

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° : RE_266



DOMAINE : SCIENCE TECHNIQUE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

1. GUASMI Abdenour
2. GUELMINE Said

Intitulé

Modélisation et commande du système de
conversion éolienne basé sur une GADA

Soutenu devant le jury composé de:

| | | |
|-----------------------|---|------------|
| Mr. MESSALTI Sabir | Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. | Président |
| Mr. ZOUGGAR El Oualid | Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. | Rapporteur |
| Mr. GHEMARI Zine | Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. | Examineur |

Année universitaire : 2016 /2017

Nous dédions le présent
travail
A nos parents,
Nos familles,
Et à tous les amis.

Remerciements

Nous remercions Dieu, le tout puissant, Dieu qui nous a donné la force, patience, volonté et surtout raison.

Ainsi, Nous tenons également à exprimer nos vifs Remerciements à notre encadreur, **Dr. El Oualid ZOUGGAR** pour avoir d'abord proposé ce thème, et lui exprime nos gratitudes, pour la disponibilité et la patience dont il a fait preuve et dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble Des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger ce travail.

Sommaire

Liste des symboles

Liste des tableaux

Tables des figures

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 01

CHAPITRE I :

**ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENRGIE
EOLIENNE**

I.1. Introduction..... 04

I.2. Historique de l'éolien..... 04

I.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale..... 04

I.4. Baromètre de l'énergie éolienne dans le monde 05

I.5. Technologie des éoliennes..... 07

 I.5.1. Puissance des éoliennes..... 07

 I.5.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne..... 08

 I.5.2.1. Avantage..... 08

 I.5.2.2. Inconvénients..... 09

I.6. Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique..... 09

 I.6.1. Loi de Betz 09

 I.6.2. Production d'énergie mécanique..... 11

CHAPITRE II :

**MODELISATION ET STRATEGIES DE COMMANDE DES TURBINES A
VITESSE VARIABLE**

II.1. Introduction 14

II.2. Modélisation de la turbine..... 14

 II.2.1. Modélisation de la vitesse du vent..... 14

 II.2.2. Modélisation du système d'orientation des pales..... 15

 II.2.3. Modélisation du système aérodynamique..... 16

 II.2.3.1. Modèle du multiplicateur 17

 II.2.4. Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ 17

 II.2.5. L'équation dynamique de la turbine..... 18

II.3. Stratégie de commande de la turbine..... 20

 II.3.1. la commande dans la zone II de fonctionnement en dessous de la puissance nominale..... 20

 II.3.2. Caractéristique de puissance..... 20

 II.3.3. Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance)..... 21

| | | |
|----------|--|----|
| II.3.3.1 | Principe de la MPPT (Maximum Power Point Tracking) | 21 |
| II.3.3.2 | Commande indirecte de vitesse (Zone II)..... | 22 |
| II.4 | Résultats de simulation..... | 24 |
| II.4.1 | Interprétations des résultats..... | 25 |
| II.5 | Conclusion..... | 26 |

CHAPITRE III

MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

| | | |
|-----------|---|----|
| III.1 | Introducion..... | 28 |
| III.2 | Description du système..... | 28 |
| III.3 | Présentation de la machine asynchrone à double alimentation..... | 29 |
| III.3.1 | Machine à double alimentation en cascade asynchrone..... | 29 |
| III.3.2 | Machine à double alimentation cascadée à un repère..... | 30 |
| III.3.3 | MADA sans balais..... | 30 |
| III.3.4 | Principe de fonctionnement..... | 31 |
| III.3.4.1 | Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone..... | 31 |
| III.3.4.2 | Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone..... | 32 |
| III.4 | Aperçu sur la configuration de la MADA a rotor bobiné..... | 32 |
| III.4.1 | Configuration pour application génératrice..... | 32 |
| III.4.1.1 | Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée | 32 |
| III.4.1.2 | MADA -structure de kramer..... | 33 |
| III.4.1.3 | MADA structure de scherbius avec cyclo-convertisseur | 33 |
| III.4.1.4 | MADA structure de scherbius avec convertisseurs MLI | 34 |
| III.5 | Domaines d'application de la MADA | 35 |
| III.6 | Avantages et inconvénients de la MADA..... | 35 |
| III.6.1 | Avantages de la MADA..... | 36 |
| III.6.2 | Inconvénients de la MADA | 36 |
| III.7 | Application des machines asynchrones à double alimentation..... | 37 |
| III.7.1 | Application génératrice..... | 37 |
| III.8 | Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation..... | 37 |
| III.8.1 | Hypothèses simplificatrices | 37 |
| III.8.2 | Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA..... | 38 |
| III.8.2.1 | Equations électriques..... | 38 |
| III.8.2.2 | Equations mécanique..... | 38 |
| III.8.3 | Modèle de la MADA dans le plan (d q)..... | 39 |
| III.8.3.1 | La Transformation de Park..... | 39 |
| III.8.3.2 | Application de la transformation de Park..... | 39 |
| III.8.4 | Mise sous forme d'équation d'état..... | 40 |
| III.9 | Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)..... | 41 |

| | | |
|---------|-----------------------------------|----|
| III.9.1 | Interprétation des résultats..... | 44 |
| III.10 | Conclusion..... | 44 |

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

| | | |
|----------|--|----|
| IV.1 | Introduction..... | 47 |
| IV.2 | Principe de la commande vectorielle de la MADA..... | 47 |
| IV.3 | Etablissement du modèle de la GADA | 48 |
| IV.3.1 | Choix du référentiel pour le modèle diphasé..... | 48 |
| IV.3.1.1 | Relation entre le courant statorique et le courant rotorique | 49 |
| IV.3.1.2 | Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques | 49 |
| IV.3.1.3 | Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques | 49 |
| IV.3.2 | Type de régulateurs utilisés..... | 51 |
| IV.4 | Résultats de Simulation..... | 51 |
| IV.4.1 | Résultats de Simulation du système sans turbine..... | 51 |
| IV.4.1.1 | Interprétation des résultats..... | 52 |
| IV.4.2 | Résultats de Simulation du système avec turbine..... | 52 |
| IV.4.2.1 | Interprétation des résultats..... | 53 |
| IV.5 | Commande Vectorielle De La Gada Avec Un Onduleur A Deux Niveaux..... | 54 |
| IV.5.1 | Modélisation de l'onduleur à MLI | 54 |
| IV.5.2 | Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)..... | 55 |
| IV.6 | Résultats de simulation avec onduleur | 56 |
| IV.6.1 | Interprétation des résultats | 57 |
| II.7 | Conclusion | 57 |

CONCLUSION GENERALE

| | |
|--------------------------|----|
| Conclusion Générale..... | 59 |
|--------------------------|----|

Annexe

Annexe A
Annexe B

Bibliographie

Liste des références

Résumé

Liste des symboles

Nomenclature

| | |
|------|--|
| MADA | Machine Asynchrone à Double Alimentation. |
| GADA | Générateur Asynchrone à Double Alimentation. |
| GTO | Gate Turn-Off Thyristor. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| MLI | Modulation de largeur d'impulsion. |
| BDV | boite de vitesse. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor. |
| CCR | convertisseur côté réseau. |
| CCM | convertisseur côté Machine Asynchrone à Double Alimentation. |
| MS | Machine Synchrone. |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking. |
| PI | Proportionnel Intégral. |

Symboles

| | |
|-----------------------|--|
| $V_0(t)$ | La vitesse du vent en un point peut être décomposée. |
| V | La valeur moyenne du vent (composante lente). |
| $V(t)$ | Les fluctuations (turbulences). |
| Σ | Coefficient de dispersion. |
| T_β | Constant de temps. |
| $P_{aér}$ | la puissance aérodynamique. |
| P | Représente la densité de l'air. |
| R_T | Le rayon des pales de la turbine. |
| $C_P(\lambda, \beta)$ | Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance. |
| Ω_T, Ω_g | La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur. |
| Λ | le ratio de vitesse (rad). |
| β | L'angle de calage des pales. |
| C_T, C_g | Le couple de la turbine respectivement du électromagnétique. |
| G | Le rapport du multiplicateur de vitesse. |
| J_T, J_g | L'inertie de la turbine et celle du générateur. |
| J | L'inertie totale de l'éolienne. |
| f_T, f_g | Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur. |
| F | Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne. |

