesse du vent
Le couple produit par la turbine est égal au produit de la puissance mécanique et la vitesse du vent W_t .

$$T_t = \frac{P_w}{W_t} \quad (2.2)$$

Le couplage mécanique entre la turbine et le générateur est normalement assuré par une boîte de vitesses (multiplicateur) dont le rapport d'engrenage $\zeta = \omega_m / \omega_t$ est choisie de manière à maintenir la vitesse de l'arbre du générateur dans une plage de vitesse désirée. En négligeant les pertes du transmission de la boîte de vitesse, le couple de la turbine éolienne visé du côté de la génératrice peut être représentée par :

$$T_m = \frac{T_t}{\zeta} \quad (2.3)$$

Où , T_m est le couple d'entraînement agissant sur l'arbre du générateur et T_t est le couple de l'arbre de la turbine renvoyée au côté du générateur. En se basant sur l'équation.

il est évident qu'une éolienne ne génère que certaine pourcentage de puissance lorsqu'elle est associée à une turbine éolienne. Ce pourcentage dépend du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \theta)$,

pour chaque éolienne et peut être définie en fonction de la vitesse spécifique, λ donnée par l'équation:

$$\lambda = \frac{W_t.R}{V_W} \tag{2.4}$$

Lorsque la puissance éolienne disponible dépasse la puissance nominale du générateur, il est nécessaire de limiter l'apport de la turbine éolienne. Ceci est réalisé par le contrôle de l'angle d'orientation des pales θ (pitch angle). A cet effet θ est contrôlé de façon que l'éolienne devrait produire autant d'énergie que possible et à puissance nominale du générateur.

Si la vitesse spécifique λ et l'angle d'orientation des pales sont donnés, le coefficient aérodynamique de puissance, $C_p(\lambda, \theta)$ peut être approximé par :

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5\right)e^{-12.5/\lambda_i} \tag{2.5}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \tag{2.6}$$

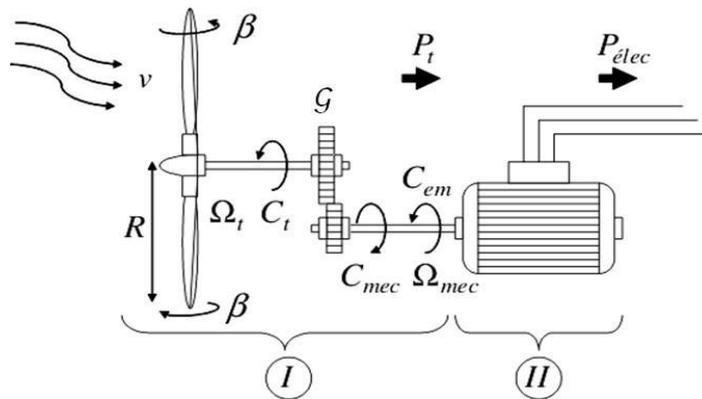


Fig 2.1 : Modèle de la turbines éolienne

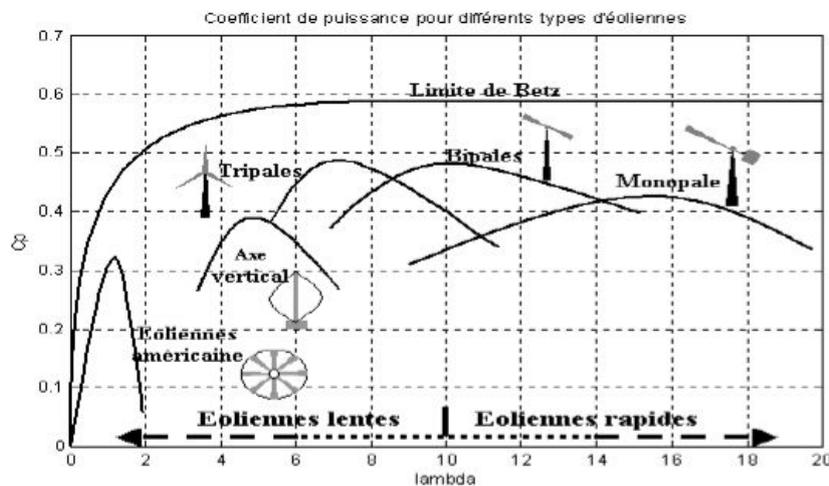


Fig 2.2 : C_p en fonction de λ pour différentes turbines

Les courbes donnant le coefficient de couple dans les systèmes à axe vertical indiquent qu'il évolue de manière identique.

- Ces courbes $C_p(\Omega)$ montrent clairement l'avantage des axes horizontaux en termes de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines, ...).
- Les courbes $C_p(\Omega)$ sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2, 1) par rapport aux axes verticaux ou aux multiples.

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P}{\Omega} = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega} \quad (2.7)$$

2.2.1 Model du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (2.8)$$

Où :

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

G : Rapport de multiplication (-).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (2.9)$$

Ω_{mec} : Vitesse du générateur (rad/s mécanique).

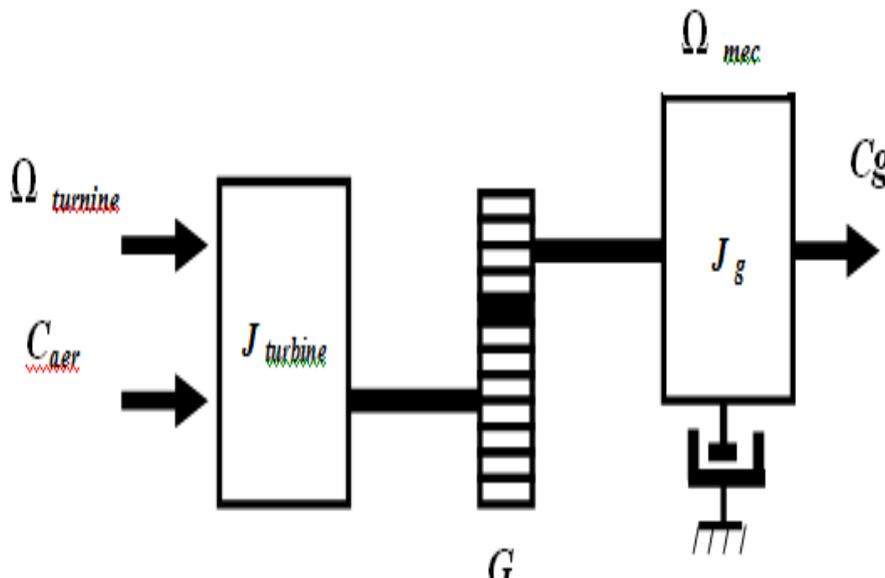


Fig 2.3 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

2.2.3 Modèle de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J = \frac{\Omega_{mec}}{dt} = C_t - k_f \Omega_{mec} \tag{2.10}$$

J : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$).

$C_t = C_{mec} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne ;

k_f : Coefficient de frottements visqueux

C_{em} : Couple électromagnétique du générateur en (N.m)

L'inertie totale est :

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + j \text{ Générateur} \tag{2.11}$$

Modèle à une masse ramenée sur l'arbre lent :

L'inertie de la turbine est ramenée sur l'arbre lent :

$$\Omega_g = \Omega LS \tag{2.12}$$

Les équations des entraînements mécaniques deviennent :

$$J_t \frac{d\Omega_t}{dt} = T_g + GTHS - k\Omega_t \tag{2.13}$$

$$GJm \frac{d\Omega_t}{dt} = THS - Gk_f\Omega_t - Tem \tag{2.14}$$

Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide : Lorsque le modèle à une masse est ramené sur l'arbre rapide alors, en faisant les mêmes hypothèses que précédemment, l'équation :

$$\frac{J_t}{G} \frac{d\Omega_m}{dt} \tag{2.15}$$

2.2.3 Simulation

La figure (2.4) représente la relation calculée entre le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \theta)$ et la vitesse spécifique, λ pour différents angles θ en utilisant des paramètres d'éoliennes donnés en annexes. Il ressort de ce chiffre λ qu'il ya une valeur qui assure une puissance maximale capturée à partir du vent pour chaque angle de calage [2.4, 2.5].

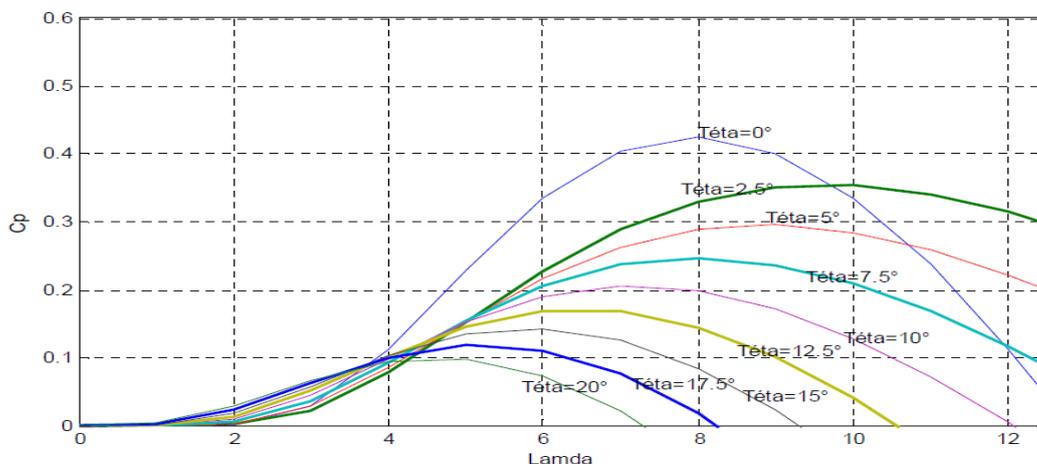


Fig. 2.4 Caractéristiques $C_p(\lambda, \theta)$ pour différentes valeurs d'angles de calage.

En d'autres termes on affirme que pour chaque vitesse du vent, la machine va tourner de telle sorte qu'elle capte le maximum de la puissance disponible.

En se basant sur les relations (2.6), (2.7) et (2.8) on peut tracer une caractéristique Puissance-Vitesse pour différentes vitesses du vent.

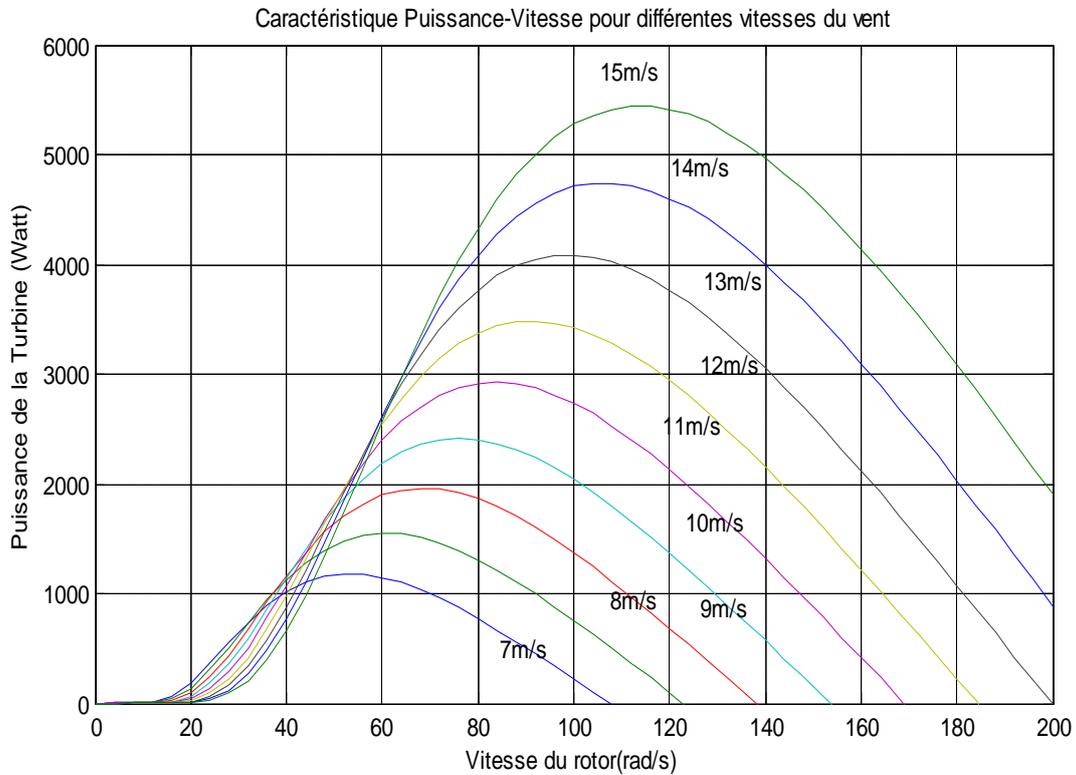


Fig. 2.5 Caractéristiques Puissance-Vitesse pour différentes vitesse du vent.

2.3 Conclusion

La modélisation des différents dispositifs formant l'éolienne ont fait l'objet du contenu de ce chapitre. Une fois le principe et le rôle des composants est défini, une programme de simulation sous MatLab a été développé et les caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ est de la puissance en fonction de la vitesse du vent on été développées et montrées.

CHAPITRE 3

MODELISATION DE LA GADA ET DES CONVERTISSEURS STATIQUES

3.1 Introduction

Le système éolien à vitesse variable basé sur la (GADA) est le plus utilisé dans les fermes terrestres. Son principal avantage est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la GADA, ce qui engendre un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions utilisées.

La chaîne éolienne étudiée correspond à une génératrice asynchrone à double alimentation et principalement deux convertisseurs de puissance dans leurs modélisations en vue de la commande et la simulation numérique à fait l'objet du contenu de troisième chapitre de ce mémoire. À cet effet, en plus de notions techniques les différentes modélisations et techniques de commande, notamment de l'onduleur sont présentées et discutées.

3.2 Modélisations de GADA

La génératrice asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.

Comme la génératrice asynchrone à cage, la GADA peut fonctionner en moteur et en générateur. La différence réside dans le fait que pour la GADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement mais la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Cette propriété fondamentale a fait de la GADA un meilleur choix pour des entraînements à vitesse variable [3.1-3.4].

a) Avantages de la GADA

- Une grande flexibilité et une grande précision lors des contrôles du flux et du couple électromagnétique grâce à l'accès au rotor qui offre la possibilité de contrôler ses grandeurs électriques (courant et tension) ;
- La possibilité de partager le courant magnétisant entre les deux armatures de la machine en fonctionnement moteur ;

La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse du synchronisme ;

- La possibilité de fonctionner en régime dégradé grâce à la configuration des deux convertisseurs alimentant la machine ;
- La possibilité de partager le courant magnétisant entre les deux armatures de la machine en fonctionnement moteur ;
- Le transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ;
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ;
- Le fonctionnement à vitesse de rotation variable.

b) Inconvénients de la GADA

- ✚ Des dimensions plus grandes que celles des autres machines asynchrones classiques ;
- ✚ Généralement, elle est plus longue à cause du système balais-bagues ;
- ✚ Elle est moins fiable que celle à cage à cause de la présence du système balais-bagues et le bobinage du rotor ;
- ✚ Le coût de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques (maintenance périodique du système bagues-balais) ;
- ✚ L'utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus grand que celui des autres machines classiques.

3.2.1 Equations électriques

Les équations des tensions électriques qui régissent la GADA sont [3-5] :

$$\begin{cases} V_s = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.2.2 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + k_f \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \tag{3.4}$$

Avec :

C_{em} : le couple électromagnétique de la machine;

C_r : le couple résistant;

k_f : le coefficient de frottement visqueux de la GADA;

Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la GADA;

J : l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [(M_{sr}) \cdot (I_r)] \tag{3.5}$$

Où, p est le nombre de paires de pôles de la GADA.

3.2. 3 Simulations et discussion

Les données de la GADA sont consignées dans le tableau 3.1 suivant :

| | | | |
|-----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Resistance du Stator | $R_s = 0.455\Omega$ | Tension nominale du stator | $V_s = 398$ |
| Resistance du rotor | $R_r = 0.19\Omega$ | Fréquence nominale stator | $f = 50\text{Hz}$ |
| Inductance statorique | $L_s = 0.07\text{H}$ | Moment d'inertie | $J = 0.2\text{kgm}^2$ |
| Inductance rotorique | $L_r = 0.0213\text{H}$ | Coefficient de frottement | $f = 0.0016;$ |
| Inductance mutuelle | $M = 0.034\text{H}$ | Nombre de pôles | $2p = 4$ |

Pour cette machine, les figures suivantes montrent les résultats de simulations lorsque la GADA est alimentée au stator et au rotor par des tensions sinusoïdale, en imposant un profil de vitesse du rotor montré par la figure 3.1. On remarque que ce dernier est formé par une vitesse constante au départ ($w_r = 40$ rd/s entre (0-0,3s)) puis la vitesse augmente linéairement et progressivement de 40rd/s à 80rd/s. Puis à 0.9s, elle augmente à 100rd/s.