Liste des symboles

| | |
|------------------------------|---|
| λ_{opt} | La vitesse spécifique optimale de la turbine. |
| C_{Topt} | Le couple optimal de la turbine. |
| C_{Gopt} | Le couple optimal du générateur. |
| C_{Popt} | Le rendement aérodynamique optimal de la turbine. |
| β_{opt} | L'angle de calage des pales. |
| C_{pmax} | Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance. |
| P_g | puissance générée. |
| L_{ss}, L_{rr} | sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques. |
| M_{max} | Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique. |
| M_s, M_r | les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques. |
| $[M_{sr}]$ | la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor. |
| C_{em} | Le couple électromagnétique de la machine. |
| C_r | Le couple résistant. |
| I_s, I_r | Les courants de phase statorique et rotorique respectivement. |
| θ_s, θ_r | Angle électrique statorique, rotorique. |
| φ_s, φ_r | Respectivement flux statorique et rotorique. |
| $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$ | les flux statoriques directs et en quadrature du système. |
| $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ | les flux rotoriques directs et en quadrature du système. |
| I_{sd}, I_{sq} | Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK. |
| I_{rd}, I_{rq} | Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK. |
| ω_s, ω_r | Pulsation statorique et rotorique. |
| V_{sd}, V_{sq} | les tensions statoriques directes et en quadrature du système diphasé. |
| V_{rd}, V_{rq} | les tensions rotoriques directes et en quadrature du système diphasé. |
| a_s, b_s, c_s | Les trois phases du stator. |
| a_r, b_r, c_r | Les trois phases du rotor. |
| P_s, Q_s | Puissance active et réactive statorique. |
| P_r, Q_r | Puissance active et réactive rotorique. |
| $[R_s]$ | Matrice résistance statorique. |
| $[R_r]$ | Matrice résistance rotorique. |
| G | Le glissement. |
| P | Opérateur de Laplace. |
| P_T | La puissance convertie par la turbine. |

Liste des tableaux

| | |
|--|---|
| Tableau I.1. Puissance éolienne installée dans le monde fin 2016 (en MW) | 5 |
| Tableau (I.2) : Différents catégories des puissances éoliennes | 7 |

Table des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

| | |
|---|----|
| Figure (I.1) : Répartition mondiale du marché éolien en 2016. | 6 |
| Figure (I.2) : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW. | 6 |
| Figure (I.3) : Taille des éoliennes en m en fonction des puissances en kW. | 7 |
| Figure (I.4) : Tube de courant autour d'une éolienne. | 10 |
| Figure (I.5) : Coefficient de puissance. | 10 |
| Figure (I-6) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. | 11 |
| Figure (I.7) : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné. | 12 |

Chapitre II : Modélisation et stratégie de commande des turbines à vitesse variables

| | |
|---|----|
| Figure (II-1) : Schéma de la turbine éolienne. | 14 |
| Figure (II-2) : Profil du vent appliqué à la turbine. | 15 |
| Figure (II-3) : Orientation des pales. | 16 |
| Figure (II-4) : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales. | 16 |
| Figure (II-5) : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine. | 18 |
| Figure (II-6) : Modèle de la turbine. | 18 |
| Figure (II-7) : Modèle simplifié de la turbine. | 19 |
| Figure (II-8) : Schéma bloc du modèle de la turbine. | 20 |
| Figure (II-9) : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable. (a). dans le plan (V, P) . (b). dans le plan (V, Ω, β) . | 20 |
| Figure (II-10) : Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesse de vent. | 22 |
| Figure (II-11) : Commande indirect de vitesse | 23 |
| Figure (II-12) : Schéma block de la turbine | 24 |
| Figure (II-13) : la vitesse mécanique et la vitesse Spécifique avec la vitesse du vent constante (8,5 m/s). | 24 |
| Figure (II-14) : La vitesse mécanique et la vitesse Spécifique avec le profil de la vitesse du vent constante. | 24 |
| Figure (II-15) : Le coefficient de puissance Réelle et Désiré. | 25 |
| Figure (II-16) : La puissance mécanique à la sortie de la turbine avec la vitesse du vent variable et constante ($V = 8$ m/s). | 25 |

Chapitre III : Modélisation de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation

| | |
|---|----|
| Figure (III.1) : Système de conversion éolienne à base de la MADA. | 28 |
| Figure (III-2) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation. | 29 |
| Figure (III-3) : Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone. | 30 |
| Figure (III-4) - Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère. | 30 |
| Figure (III-5) - Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais. | 31 |
| Figure (III-6) : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone. | 31 |
| Figure (III-7) : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone. | 32 |

| | |
|--|----|
| Figure (III-8): MADA à énergie rotorique dissipée. | 32 |
| Figure (III-9): Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique. | 33 |
| Figure (III-10): MADA, structure Kramer. | 33 |
| Figure (III-11): Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. | 34 |
| Figure (III-12): Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. | 34 |
| Figure (III-13): Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA. | 35 |
| Figure (III-14): Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA. | 36 |
| Figure (III-15): Représentation de la MADA dans les deux repères. | 37 |
| Figure (III-16): Schéma block de la GADA avec les sources des tensions (Rotorique et Statorique) | 41 |
| Figure (III-17): Schéma block de la GADA. | 41 |
| Figure (III-18): Les tensions d'alimentations au stator. | 42 |
| Figure (III-19): Les tensions d'alimentations au stator (Zoom). | 42 |
| Figure (III-20): Les tensions d'alimentations au rotor. | 42 |
| Figure (III-21): Flux statorique directs (wb). | 43 |
| Figure (III-22): Flux statorique quadrature (wb). | 43 |
| Figure (III-23): Le couple électromagnétique. | 43 |
| Figure (III-24) : La puissance active statorique. | 44 |
| Figure (III-25) : La puissance réactive statorique. | 44 |

Chapitre IV : Commande Vectorielle de la GADA

| | |
|--|----|
| Figure (IV-1) : Principe de la commande vectorielle. | 48 |
| Figure (IV.2): Référentiel diphasé d q lié au champ tournant statorique. | 48 |
| Figure (IV-3) : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimenté en tension. | 50 |
| Figure (IV-4) : Schéma block de la commande vectorielle | 51 |
| Figure (IV-5) : La puissance Active et Réactive Statorique. | 51 |
| Figure (IV-6) : Le Couple Electromagnétique et le Flux Rotorique direct. | 52 |
| Figure (IV-7) : Les Courants Statorique (direct et quadrature). | 52 |
| Figure (IV-8) : Les courants Rotoriques. | 52 |
| Figure (IV-9) : Courant Rotorique des phases A,B et C. | 52 |
| Figure (IV-10) : Les Courants Statorique de phase A. | 53 |
| Figure (IV-11) : Les Courants rotoriques des phases A,B et C. | 53 |
| Figure (IV-12) : Le Flux Statorique(direct et quadrature). | 53 |
| Figure (IV-13) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé. | 54 |
| Figure (IV-14) : Schéma block de la commande vectorielle avec l'onduleur. | 56 |
| Figure (IV-15) : Schéma block de l'onduleur. | 56 |
| Figure (IV-16) : Les courants rotoriques (direct et quadrature). | 56 |
| Figure (IV-17) : La puissance Active et Réactive Statorique. | 56 |

I. INTRODUCTION GENERAL

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable. L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires considérables en énergie électrique. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Pour faire face à ces différents problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, ces pays se sont engagés, à moyen terme, à augmenter dans leur production d'énergie électrique la part d'énergies d'origine renouvelable (Eolien, solaire, maritime, biosphère) [1].

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans. L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire pour la production de L'énergie électrique.

La puissance éolienne installée au monde est de 486678,6 MW selon publication d'observer, les 10 premiers pays au monde totalisent 86.4%. C'est le cas de la chine, leader international avec une puissance éolienne installée de 62733MW qui devance les États-Unis avec 46919MW ensuite l'Allemagne avec 29060MW suivie de l'Espagne avec 21674MW, ensuite l'Inde avec 16084MW, la France avec 6800MW, l'Italie avec 6747MW, la Grande Bretagne avec 6540MW, le Canada avec 5265MW, le Portugal avec 4083MW, et le reste du monde avec 32445MW.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Afin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le bon fonctionnement des aérogénérateurs et leur insertion dans la production électrique.

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non l'unique, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des

Introduction Générale

convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique.

Dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, les convertisseurs statiques triphasés sont des éléments essentiels car ils permettent de contrôler les puissances active et réactive injectées sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent appliqué sur les pales de l'éolienne. La sécurité, la fiabilité, les performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service des systèmes éoliens constituent aujourd'hui des préoccupations majeures pour l'insertion de ces sources d'énergie dans le réseau électrique.

La présentation de ce travail est organisée en quatre chapitres détaillés comme suit :

Le premier chapitre donne une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure et en terminant par choisir la structure qui sera étudiée.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et l'optimisation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Pour cela, on va mettre en œuvre la commande MPPT.

Puis dans le troisième chapitre nous abordons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement Simulink du logiciel MATLAB.

Le troisième chapitre présente une stratégie de commande vectorielle classique en puissances active et réactive statoriques appliquée au MADA, il sera alors possible de donner des valeurs de consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, ceci nous offre la possibilité de régler en permanence la valeur de la puissance réactive que la machine va fournir au réseau. Différentes commandes vont être développées ici, l'une appelée commande directe qui effectue la régulation directement sur les puissances sans rendre en compte les couplages internes existants entre les puissances dans la MADA. Cette solution est simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir rapidement des fonctionnements convenables de l'ensemble. Ensuite nous présentons la méthode indirecte qui s'occupe d'abord de réguler les courants rotoriques de la MADA et incorpore ensuite une boucle de régulation des puissances.

Cette méthode, plus complexe, donne un fonctionnement similaire à celui de la méthode directe mais permet de maîtriser les courants rotoriques et nous permet le contrôle du facteur de puissance de même le filtrage actif des harmoniques. Dans ce même chapitre nous proposons, une synthèse du régulateur proportionnel intégral (*PI*), ainsi que les résultats obtenus par simulation.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, des perspectives espérées sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

CHAPITRE I :
ETAT DE L'ART SUR LES
SYSTEMES DE CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE

I.1.Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des capteurs éoliens (aéromoteurs) a connu une évolution considérable surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

Dans ce chapitre, nous allons énoncer un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2. Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Paul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes du monde sont de fabrication Hollandaise) [1].

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [3].

I.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait :

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année [1].

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW

I.4. Baromètre de l'énergie éolienne dans le monde :

Le marché mondial de l'éolien semble avoir trouvé ses premières limites. Après avoir augmenté de manière quasi continue depuis le début des années 2000 pour atteindre 64,4 GW en 2015, les premières estimations font état pour 2016 d'un marché annuel de 54,2 GW, en recul par rapport au marché de l'année précédente. Ces résultats permettent cependant au parc éolien mondial d'augmenter de 12,4 % pour s'établir désormais à 486,7 GW.

| | 2015 | 2016 | Puissance installée en 2016 | Mises hors |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|------------|
| Union européenne | 142 041,5 | 153 640,5 | 12 068,1 | |
| Turquie | 4 718,3 | 6 101,1 | 1 382,8 | |
| Norvège | 822,0 | 838,0 | 16,0 | |
| Russie | 15,0 | 15,0 | 0,0 | |
| Reste de l'Europe | 643,0 | 666,0 | 23,0 | |
| Total Europe | 148 239,8 | 161 260,6 | 13 489,9 | |
| Etats-Unis | 73 992,0 | 82 183,0 | 8 203,0 | |
| Canada | 11 219,0 | 11 900,0 | 702,0 | |
| Mexique | 3 073,0 | 3 527,0 | 454,0 | |
| Total Amérique du Nord | 88 284,0 | 97 610,0 | 9 359,0 | |
| Chine | 145 362,0 | 168 690,0 | 23 328,0 | |
| Inde | 25 088,0 | 28 700,0 | 3 612,0 | |
| Japon | 3 038,0 | 3 234,0 | 196,0 | |
| Autres pays d'Asie | 2 482,0 | 3 019,0 | 544,0 | |
| Total Asie | 175 970,0 | 203 643,0 | 27 680,0 | |
| Brésil | 8 726,0 | 10 740,0 | 2 014,0 | |
| Autres pays d'Amérique latine | 3 492,0 | 4 556,0 | 1 065,0 | |
| Total Amérique latine | 12 218,0 | 15 296,0 | 3 079,0 | |
| Afrique et Moyen-Orient | 3 488,0 | 3 906,0 | 418,0 | |
| Région Pacifique | 4 823,0 | 4 963,0 | 140,0 | |
| Total monde | 433 022,8 | 486 678,6 | 54 165,9 | |

Tableau I.1. Puissance éolienne installée dans le monde fin 2016 (en MW).[4]

Une analyse géographique plus globale confirme que le marché de l'éolien reste plus que jamais tiré par l'Asie qui a représenté en 2016 un peu plus de la moitié (51,1 %) de la puissance éolienne installée dans le monde (figure I.1). L'Europe est restée la seconde place forte de l'énergie éolienne avec près du quart (24,9 %), devançant l'Amérique du Nord (17,3 %) et le reste du monde (6,7 %) [4].

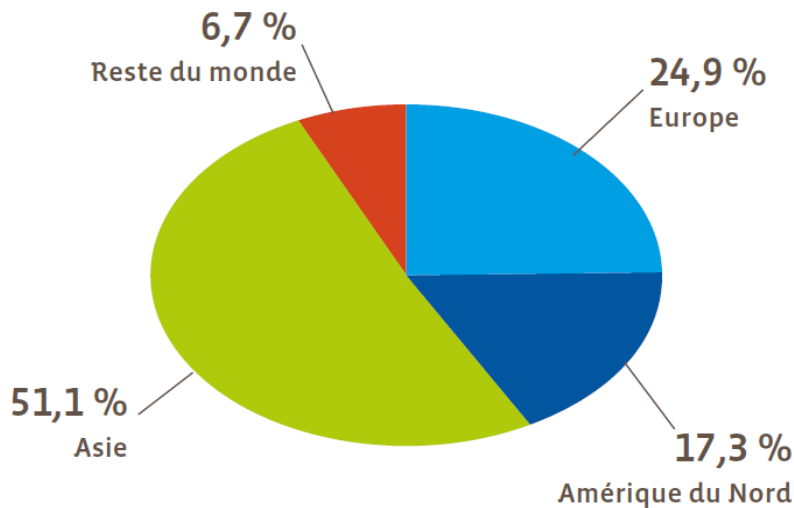


Figure (I.1) : Répartition mondiale du marché éolien en 2016.[4]

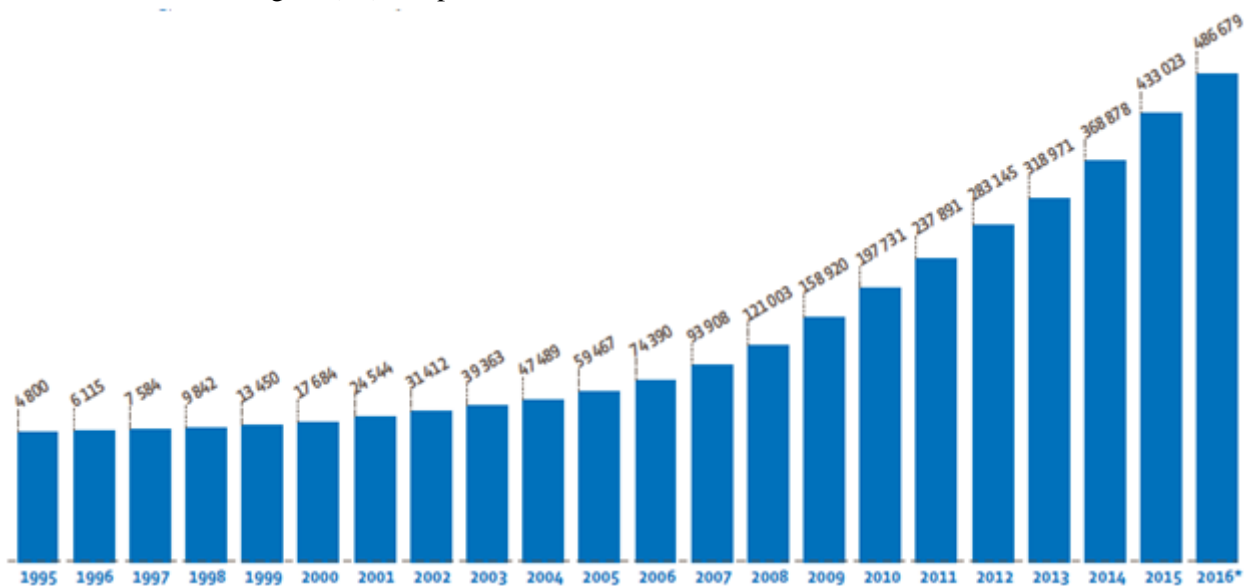


Figure (I.2) : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW. [4]

En Afrique Le Maroc, deuxième producteur d'énergie éolienne du continent après l'Egypte, avait (en 2007) 140 MW de puissance installée et a atteint 480 MW en 2012. Cette production va s'accroître dans les années à venir pour maintenir le Maroc le premier producteur d'énergie éolienne en Afrique. Le plus grand parc éolien marocain est composé de 165 aérogénérateurs.