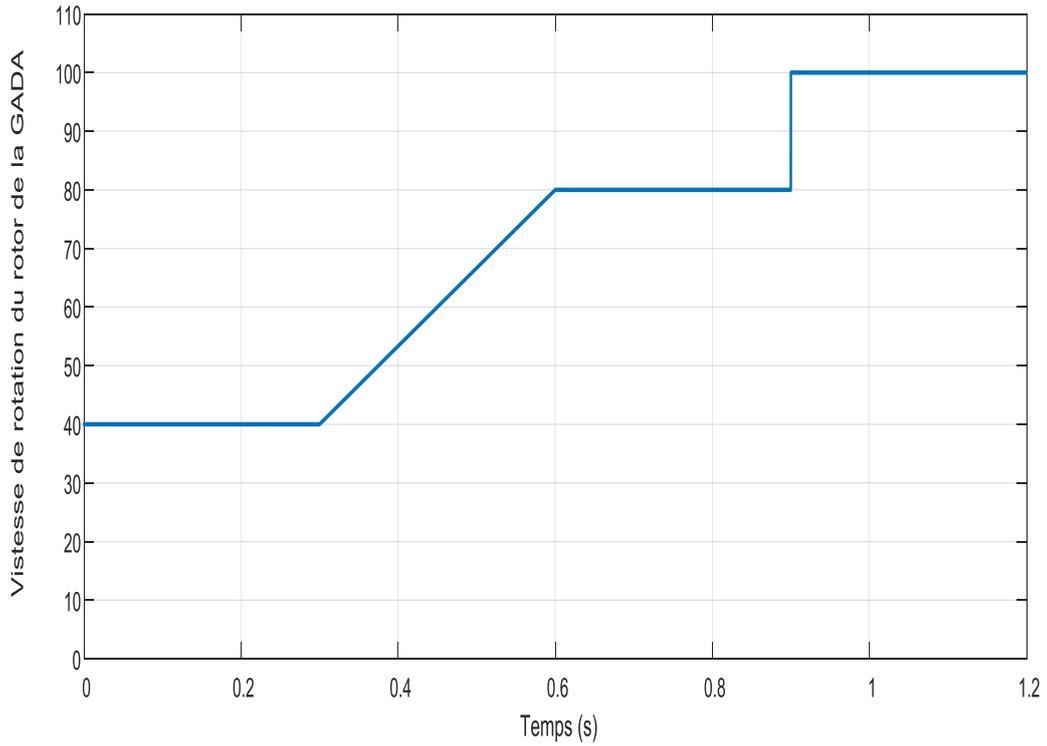


Fig. 3.1 Profile de la vitesse de rotation de la GADA

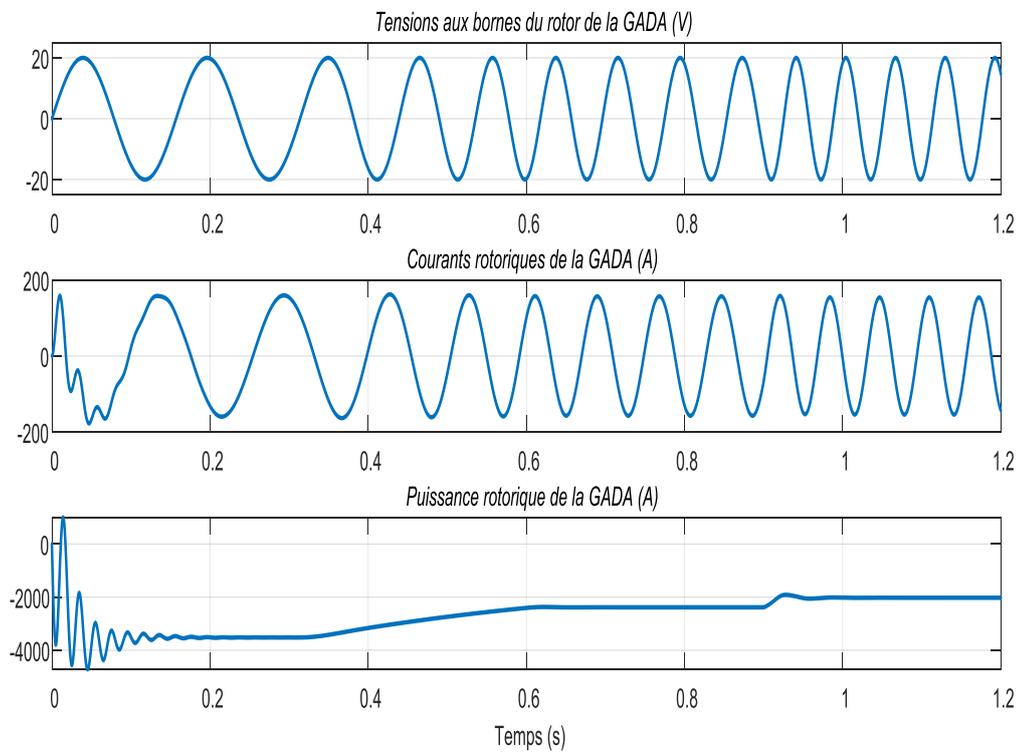


Fig. 3.2 Tension, courant et puissance de la GADA

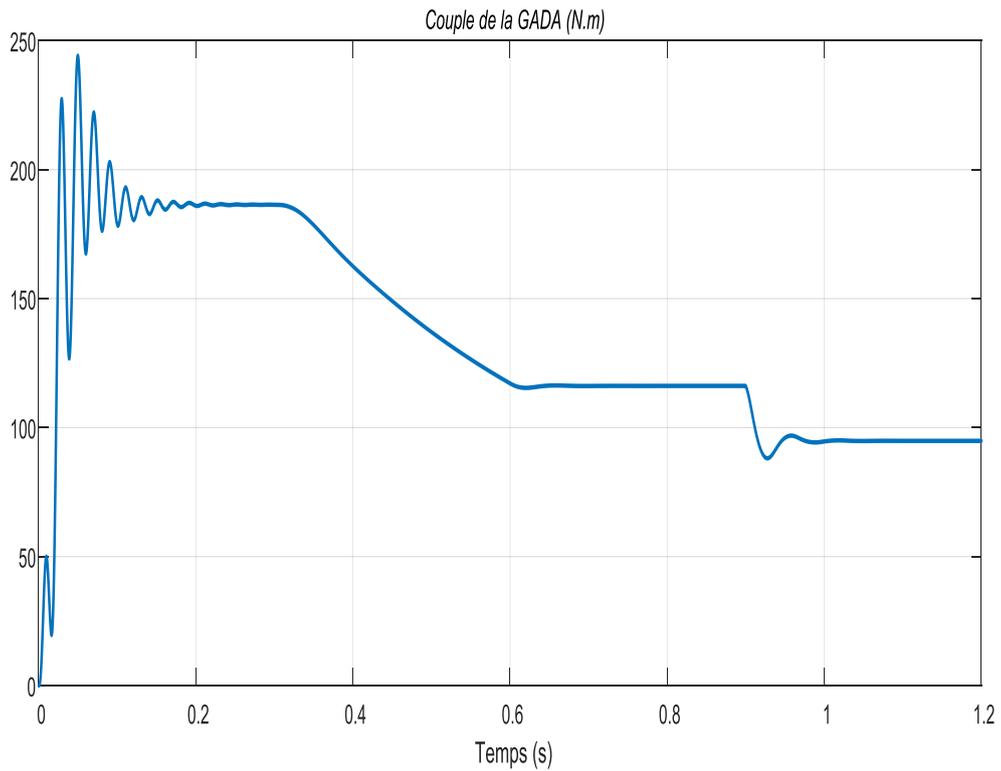


Fig. 3.3 Couple de la GADA

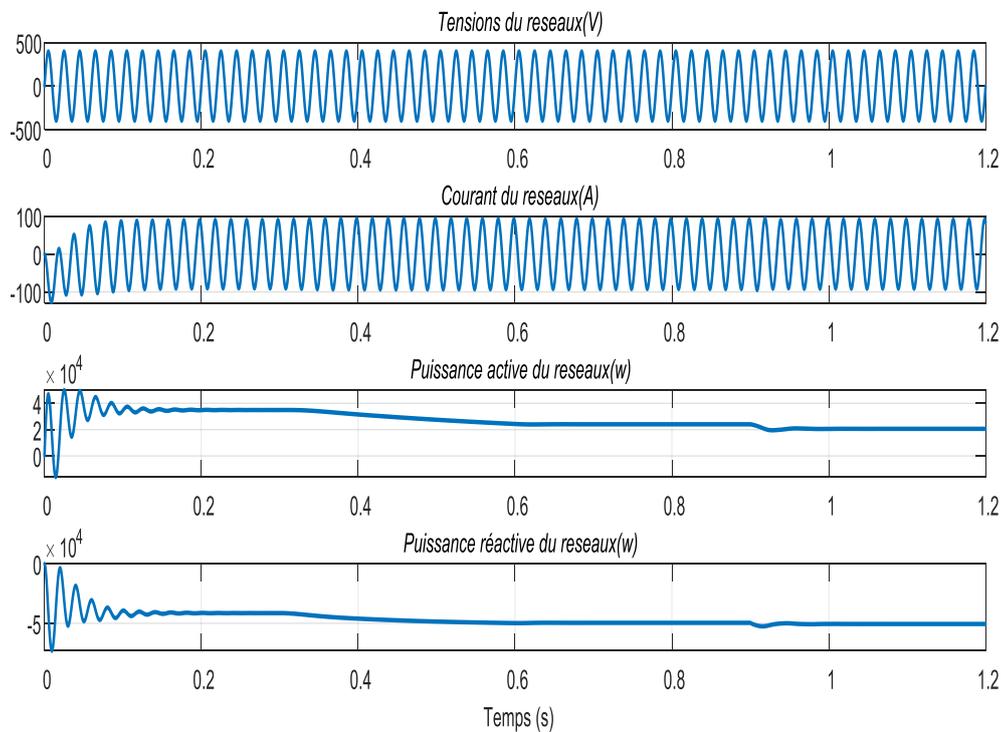


Fig. 3.4 Tension, courant, puissances active et réactive de GADA

3.3 Modélisation des convertisseurs de puissance

Le convertisseur de puissance est composé de deux parties principales, à savoir le redresseur et l'onduleur. Ces deux composants sont constitués de dispositifs d'électroniques de puissance tels que les diodes et les transistors. Les redresseurs et onduleurs triphasés utilisés pour ce système hybride sont des convertisseurs de puissance bidirectionnels et contrôlés. Ce type de convertisseur peut donc fonctionner à la fois comme onduleur et comme redresseur, en fonction de la direction et du type d'énergie électrique qui les traverse.

3.3.1 Modélisation de Convertisseurs d'électronique de puissance connectés au réseau

Les convertisseurs de puissance sont largement utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE). Dans les SCEE à vitesse fixe, les convertisseurs sont utilisés pour réduire le courant d'appel et les oscillations de couple pendant le démarrage du système, tandis que les SCEE à vitesse variable sont utilisés pour contrôler la vitesse / couple du générateur et

la puissance active / réactive au réseau. Selon les puissances nominales du système et le type d'éoliennes, diverses configurations de convertisseurs de puissance sont disponibles pour le contrôle optimal des systèmes d'énergie éolienne

3.3.1 Modèle de convertisseur côté réseau CCR

Le système côté réseau est composé d'un convertisseur, d'un filtre et de la tension du réseau comme le montre la figure 3.5.

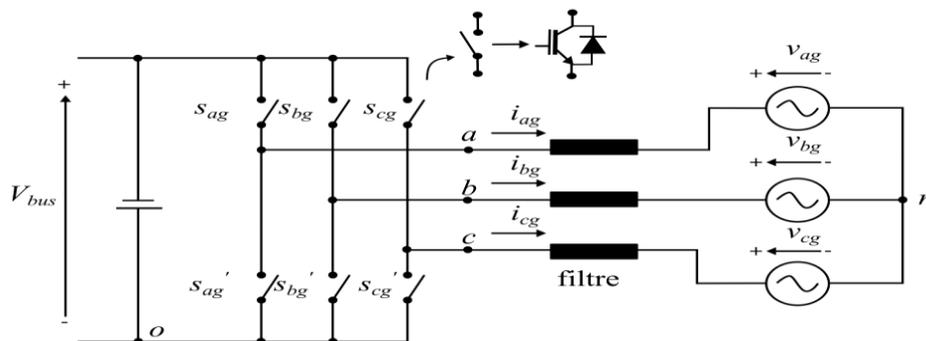


Fig.3.5 Convertisseur coté réseau CCR

Le convertisseur à deux niveaux est modélisé avec des commutateurs idéaux, où le courant peut circuler dans les deux sens. Les commutateurs sont commandés par des déclencheurs désignés par S_{a-g} , S_{b-g} et S_{c-g} , qui sont générés par la méthode de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les interrupteurs d'un même bras sont à commande complémentaire.

Soit,

$$s_i = \overline{s_i} \quad \text{avec } i = a, b, c$$

3.4 Commande M.L.I

Cette méthode consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales (modulatrices) propres à chaque phase à un signal triangulaire (porteuse) commun pour les trois phases. On a :

$$V_{ref}(i) = V_{ref\ max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_m \cdot t - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

Avec: $i = 1, 2$ et 3 indices respectifs aux numéros des trois (3) phases. $V_{ref\ max}$: amplitude de la tension de référence ; f_m : fréquence des modulatrices.

Les instants de commutation t_1 et t_2 sont déterminés comme montré par la figure 3.7.

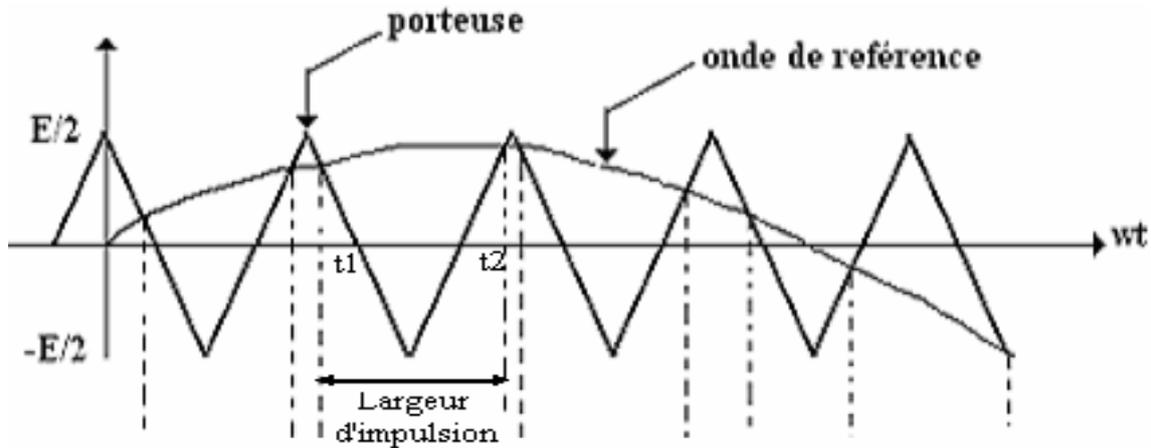


Fig. 3.7 Détermination des instants d'échantillonnage

La commande MLI est principalement caractérisée par l'indice de modulation qui est défini comme le rapport de la fréquence de la porteuse sur celle de la modulation (référence) et aussi l'indice de réglage (r) représentant le rapport entre l'amplitude de la référence sur celle de la porteuse.

3.4.1 Simulations et discussion

Les signaux de commande selon la stratégie de modulation de largeur d'impulsion, les signaux de références et de porteuse sont représentés en haut, celle des états d'impulsion du semi-conducteur de la phase « a » au milieu et enfin la tension de sortie de la phase « a » de l'onduleur triphasé sont représentés par les figures 3.5, 3.6, 3.7, respectivement pour un indice de modulation de 9, 15 et 21 avec un indice de réglage $r=0,8$.

On remarque que plus m signaux la sortie se rapproche de plus en plus de la forme sinusoïdale. Les figures (3.8 ; 3.9 et 3.10) représentent chacune à son tour les tensions de commande (référence et porteuse) les impulsions pour la commande de semi-conducteur et la tension de sortie, respectivement, pour $m=9$, $m=15$ et $m=21$ toutes pour un indice de réglage de 0,8.