Donc pour l'Algérie on a Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables [5] :

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud,
- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et aussi leurs contribuent à la préservation de nos ressources fossiles,
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

L'énergie éolienne en Algérie a été exploitée uniquement et seulement pour le pompage de l'eau, la première expérience a été effectuée à Adrar en 1957 à ksar Sidi-Aïssa pour l'irrigation de 50 Hectares de terres agricoles [5].

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, non seulement en termes de moyens financiers dont l'objectif n'est pas uniquement d'économiser ses réserves énergétiques, mais aussi de bénéficier le plus rapidement du transfert technologique dans ce domaine en partenariat avec les firmes internationales leaders.

Devant les recommandations des pouvoirs publics (Loi du 03 Février 2011), SONELGAZ ambitionne d'atteindre en 2015 un taux d'intégration de 6 % pour la production de l'énergie électrique à travers l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne et prévoit de porter ce chiffre à 10 % en 2027.

I.5. Technologie des éoliennes

I.5.1. Puissance des éoliennes

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique, a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

| | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Eoliennes de petite puissance | inférieure à 40 kW |
| Eoliennes de moyenne puissance | de 40 à quelques centaines de kW |
| Eoliennes de forte puissance | supérieure à 1 MW. |

Tableau (I.2) : Différents catégories des éoliennes

A titre de comparaison, la figure ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [6].

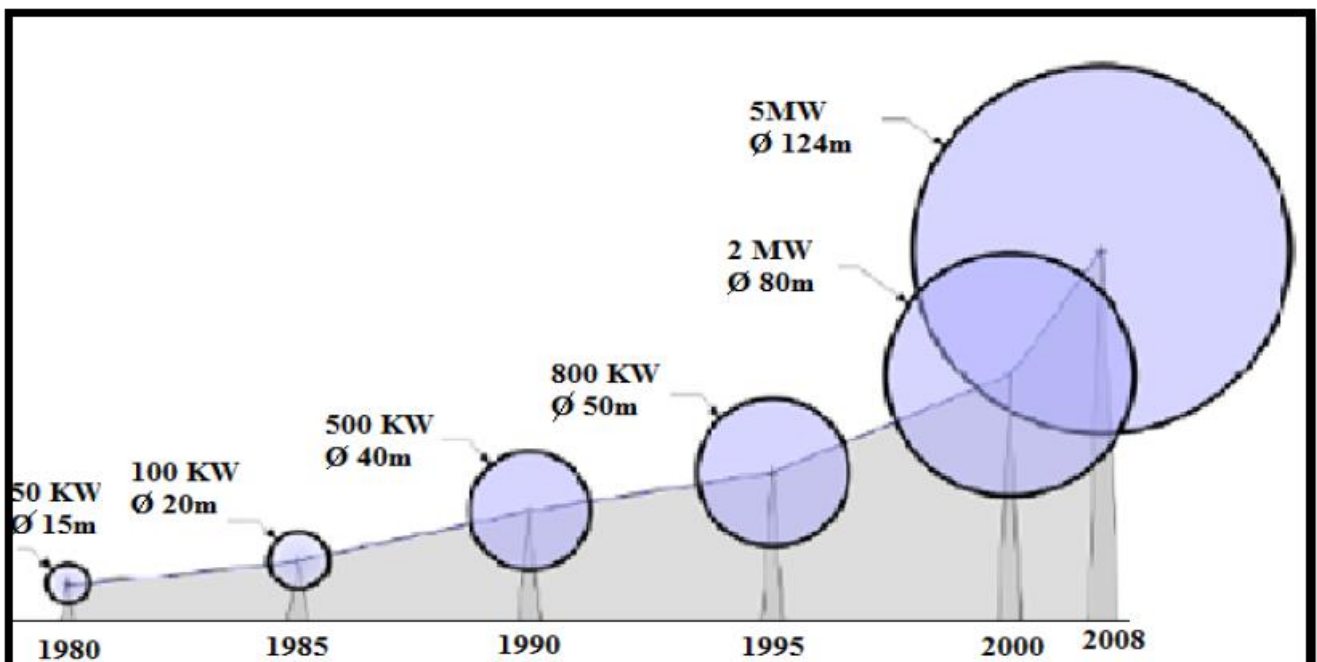


Figure (I.3) : Taille des éoliennes en m en fonction des puissances en kW [6].

I.5.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.2.1 Avantages

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

L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergies notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO_2 a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [10].

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO_2 .
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO_2 , 21 mille tonnes de SO_2 et 17,5 mille tonnes de NO_x , Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace, [10].

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intègre dans un système électrique existant déjà.

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle, [10].

I.5.2.2. Inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les turbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés, [10].

I.6 Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique

I.6.1 Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I.4) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (\text{I. 1})$$

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

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 2})$$

D'où la puissance absorbée est:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot SV^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 3})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique

E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 4})$$

$$\text{On déduit : } V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I. 5})$$

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

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 6})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{I. 7})$$

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante P_{mt} (mécanique théorique) serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{I. 8})$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{I. 9})$$

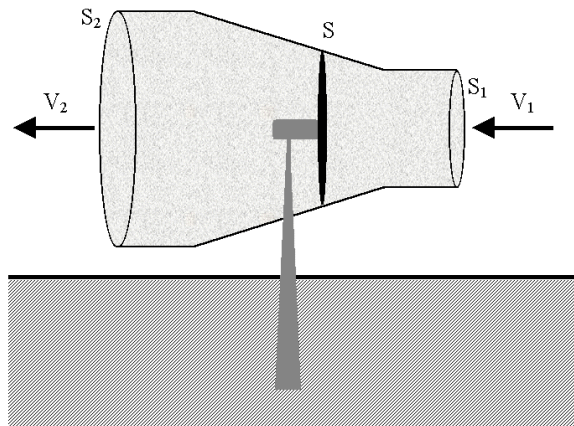


Figure (I.4) : Tube de courant autour d'une éolienne.

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 1.5), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

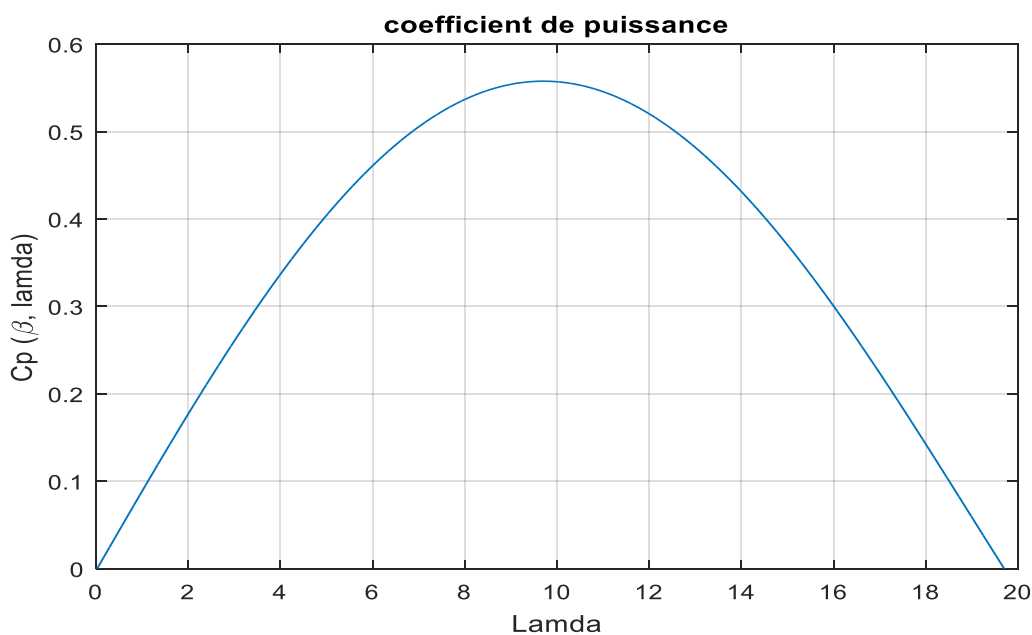


Figure (I.5) : Coefficient de puissance

En combinant les équations (I.8) et (I.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) P_{mt} = C_P(\lambda, \beta) P_{mt} = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \quad (I.11)$$