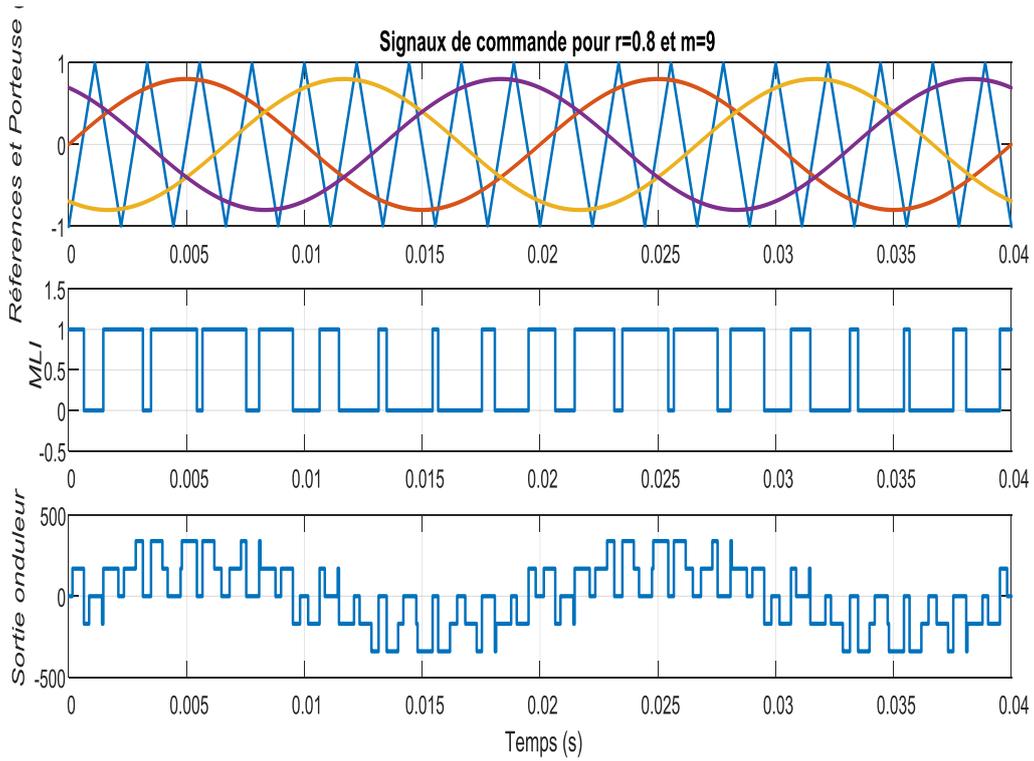


Fig. 3.5 Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour $m=9$

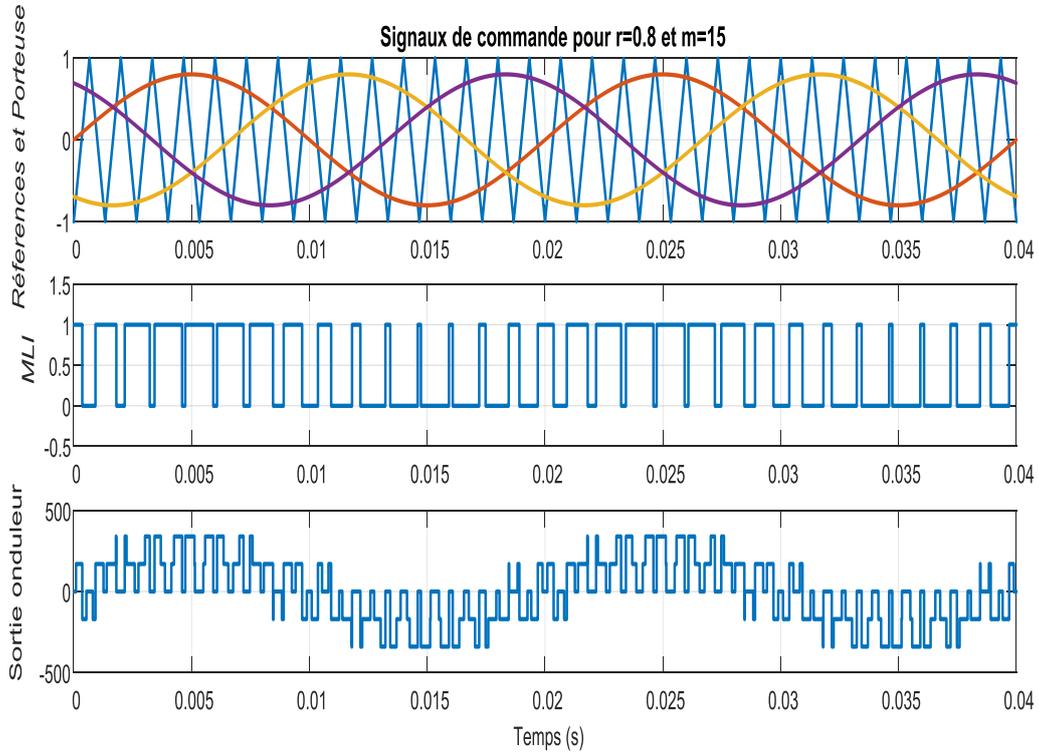


Fig. 3.6 Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour $m=15$

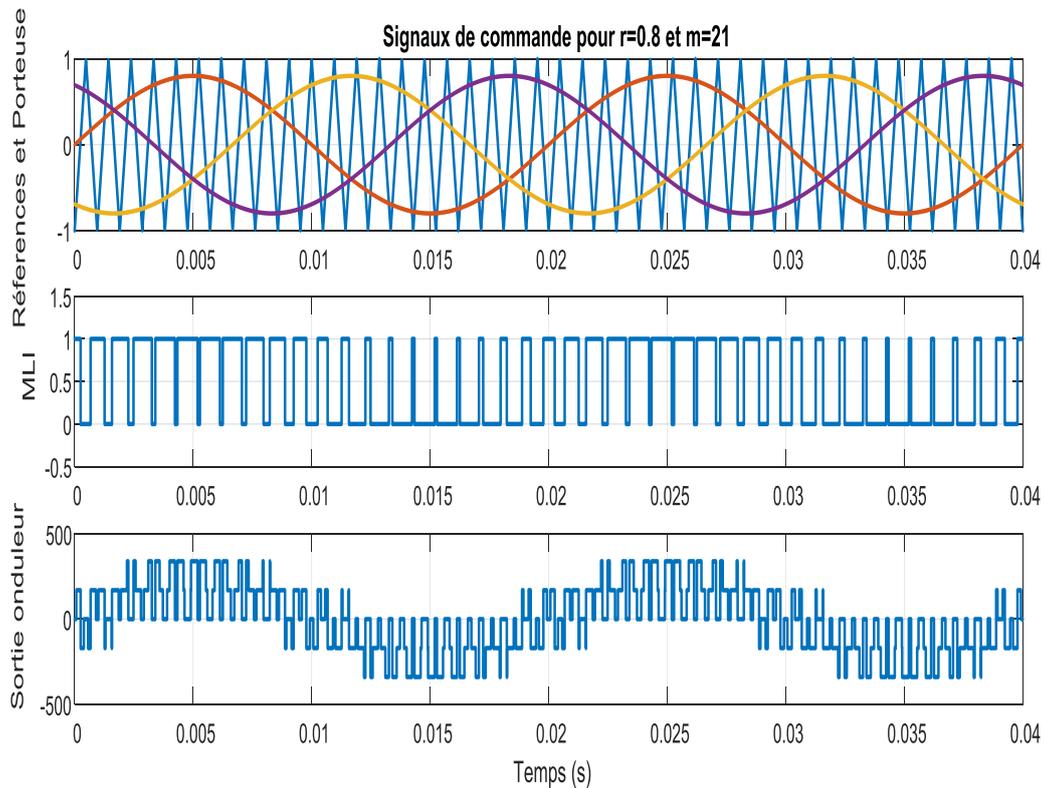


Fig. 3.7 Signaux de commande et de sortie de l'onduleur pour $m=21$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de sa commande ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (d, q) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande. Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte le redresseur, le filtre et l'onduleur. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI à hystérésis pour le commander. La modélisation de la GADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande.

CHAPITRE 4

COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA ET CONTROLE DE PUISSANCE DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous considérons en plus de la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation, nous développons le contrôle de gestion de puissances. Nous ferons à ce que la puissance active suite correcteur sa valeur de référence et cette réactive on lui impose une valeur nulle pour assurer un bouchonneur à facteur de puissance unitaire. Les performances de l'installation seront discutées grâce à des simulations numériques.

4.2 Commande vectorielle de la GADA

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatives. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon à ce que l'une des composantes commande le couple et l'autre commande le flux en supposant que le référentiel est lié au champ tournant et que le flux statorique est orienté sur l'axe d :

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on néglige la résistance du bobinage statorique $R_s=0$ on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \text{ donc } \varphi_s = \frac{V_{qs}}{\omega_s} = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (4.2)$$

Les expressions des puissances active et réactive statoriques sont alors données, respectivement, à partir des expressions 4.3 et 4.4 pour avoir finalement, grâce à la commande vectorielle les relations suivantes :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (4.3)$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \quad (4.4)$$

$$P_s = V_s \cdot I_{qs} \quad (4.5)$$

$$Q_s = V_s \cdot I_{ds} \quad (4.6)$$

À partir des expressions des flux statoriques nous pouvons écrire :

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \quad \text{d'où} \quad I_{ds} = \frac{\varphi_{ds} - M \cdot I_{dr}}{L_s} \quad (4.7)$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad \text{d'où} \quad I_{qs} = \frac{-M \cdot I_{qr}}{L_s} \quad (4.8)$$

En remplaçant les courants statoriques (I_{ds} , I_{qs}) obtenus dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \quad (4.9)$$

$$Q_s = \frac{V_s Q_s}{L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \quad (4.10)$$

En remplaçant par $\frac{V_s}{\omega_s} = \frac{V_{qs}}{\omega_s}$ alors les expressions des puissances deviennent :

$$P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \quad (4.11)$$

$$Q = \frac{V_s \theta_s}{L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \quad (4.12)$$

Les expressions des tensions rotoriques, sachant que : φ_{dr} en fonction de

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \quad (4.13)$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot \left(\frac{\varphi - M * I_{dr}}{L_s} \right) \quad (4.14)$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot \frac{\frac{V_s}{\omega_s} M I_{dr}}{L_s} \quad (4.15)$$

$$\varphi_{dr} = I_{dr} \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \quad (4.16)$$

φ_{qr} en fonction de I_{dr} :

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \quad (4.17)$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot \frac{-M \cdot I_{qr}}{L_s} \quad (4.18)$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} - \frac{M^2}{L_s} I_{qr} \quad (4.19)$$

$$\varphi_{qr} = I_{qr} \cdot \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] \quad (4.20)$$

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$V_{dr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] - g \cdot W_s \cdot I_{qr} - \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] \quad (4.21)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + g \cdot W_s \cdot I_{dr} \cdot \left[L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + g \frac{M V_s}{L_s} \quad (4.22)$$

En posant ($\sigma.L_r = L_r \cdot \frac{M^2}{L_s}$) nous avons alors :

$$V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{dI_{dr}}{dt} \cdot \sigma.L_r - g.W_s \cdot I_{qr} \cdot \sigma.L_r \tag{4.23}$$

$$V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{dI_{qr}}{dt} \cdot \sigma.L_r - g.W_s \cdot I_{dr} \cdot \sigma.L_r + g \frac{MV_s}{L_s} \tag{4.24}$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées rotorique diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - g.W_s \cdot I_{qr} \cdot \sigma.L_r \tag{4.25}$$

$$V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + g.W_s \cdot I_{dr} \cdot \sigma.L_r + g \frac{MV_s}{L_s} \tag{4.26}$$

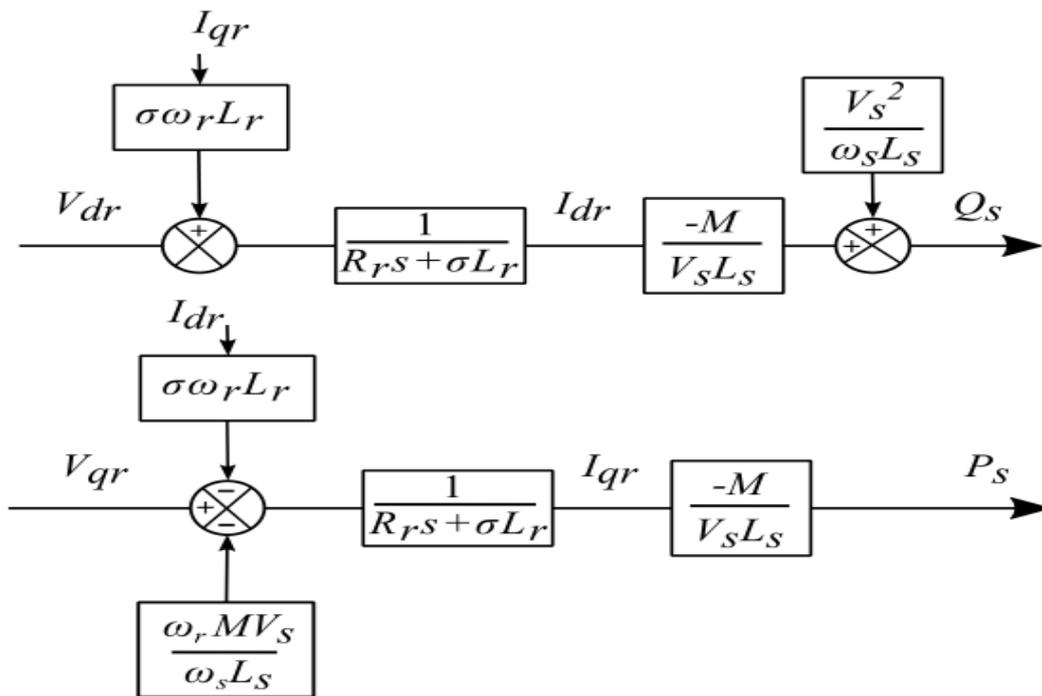


Fig. 4.1 Modèle simplifié du GADA

Le modèle mathématique est créé par l'application de la transformation de Park qui consiste à transformer le système d'enroulements triphasés d'axes *abc* en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes *dq* créant la même force magnétomotrice tournant à la même vitesse du champ statorique. L'analyse de la GADA basée sur la transformation de Park aboutit à des relations liées au repère d'observation choisi (Figure 4.2).

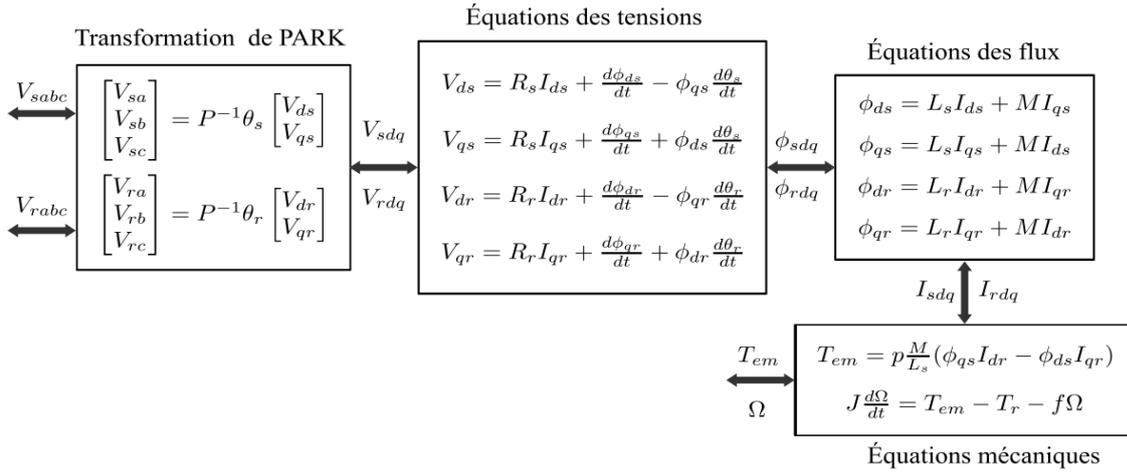


Fig.4.2 Modèle du GADA dans le référentiel dq.

4.3 Modélisation de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique

Pour commander la génératrice MADA par la méthode d'orientation du flux statorique, il est sage de choisir le repère d-q lié au champ tournant statorique, qui est relatif à la fréquence de 50Hz (fréquence du réseau électrique). Ainsi, le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique.

A fin de réaliser l'orientation du flux statorique, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de Park selon les équations :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \quad (4.27)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (4.28)$$

$$V_{rd} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \quad (4.29)$$

$$V_{rq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} - (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \quad (4.30)$$

Si on oriente le flux statorique selon l'axe dd pour que la composante suivant l'axe qq soit constamment nulle ($\phi_{sq}=0 \quad \phi_{sd}=\phi_s$), le modèle de la machine dans ce cas devient :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} \quad (4.31)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \quad (4.32)$$

$$V_{rd} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \quad (4.33)$$

$$V_{rq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} - (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \quad (4.34)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisées pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine en régime permanent se réduisent à la forme suivante :

$$V_{sd}=0 \quad (4.35)$$

$$V_{sq}=V_s=(\omega_s)\phi_s \quad (4.36)$$

$$V_{rd} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \quad (4.37)$$

$$V_{rq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} - (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \quad (4.38)$$

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

$$\phi_{sd} = \phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \quad (4.39)$$

$$0 = L_s \cdot I_{sq} + L_m \cdot I_{rq} \quad (4.40)$$

$$\phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \quad (4.41)$$

$$\phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \quad (4.42)$$

Dans ce cas, on peut définir les courants statoriques en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$I_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \quad (4.43)$$

$$I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (4.44)$$

En remplaçant le flux $\phi_{sd} = \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ dans l'équation (4.39), on trouve :

$$I_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \quad (4.45)$$

$$I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (4.46)$$

Par ailleurs, l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \phi_{sd} I_{rq} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \frac{V_s}{\omega_s} I_{rq} \quad (4.47)$$

4.4 Relation entre puissances statoriques et courants rotorique :

Les expressions des puissances active et réactive statoriques de la machine dans le repère de Park peuvent être exprimées par les équations

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (4.48)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq}) \quad (4.49)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté ($V_{sd}=0$), ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_s I_{sq}) \quad (4.50)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_s I_{sd}) \quad (4.51)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions (4.50) dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (4.52)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{L_m}{L_s} V_s I_{rd} \right) \quad (4.53)$$

Il ressort de l'expression (III.8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$

4.5 Expressions des tensions et courants rotorique

Exprimant d'abord les flux rotorique d'après les équations (4.53), en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les équations (4.54) :

$$\varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \quad (4.54)$$

$$\varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \quad (4.55)$$

En intégrant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (4.54), donc on trouve :

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \quad (4.56)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \quad (4.57)$$

En examinant les équations (4.56) et (4.57), on peut déterminer et élaborer un modèle pour contrôler les puissances (fig4.3).

La formule $g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)$ désigne le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature.

En vue des faibles glissements, ce terme de couplage peut être rejeté pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Néanmoins, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; dans ce cas, il est important de considérer des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

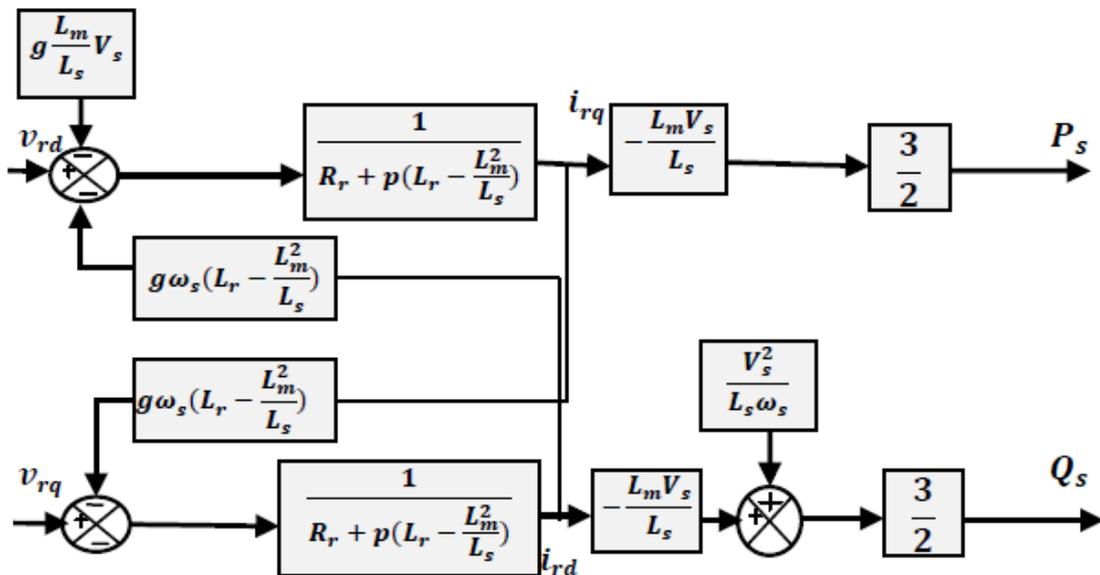


Fig. 4.3 Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA

4.6 Principe de Contrôle indépendant des puissances active et réactive

Nous résumerons deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette génératrice GADA :

-La méthode 1 : consiste à rejeter les termes de couplage et à déposer en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette technique est appelée : méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice

-La méthode 2 : consiste à estimer des termes de couplage et à les compenser pour obtenir un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotorique. Cette technique est appelée : méthode indirecte obtenue directement des équations (4.56) et (4.57).

4.6.1 Commande vectorielle directe des puissances

Cette stratégie de commande a été proposée par **Blaschke**. Donc, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué.

Si l'on remarque l'équation (4.58), on s'aperçoit que les courants rotorique sont linéaux puissances actives et réactives par le terme $\frac{L_m V_s}{L_s}$

De même, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système disparaissent en régime permanent. Donc ont écrit :

$$V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \tag{4.58}$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \tag{4.59}$$

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

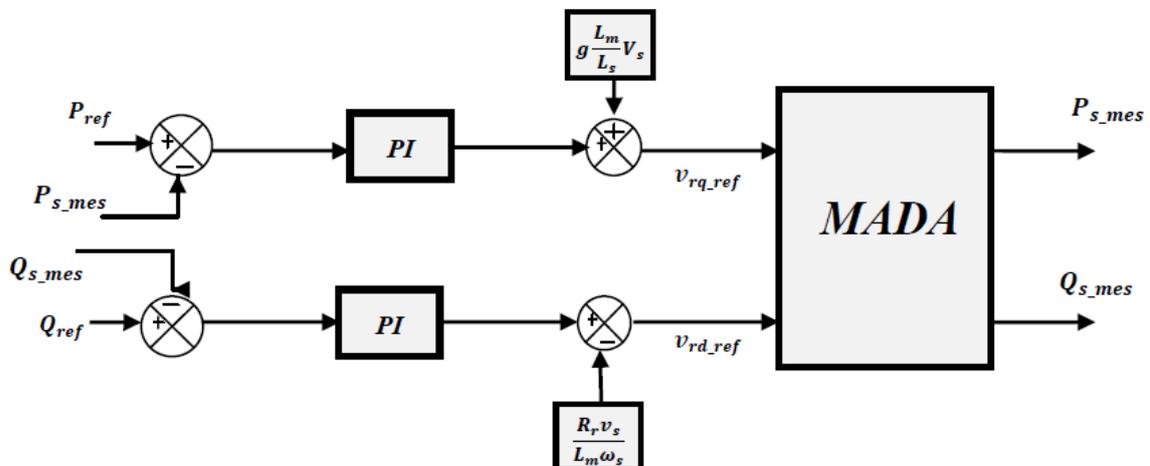


Fig.4.4 Schéma bloc de la commande directe

L'effet du terme de couplage $g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_s$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{L_m V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe.