Ω_T : Vitesse de rotation de la turbine

R_T : La longueur (rayon) de la pale

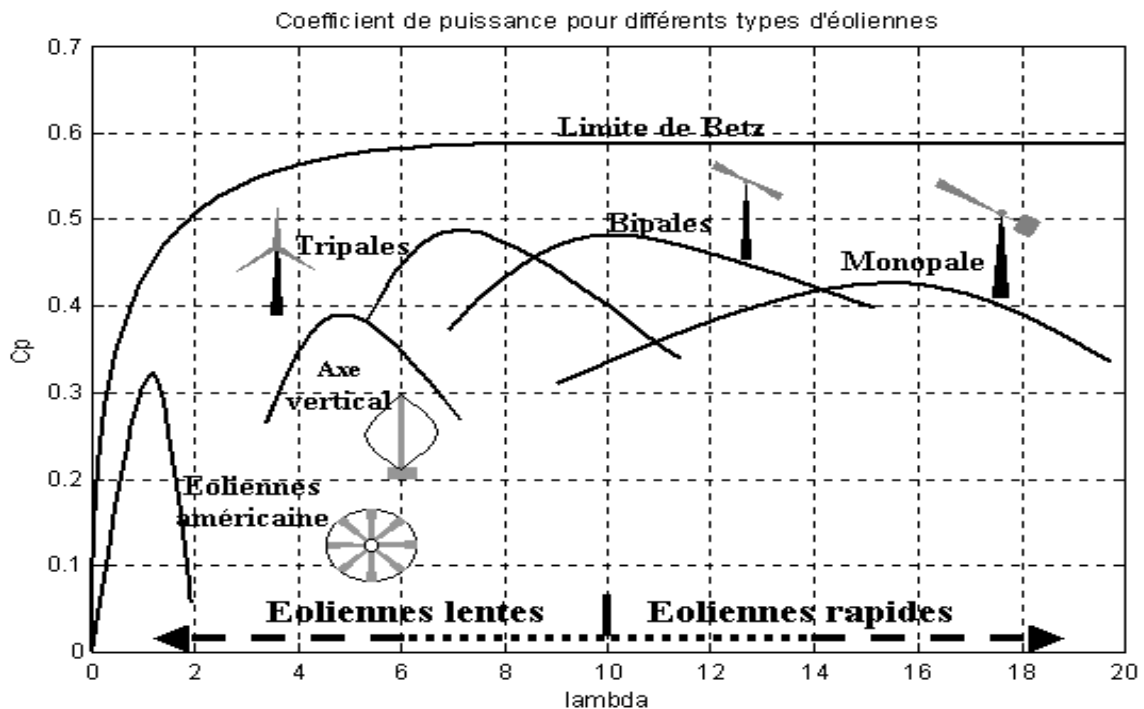


Figure (I-6) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1.6) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [17].

I.6.2 Production d'énergie mécanique

La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) P_{mt} = C_P(\lambda, \beta) P_{mt} = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{T1} \cdot R_T}{V} \quad (I.11)$$

Ω_{T1} : vitesse de rotation de la turbine (avant multiplicateur)

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) P_{mt} = C_p \left(\frac{\Omega_{T2} \cdot R_T}{V}\right) \cdot \beta P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I. 12)$$

Avec Ω_{T2} : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent [7].

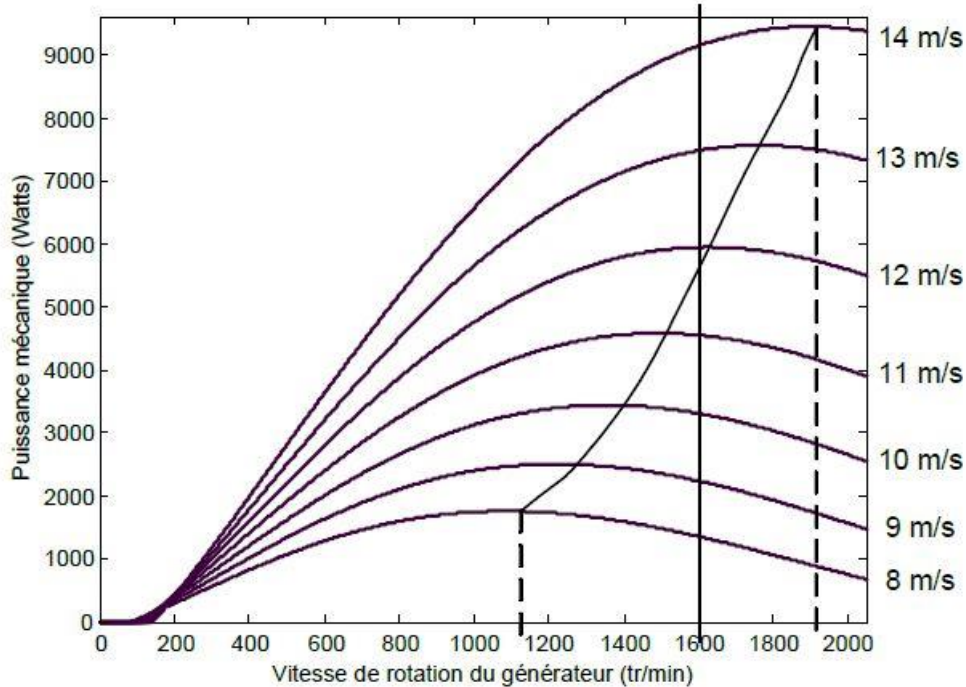


Figure (I.7) : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 *tr/min* sur la Figure I.7) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 *tr/min* pour cet exemple.

Conclusion

Dans le présent chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne et une étude descriptive de l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne a été présentée. Aussi, les différentes structures des éoliennes existantes et leurs technologies, et quelque chiffre sur l'énergie éolienne, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients ont été affichés et discutés.

CHAPITRE II :
MODELISATION ET STRATEGIES DE
COMMANDE DES TURBINES A
VITESSE VARIABLE

II.1 Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et aux stratégies de commande de la turbine éolienne variable.

II.2 Modélisation de la turbine

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

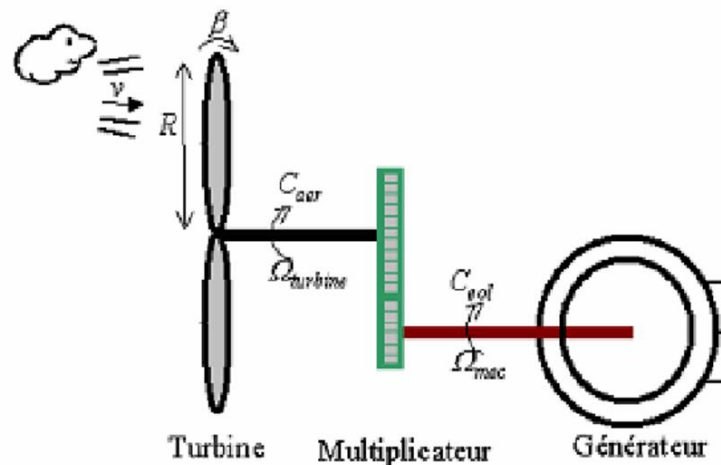


Figure (II-1) : Schéma de la turbine éolienne

II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois [18].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [18].

- Une composante moyenne à variation lente « V », qui représente le niveau de vitesse du Vent.

$V = 6 \text{ m/s}$ Pour un vent faible vitesse.

$V = 12 \text{ m/s}$ Pour un vent moyen vitesse.

$V = 18 \text{ m/s}$ Pour un vent fort vitesse.

La vitesse $V_0(t)$ du vent en un point peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne V (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations $V(t)$

L'expression de la vitesse du vent devient donc :

$$V_0(t) = V + V(t) \tag{II. 1}$$

Avec V : La valeur moyenne (composante lente) ;

$V(t)$: Les fluctuations (turbulences).

$$V = 8,5 + 2 \text{ SIN} (2,5t - \pi/5) + 2 \cdot \text{SIN} (4t - \pi/3) + 1,5 \text{ SIN} (5,4t + \pi/12) + 0,5 \text{ SIN} (2,5t + \pi/12) \tag{II.2}$$

Dans la suite de la modélisation, le profil du vent appliqué possède une vitesse moyenne de 12m/s représenté par la figure suivante :

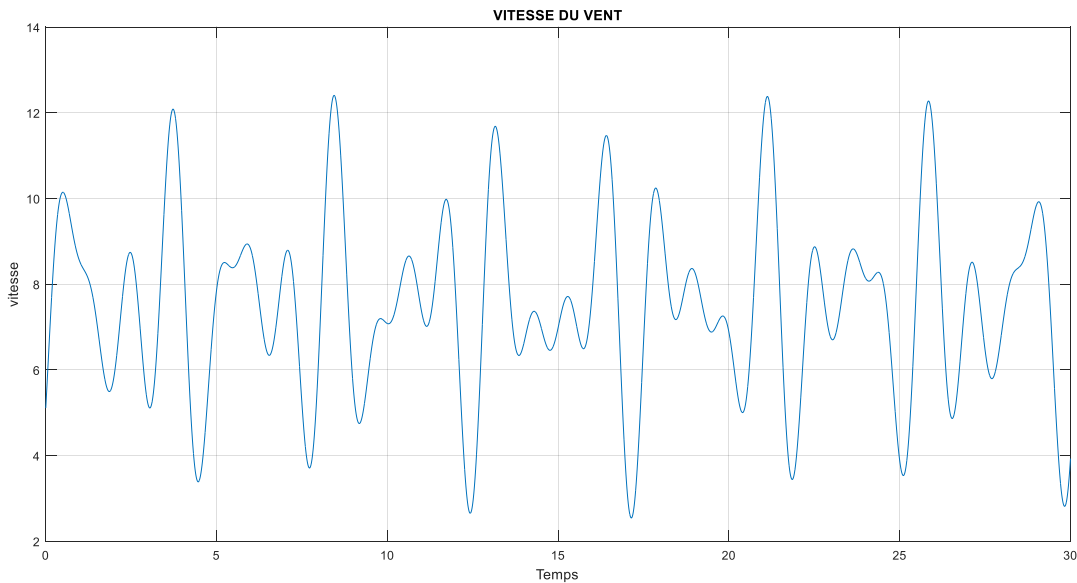


Figure (II-2) : Profil du vent appliqué à la turbine

II.2.2 Modélisation du système d'orientation des pales

La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale :

- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent. Les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances utilisent généralement ce système.
- Un système d'orientation des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante (Zone 3 de la figure II.9).

Les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieure, utilisent ce système.

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée.

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance [14].

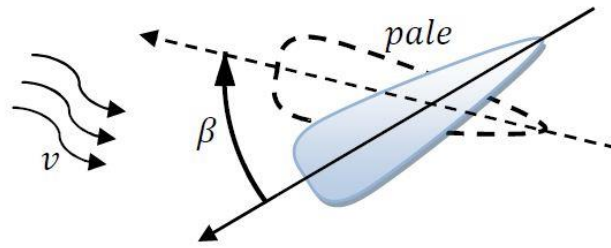


Figure (II-3) : Orientation des pales.

Généralement, le système d'orientation de l'angle d'orientation est approché par une fonction de transfert de 1^{er} ordre avec une constante de temps T_β . Lors de la modélisation du système de commande de l'orientation des pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à environ 10°/s lors d'un fonctionnement normal et à 20°/s pour des cas d'urgence [14].

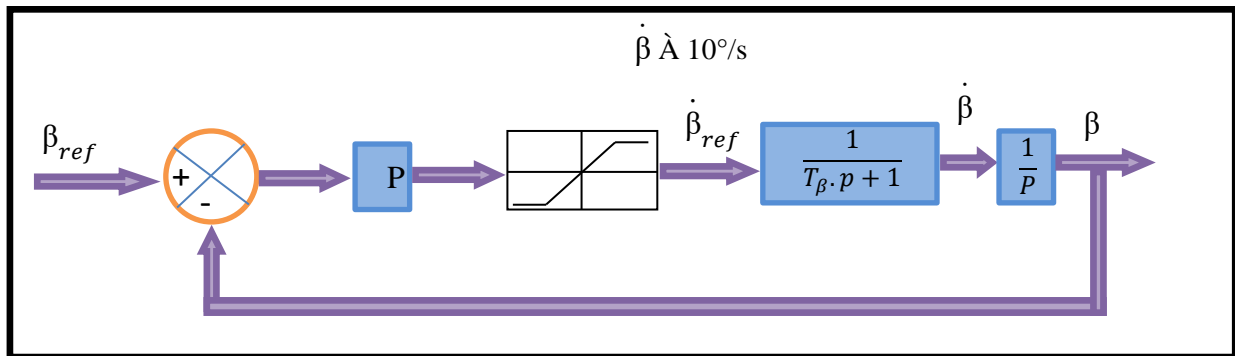


Figure (II-4) : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.

II.2.3 Modélisation du système aérodynamique

On suppose que la vitesse du vent qui traverse la surface palier par les pales de la turbine est constante. Donc la puissance aérodynamique $P_{aér}$ est donnée par l'expression suivante :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \tag{II.3}$$

Où :

ρ : Représente la densité de l'air (1.22 Kg /m³).

Mais il est impossible de récupérer 100% de l'énergie mécanique pour une éolienne, alors la théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_T :

$$P_T = C_p \cdot P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \tag{II.4}$$

C_p : Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

λ [rad] : le ratio de vitesse (rad), défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales Ω_T et la vitesse du vent v .

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \quad (\text{II.5})$$

La puissance aérodynamique extraite du vent est donnée par l'équation (II.4), On peut écrire alors le couple de la manière suivante :

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_P(\lambda, \beta) \quad (\text{II.6})$$

II.2.3.1 Modèle du multiplicateur :

Pour adapter la vitesse (moyenne) de la turbine à la vitesse de la génératrice (GADA). On utilise un multiplicateur entre la turbine et la GADA, ce dernier est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad (\text{II. 7})$$

Et

$$\Omega_T = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II. 8})$$

II.2.4 Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$:

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β .

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4Kw pour notre simulation.

C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β .

L'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 4Kwest approximé par l'équation soit [9]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.9})$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II-5), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.5$) est atteint pour une valeur du rapport d'avance $\lambda = 9.2$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta = 2$. Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite pour notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.