4.6.2 Commande vectorielle indirecte des puissances

Cette méthode consiste à récapituler l'opération de contrôle à partir de l'inversement de la fonction de transfert du système à réguler, pour établir les tensions rotoriques de référence en fonction des puissances active et réactive au niveau du stator[23, 32, 75]. On recherche donc à former les équations des puissances active et réactive d'une coté et des tensions rotoriques d'autre part en fonction des courants rotoriques tout en tenant compte du modèle mathématique de la génératrice.

4.6.3 Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est fondamentalement basée sur la proposition d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle comporte à asservir non plus les puissances mais plus précisément indirectement les courants rotoriques en n'utilisant pas non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q. A partir des équations de la puissance active et réactive statoriques du système (III.8), on peut conclure les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$I_{rq-ref} = -\frac{2L_s}{3L_m V_s} P_{sref} \quad (4.60)$$

$$I_{rd-ref} = -\frac{2L_s}{3L_m V_s} Q_{sref} + \frac{V_s}{\omega_s L_m} \quad (4.61)$$

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

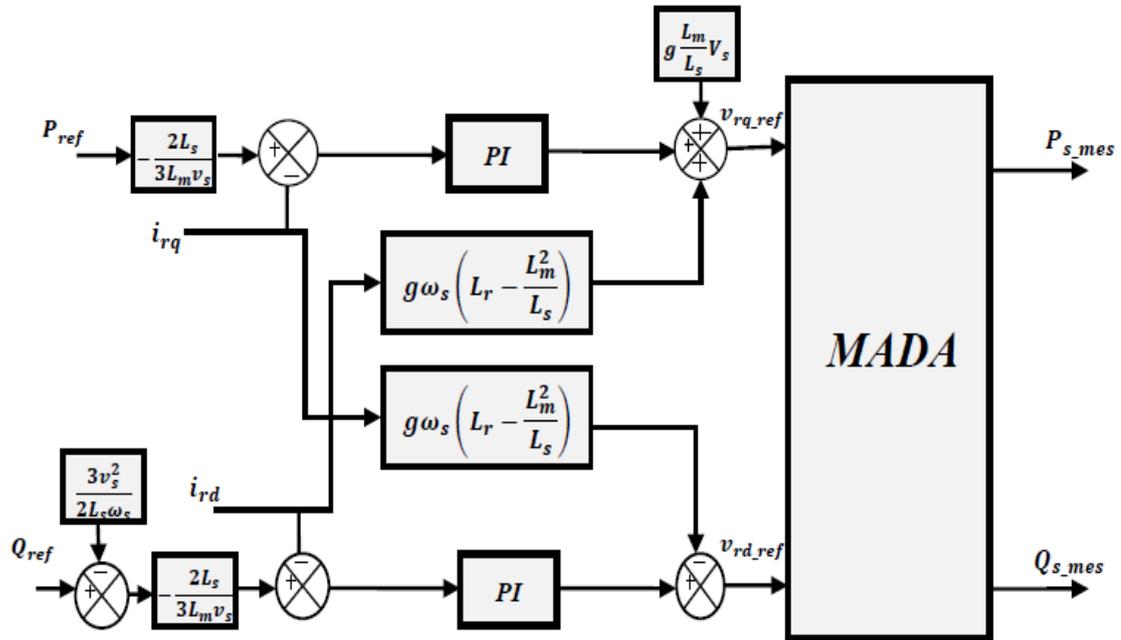


Fig. 4.5 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte

4.6.4 Commande en boucle fermée

Pour évoluer et corriger le système de commande précédent, nous allons mettre une boucle de régulation complémentaire des puissances active et réactive dans le schéma bloc de telle sorte que chaque axe de régulation contient deux régulateurs PI, l'un pour contrôler la puissance et l'autre pour le courant rotorique

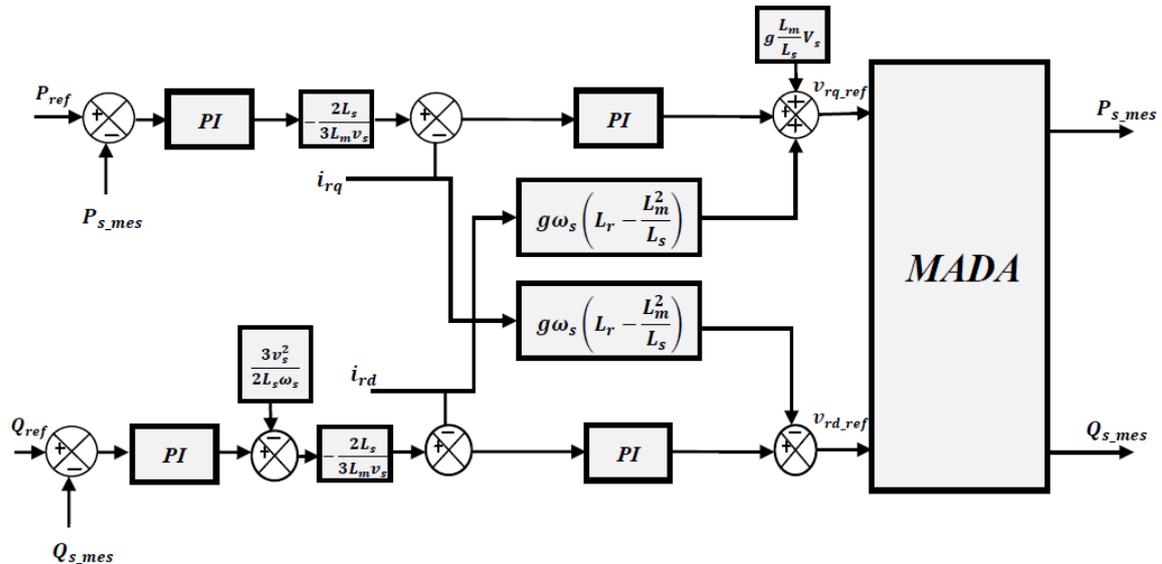


Fig.4.6 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

4.8 Synthèse et conception du régulateur (PI)

Si nous examinons le schéma bloc précédent de la fig4.6 et fig4.7; nous remarquons que l'élément PI qui est utilisé pour réguler et contrôler les puissances active et réactive, offre de nombreux avantages, y compris la vitesse et la simplicité à mettre en œuvre, en plus de fournir une performance acceptable pour réguler le système considéré

En littérature, il existe plusieurs façons pour la conception des régulateurs PI. Dans ce but, nous nous intéressons à la formule de conception qui est basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler

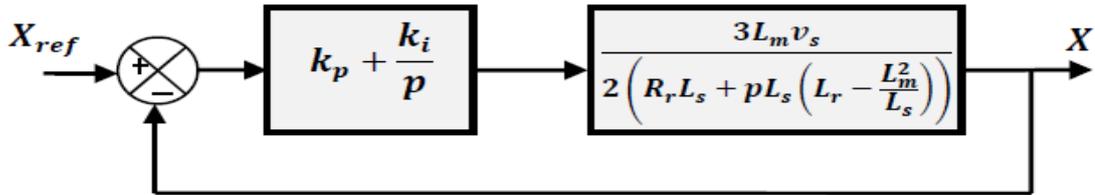


Fig.4.7 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p} \frac{3L_m V_s}{2\sigma L_r L_s}}{\frac{P}{K_p} P + \frac{R_r L_s}{\sigma L_r L_s}} \quad \text{avec} \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad (4.62)$$

Pour éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert, nous sélectionnons la formule de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r L_s}{\sigma L_r L_s} \quad (4.63)$$

On notera ici que l'intérêt de la compensation des pôles n'est apparent que si les paramètres du générateur sont déterminés avec précision car les gains k_p et k_i sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont divers de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace. Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{3L_m V_s}{2\sigma L_r L_s}}{P} \quad (4.64)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$FTBO = \frac{1}{1 + P \tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{2\sigma L_r L_s}{3L_m V_s} \quad (4.65)$$

Le terme montre ici la constante du temps du système. A partir de maintenant, on peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la génératrice et du temps de réponse : r

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{2\sigma L_r L_s}{3L_m V_s} \quad (4.66)$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{2R_r L_s}{3L_m V_s} \quad (4.67)$$

Il convient de dire que la méthode de la compensation des pôles n'est bien entendu pas la seule alternative de calcul pour la synthèse d'un régulateur PI. Mais, elle présente l'intérêt d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de transfert du premier ordre.

4.8.1 Simulations et discussion

En termes d'analyser le fonctionnement de l'ensemble, nous avons testé le système global sous un profil de vent qui se forme par quatre parties principales, notamment un vent constant durant les dix (10) premières secondes, puis le vent augmente.

Linéairement et progressivement de la valeur 4m/s à 10m/s pour y rester sur cette valeur durant le laps de temps 15s jusqu'à 20s pour finalement devant le dernier palier du profil (20s-30s), on impose que la vitesse de vent varie aléatoirement

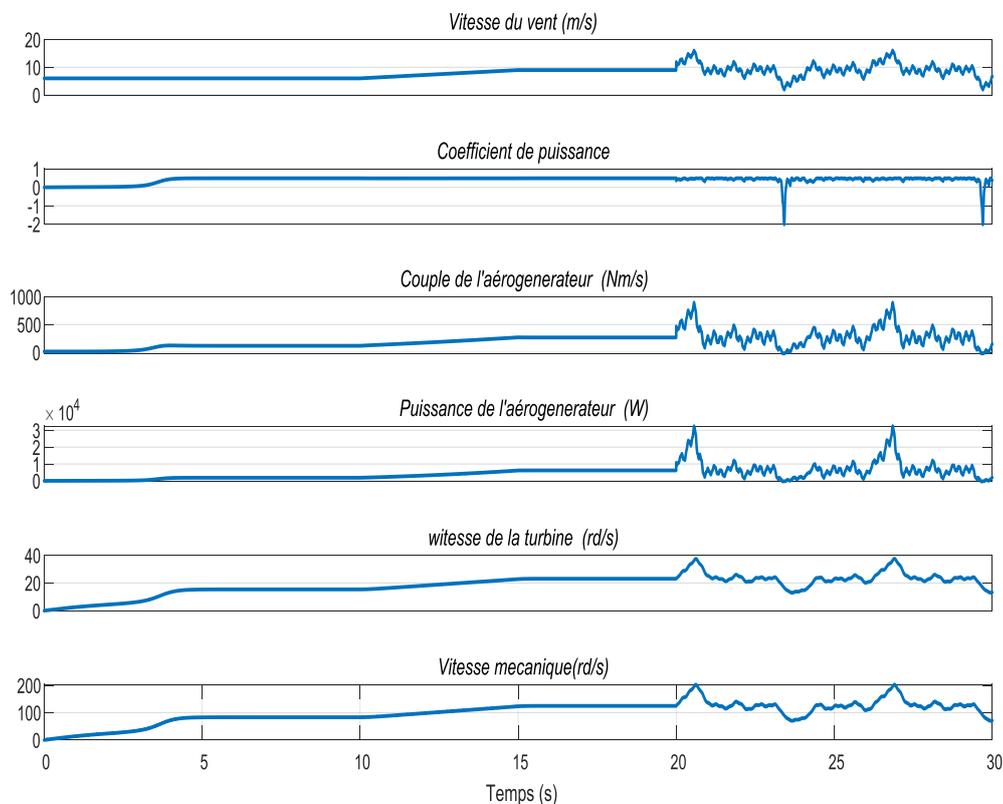


Fig.4.8 Evolution des grandeurs relatives à la turbine

Ainsi, sous l'effet de se profile, la fig4.8 montre les évolutions correspondantes du coefficient de puissance qui réagit pour assurer extraction de la puissance maximale développée par turbine (aérogénérateur). Sur la même figure, il est montré le couple et la puissance de l'aérogénérateur et finalement la vitesse de la turbine et celle mécanique.