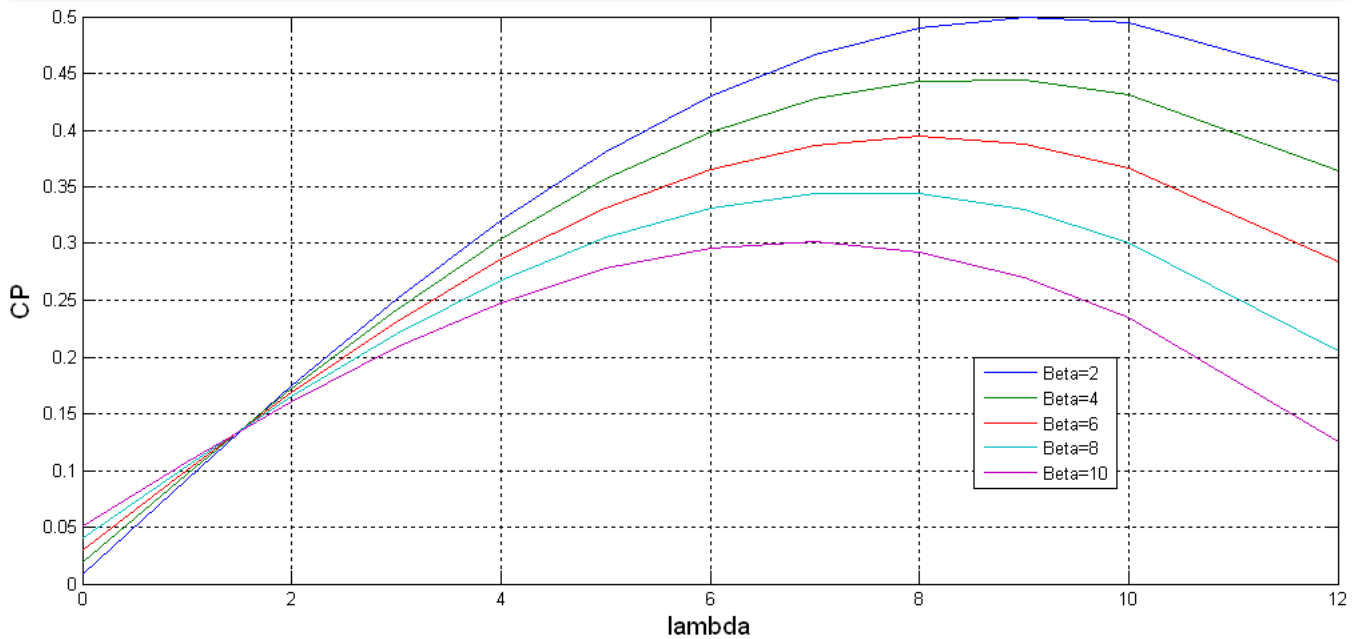


Figure (II-5) : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Et on observe que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de Betz(0,59).

II.2.5 L'équation dynamique de la turbine

Ce qui doit être modélisé c'est la transmission du couple et de la puissance captés par le rotor éolien, c'est-à-dire le comportement du train de puissance. Le train de transmission de puissance est constitué des pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur qui multiplie la vitesse de rotation de l'arbre rapide qui est couplé à son tour à la génératrice [13].

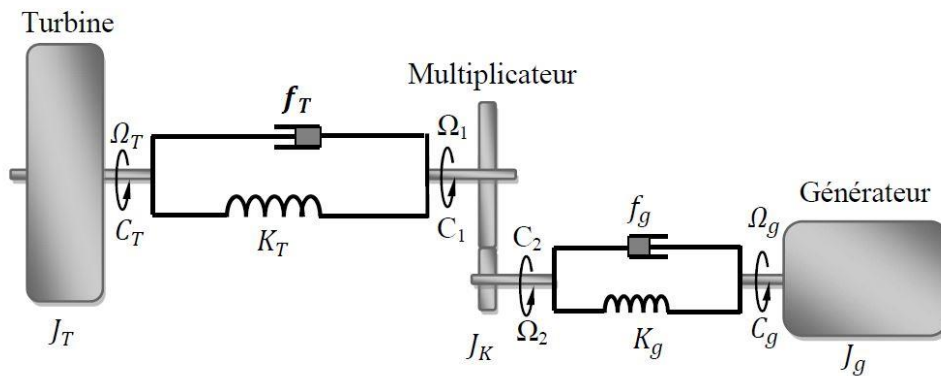


Figure (II-6) : Modèle de la turbine.

Le modèle à trois masses équivalent de la chaîne de conversion éolienne est présenté sur la Figure (II.5). Les masses correspondent à une grande masse du rotor de la turbine éolienne (90% du moment d'inertie global), masse pour le multiplicateur (2 à 4%), et une masse (6 à 8%) pour le générateur respectivement [2,11]. En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres [13], ce qui nous permet déposer les hypothèses simplificatrices suivantes [19] :

Hypothèses simplificatrices

- La voiture de la turbine comprend trois pales de longueur R_T chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie J_T .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.
- les arbres de transmission sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant

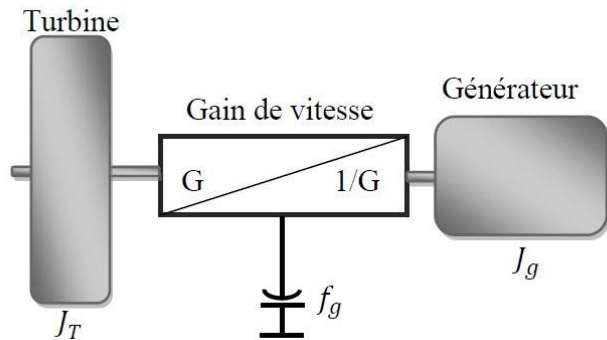


Figure (II-7) : Modèle simplifié de la turbine

$$\frac{c_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g \tag{II. 10}$$

C_T, C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T, J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T, f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f$$

Donc, l'équation mécanique sera comme :

$$\frac{c_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \tag{II.11}$$

Ainsi, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloc est donné sur la figure ci-dessous.

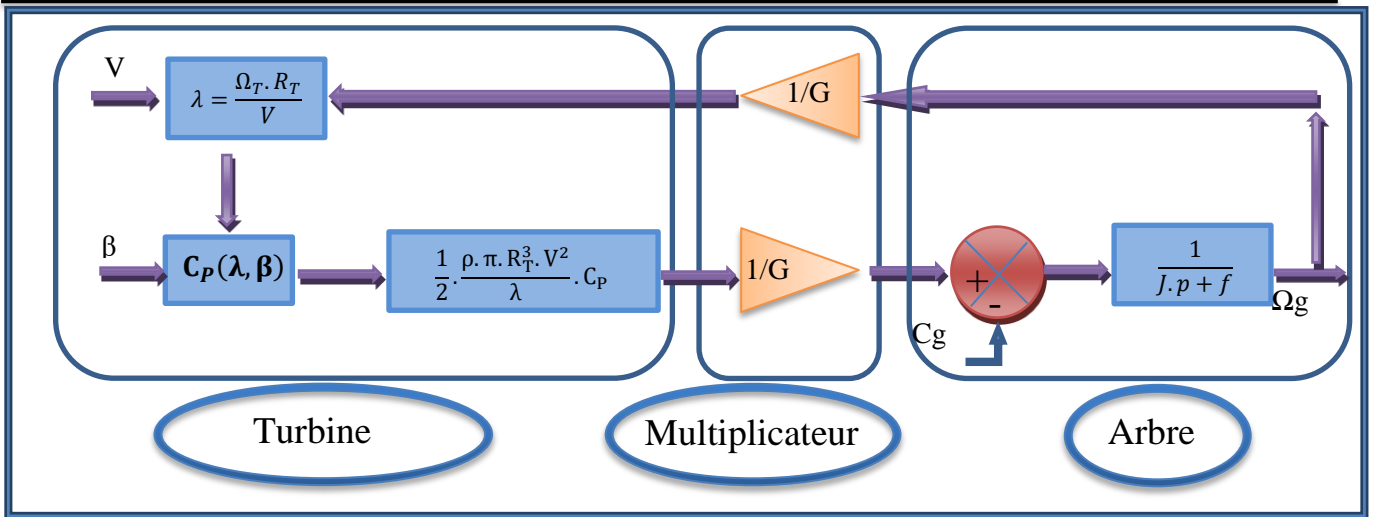


Figure (II-8) : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.3 Stratégie de commande de la turbine

Une turbine éolienne est un dispositif qui capture une partie de l'énergie du vent et la convertit en un travail utile. En particulier, un système de conversion d'énergie éolienne relié à un réseau d'énergie électrique doit être conçu pour réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie.

II.3.1 la commande dans la zone I de fonctionnement en dessous de la puissance nominale

Dans cette zone de fonctionnement, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement. Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, ces deux variables doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de $C_{p_{opt}} = (\lambda_{opt}, \beta_{opt})$. On fixe donc l'angle de calage à sa valeur optimale β_{opt} . La vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} [7].

III.3.2 Caractéristique de puissance

- Les objectifs que nous venons de les cités permet de tracer la caractéristique que la turbine doit suivre pour répondre aux exigences de la commande. Cette caractéristique est représentée sur la figure (II-9).