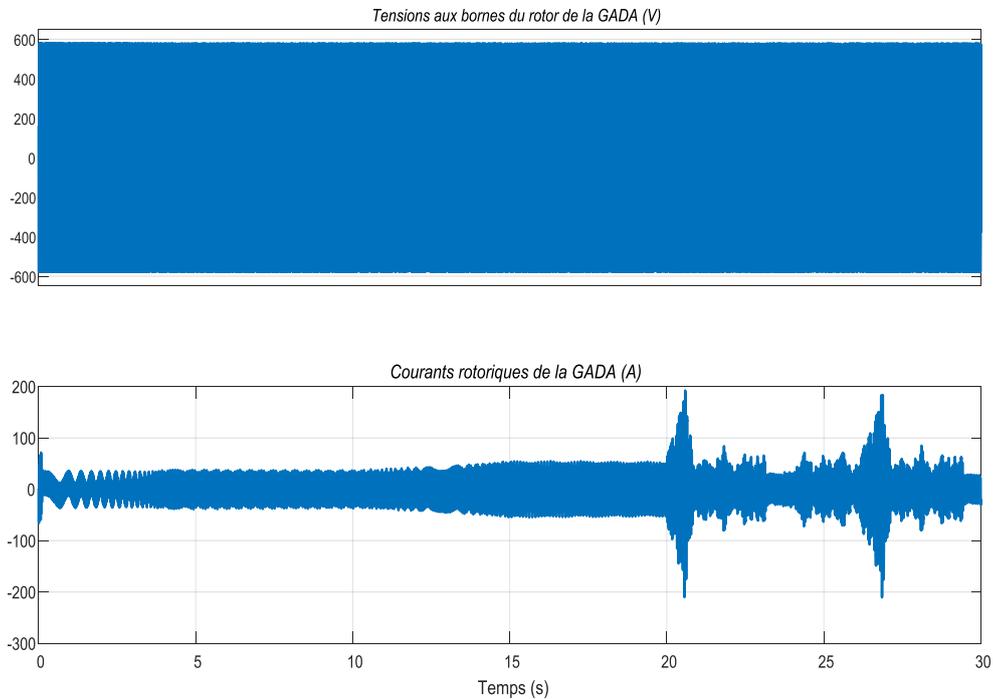


Fig.4.9 Tension et Courant rotoriques de la GADA

Par ailleurs et sous les mêmes conditions la fig.4.9 présente les tensions aux bornes du rotor de la génératrice asynchrone à double alimentation ; aussi bien que les courants rotoriques. Les deux figures du bas de 4.9 montrent respectivement les zooms devant la période de 25s-25,3s des tensions et courants rotoriques, respectivement.

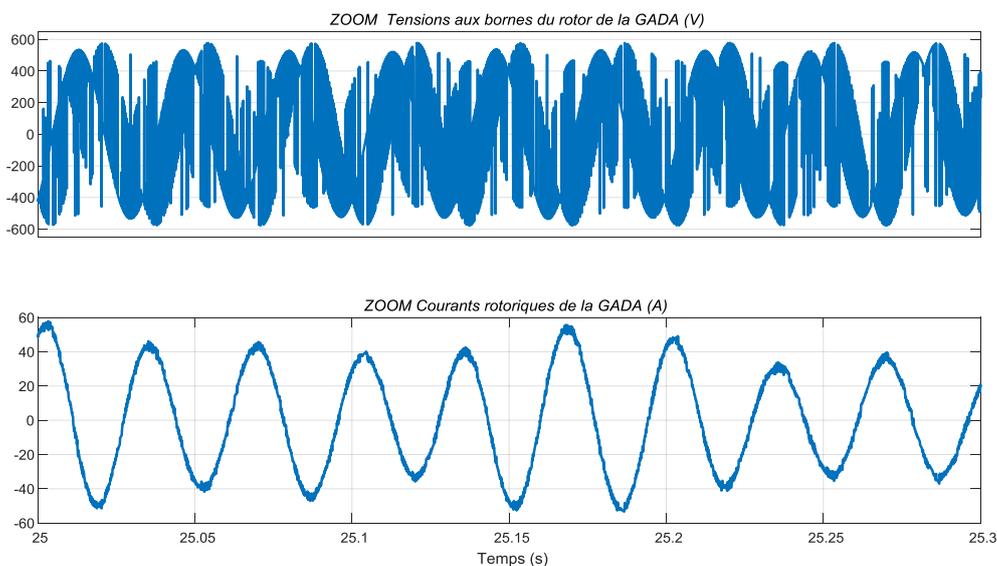


Fig.4.10 Zooms sur les tensions et courant de la phase « a » rotorique

Concernant, les simulations représentées par la fig4.10, elle montre les tensions et courants au niveau du réseau et les zooms de se derniers. Ou remarque les allures sont parfaitement sinusoïdales. ce qui est du fait exigé pour de tels systèmes de conversion énergétique.

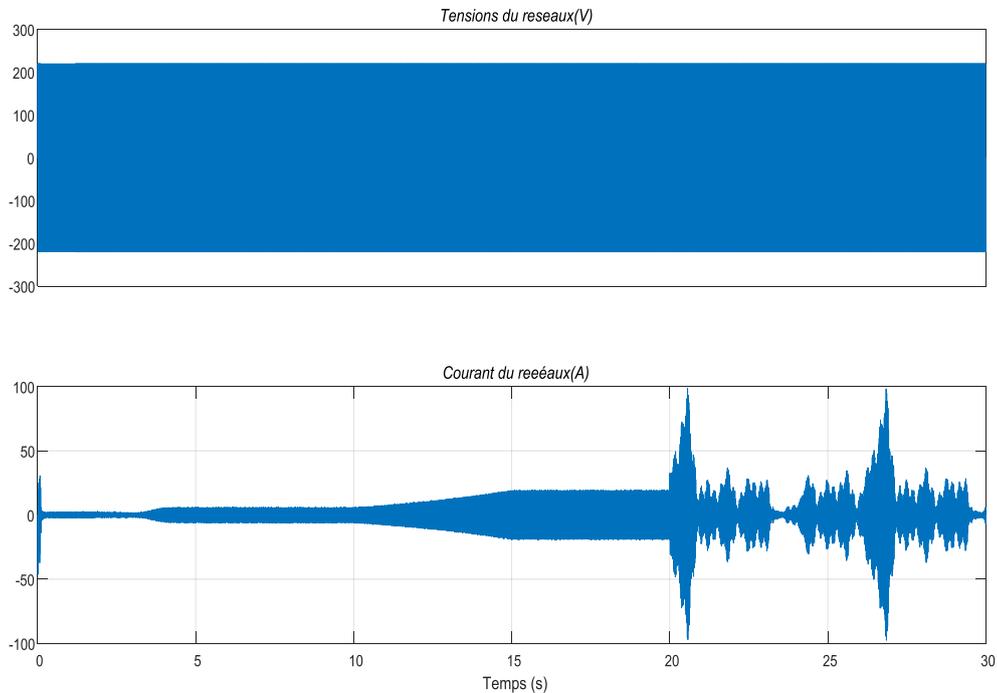


Fig.4.11 Tension et courant du réseau

Cependant pour assurer un frouchonnement correct de installation, particulièrement des deux convertisseurs statiques montés du coté rotor de la GADA et du coté de son stator, on imposé une tension continu de référence égale a $U_{dc\ ref} = \dots\dots\dots$

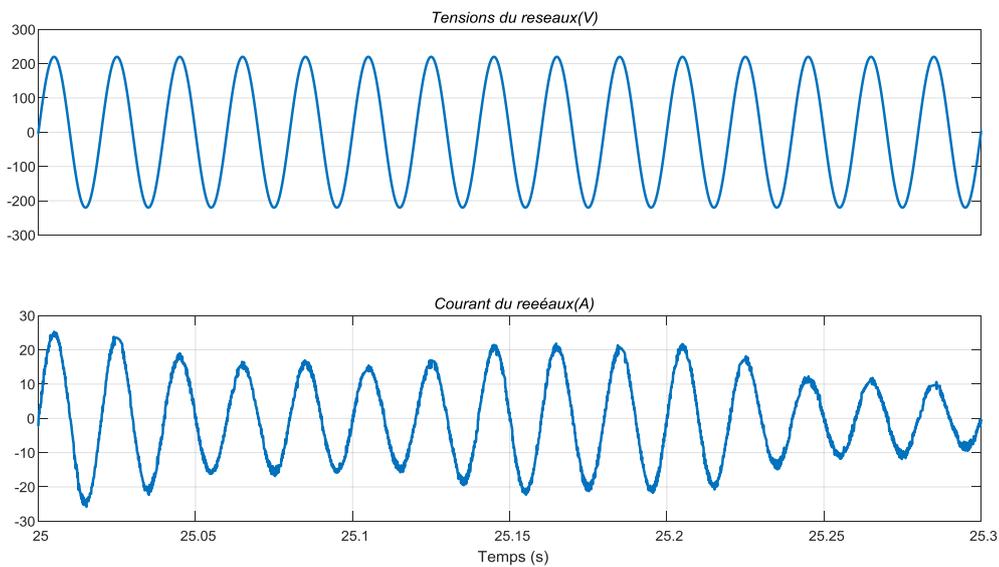


Fig.4.12 Zooms sur les tensions et courant de la phase « a » du réseau

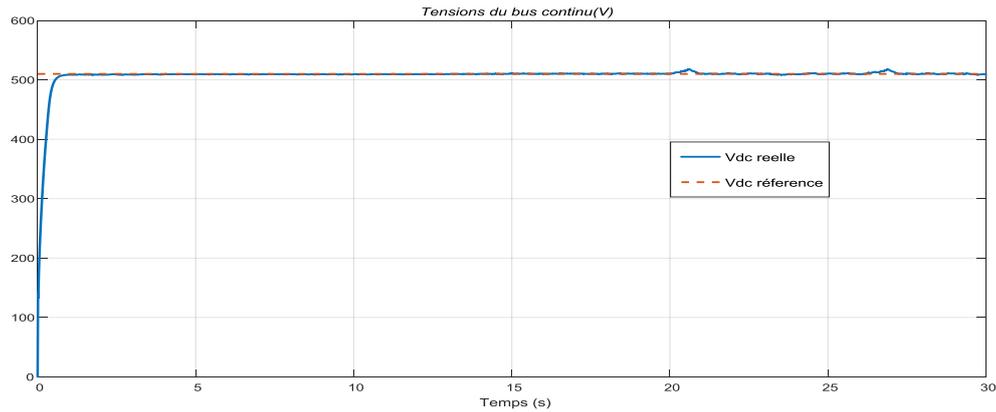


Fig.4.13 Tension du bus continu

Alors, on la fig4.12 montre que la tension au leur continu suit parfaitement sa valeur de référence grâce au réglage de la tension prévu. Et pour plus de clarifié la fig4.13 illustre un zoom sur la tension de référence et de la tension du bus continu

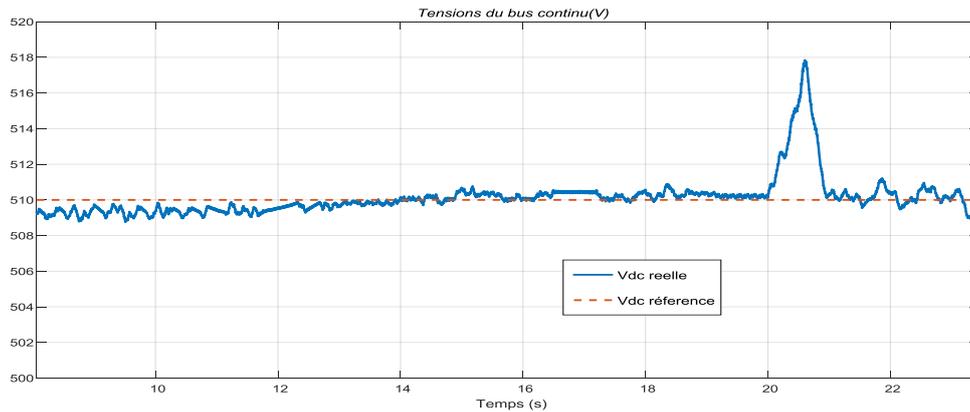


Fig.4.14 Zoom sur la tension continue

Le couple et la vitesse de rotation de la GADA sont simultanément montrés par la fig4.15

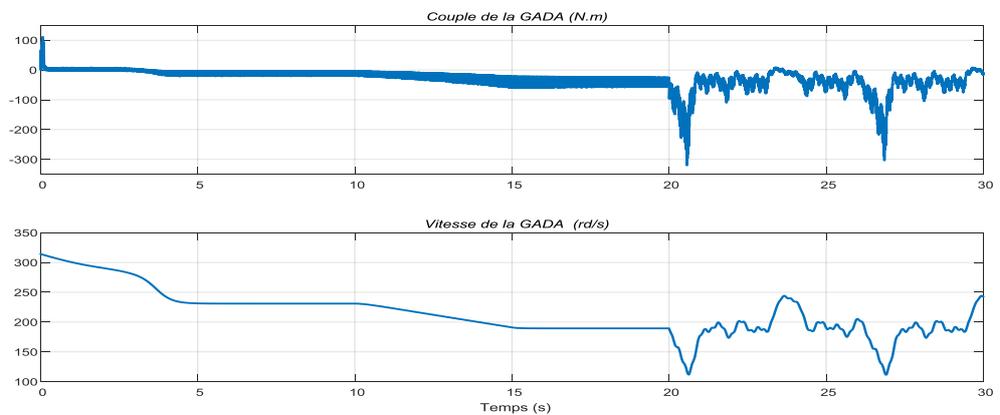


Fig.4.15 Couple et vitesse de la GADA

Finalement, la fig.4.16 montre les superpositions des puissances actives et réactives réelles avec leurs références. On constate que ses dernières suivent leurs références et que principalement, la puissance réactive est forcée à la valeur nulle pour avoir un coefficient de puissance unitaire

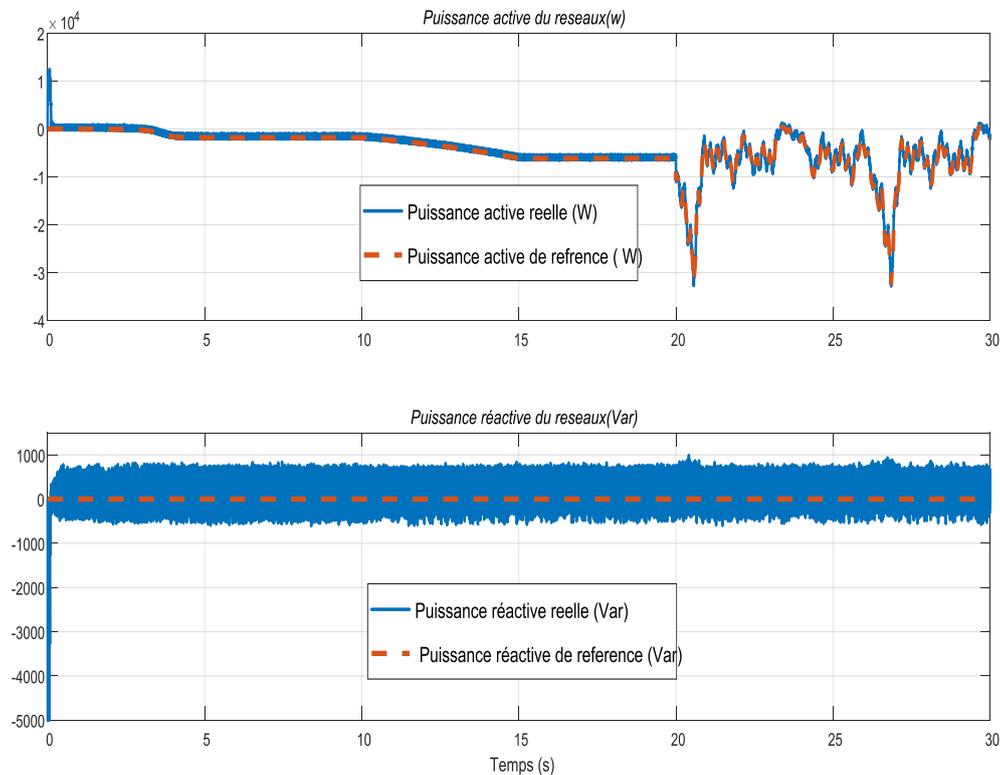


Fig.4.16 Puissances active et réactive

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné et évalué deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la GADA en mode générateur, à savoir : la commande directe et la commande indirecte à l'aide des correcteurs PI. Dans ce sens, nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple en vue de la mise en œuvre, mais ne donne pas les meilleurs résultats.

En contre partie, la méthode indirecte avec boucle de puissance permet d'obtenir un système de réglage performant pour un fonctionnement à vitesse variable de la GADA, et présente l'avantage de contrôler les courants rotoriques, ce qui permet d'assurer la protection de la GADA en limitant les courants, et d'avoir un fonctionnement optimal du système de la conversion électrique en diminuant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres. Cependant, elle présente une complexité du point de vue mise en œuvre à cause des régulateurs PI supplémentaires.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de l'énergie éolienne présente de nombreux avantages. Tout d'abord, elle est une source d'énergie renouvelable et propre, ce qui la rend écologiquement responsable. Contrairement aux combustibles fossiles qui produisent des gaz à effet de serre et contribuent au changement climatique, l'énergie éolienne ne produit aucune émission polluante. De plus, l'énergie éolienne est disponible partout dans le monde et est gratuite, ce qui la rend économiquement intéressante. Elle peut également être utilisée pour fournir de l'énergie aux communautés isolées ou pour alimenter les réseaux électriques locaux, ce qui peut aider à réduire la dépendance aux combustibles fossiles. En somme, l'utilisation de l'énergie éolienne est une alternative verte et économique aux combustibles fossiles, et elle est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans la production d'énergie dans un avenir proche.

L'objectif de l'étude est le développement d'une structure comportant une éolienne à base de la GADA où le stator est directement lié au réseau de distribution électrique et le rotor via une connexion en cascade de deux convertisseurs statiques commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion ainsi que le développement d'un programme de simulation sous l'environnement de la chaîne de conversion éolienne. La gestion de puissance développée est assurée afin que l'installation fonctionne avec un facteur de puissance unitaire.

En conclusion, le travail de cette commande éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation a permis de réaliser des avancées significatives. Tout d'abord, la commande de la tension du bus continu a été assurée, ce qui est un élément incontournable pour la performance de l'éolienne. De plus, la gestion des puissances actives et réactives a été optimisée grâce à l'utilisation d'un coefficient de puissance unitaire. Le tout a été réalisé grâce à l'utilisation de MATLAB Simulink, un outil puissant qui a permis d'obtenir des résultats précis et fiables. Ces avancées sont prometteuses pour l'avenir de l'énergie éolienne, qui devient de plus en plus importante dans notre société. En somme, ce travail représente une initiation à la structure et la commande d'un système de conversion éolien répondant aux conditions de fonctionnement souhaitées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Redjem Radia, *étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*, université Mentouri de Constantine, 2009.
- [2] Benghorzi Abderrahim, Benhadda Houcine , *Etude et simulation d'une éolienne avec une machine asynchrone double alimentation* , mémoire de Master , 2020
- [3] Rabia Mammad, *Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présentes dans le réseau électrique*, Université Abou Beker Belkaid de Tlemcen 2017.
- [4] Dekali Zouheyr, *Contribution à la commande d'un simulateur HIL d'éolienne et d'une génératrice asynchrone à double alimentation*, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de Technologie, These, 2021 .
- [5] Latreche Mohammed Tahar, *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien* , Université Ferhat Abbas de Setif, Magister en Électrotechnique, 2012.
- [6] Cherfia Naim, *Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne* ; Université des Frères Mentouri de Constantine, Doctorat en Sciences, 2018.
- [7] A. Boyette, *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
- [8] S. Wen and F. Wang, *Sensorless direct torque control of high speed PMSM based on variable structure sliding mode*, in *Electrical Machines and Systems*, 2008. ICEMS 2008 .
- [9] Y. Errami, M. Maaroufi, and M. Ouassaid, "Variable Structure Direct Torque Control and grid connected for wind energy conversion system based on the PMSG," in *Complex Systems on*, 2012.
- [10] H. Ihssen, *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur*," Ecole nationale supérieure polytechnique, 2008.
- [11] S.El Aimani, *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension* , Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1 (USTL), Lille, France, 2004.
- [12] G.Djamel et A.Samir .*Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation*, Mémoire d'ingénieur Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2007.
- [13] N.Ghedbane et A.Medjadi, *Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur RST*, Mémoire d'ingénieur université Med Boudiaf de M'sila ,2005.

- [14] R. Rouabhi, Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée, Université de Batna 2, 2016.
- [15] C. Benfedhal, Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne-Etude et Expérimentation, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 2007.
- [16] A. Mirecki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [17] Djamel Belhadj , Commande directe en couple d'une machine asynchrone-structures d'observation- application aux systèmes multi machines- multi convertisseurs , Thèse doctorat, école nationale d'ingénieurs de Tunis, 2001.
- [18] Akkari Nadia, contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation , Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [19] A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg, and L. H. Hansen, "Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration," Wind Engineering, vol. 28, pp. 247-263, 2004.
- [20] T. Yamina, "Detection de Défauts de la génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG)," Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 2011
- [21] https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-delectricite-en-2016_10537
- [22] Toual Belkacem, « modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », mémoire de magister, université de Batna, 2010.