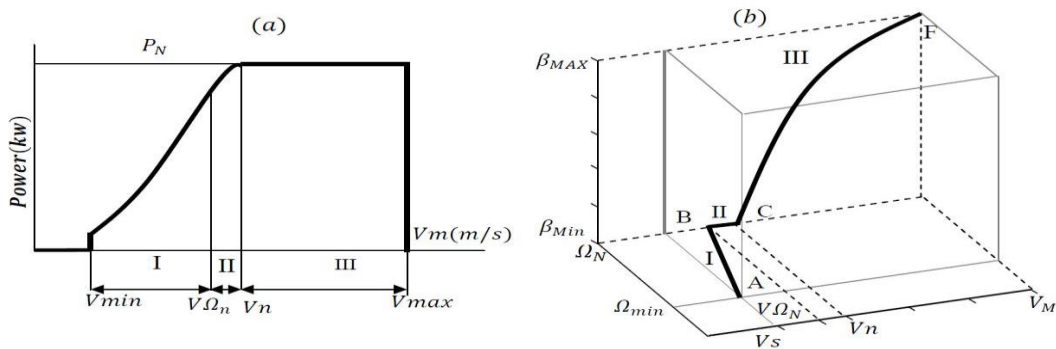


Figure (II-9) : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.
 (a). dans le plan (V, P) . (b). dans le plan (V, Ω, β) .

Cette caractéristique, idéale, montre trois zones différentes avec des objectifs de commande distinctifs [19, 18, 8].

- **Zone I** : Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking).
- **Zone II** : Zone de transition entre la zone de charge partiel (Zone I) et la zone de charge nominale (Zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits généré).
- **Zone III** : Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales.

II.3.3 Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance)

Dans cette zone (Zone II), on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$. Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale C_{pmax} [20, 21, 22]. La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT.

III.3.3.1 Principe de la MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_T , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur $\frac{dP}{d\Omega_T}$. Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. On le déduit à partir de l'équation [16] :

$$\frac{dP}{d\Omega_T} = \frac{dP}{dt} \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right)^{-1} \quad (\text{II. 12})$$

La recherche du maximum de puissance peut se faire par action sur le couple (commande indirecte de la vitesse)

II.3.3.2 Commande indirecte de vitesse (Zone II)

Cette technique a la particularité de considérer que l'éolienne est en régime permanent. Quoique simples d'utilisation, elles présentent quelques inconvénients. Il est naturel de considérer qu'un système éolien est stable autour d'un point d'équilibre quelconque de la courbe de rendement maximal pour un couple du générateur et une vitesse du vent constants. La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan (Ω_T, C_T) par l'ensemble des points $E(\Omega_{Topt}, C_{Topt})$ correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans laquelle l'éolienne fonctionne (Figure II.10).

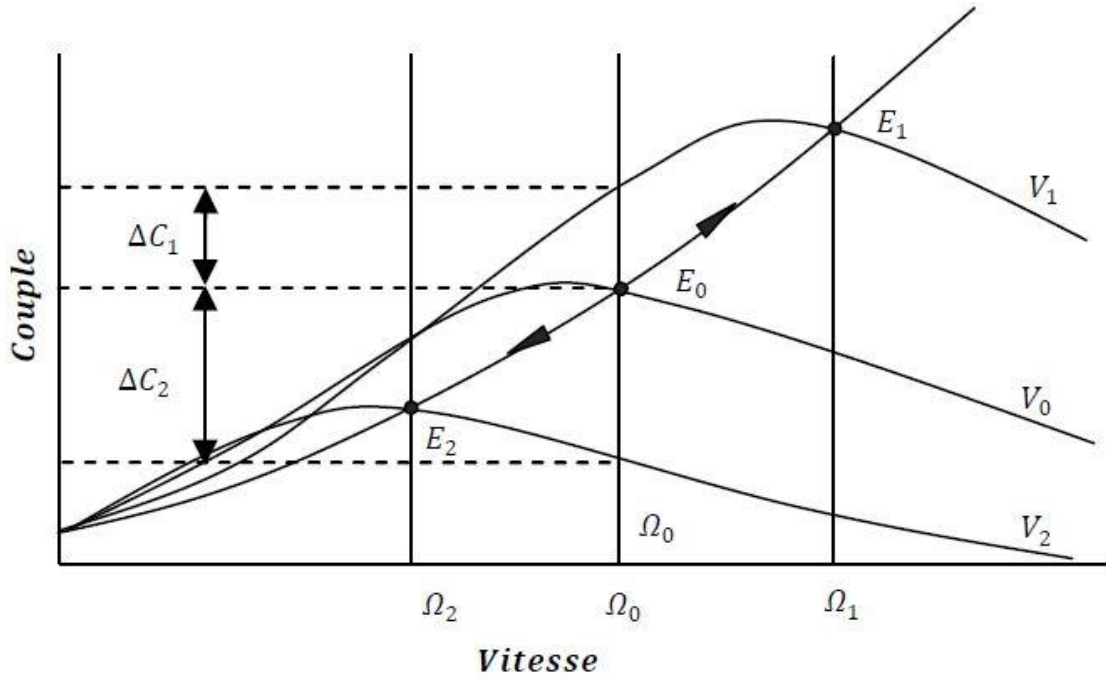


Figure (II-10) : Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 13})$$

$C_{T_{opt}}$: Le couple optimal.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Cette équation est écrite sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G .

$$C_{G_{opt}} = \frac{1}{2G} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 14})$$

Si le couple électromagnétique C_G est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal [16, 23, 20, 24]. Cependant, l'équation (II.14) exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre situé sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace d'une part, et très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation d'une autre part [2, 14, 8].

L'utilisation d'un filtre spatial peut corriger le problème des turbulences en faisant un filtrage passe-bas de la mesure de l'anémomètre, mais le phénomène du cisaillement (variation de la vitesse du vent avec la hauteur des pales) reste non pris en charge.

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème [20]. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit [25].

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II.15})$$

$$C_{P_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot V^2 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \Omega_T^2 \quad (\text{II. 16})$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor au point de fonctionnement.

$$C_{P_{opt}} = k_{P_{opt}} \cdot \Omega_T^2 \quad (\text{II. 17})$$

II.4 Résultats de simulation

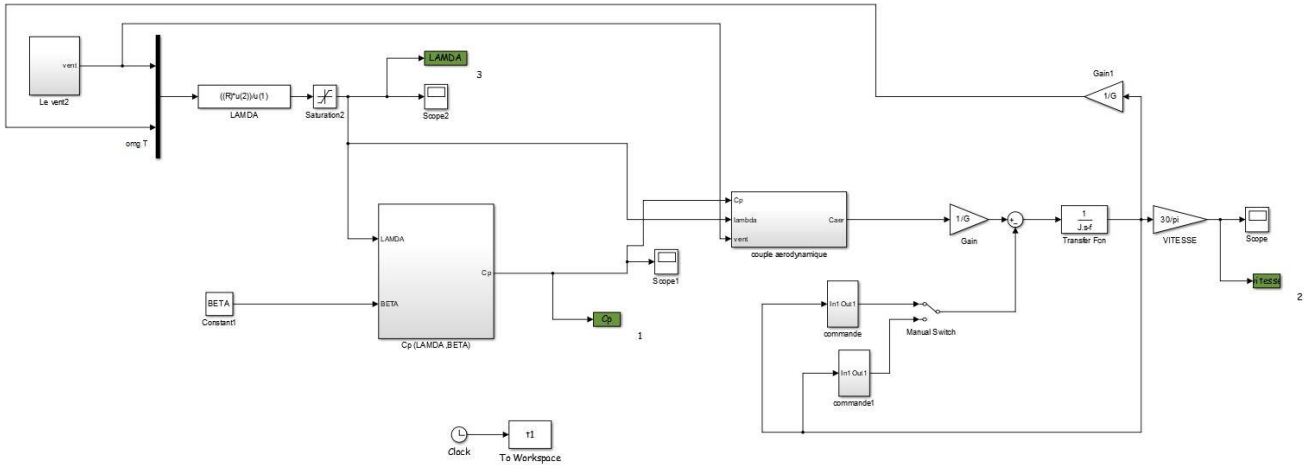


Figure (II-12) : Schéma block de la turbine.

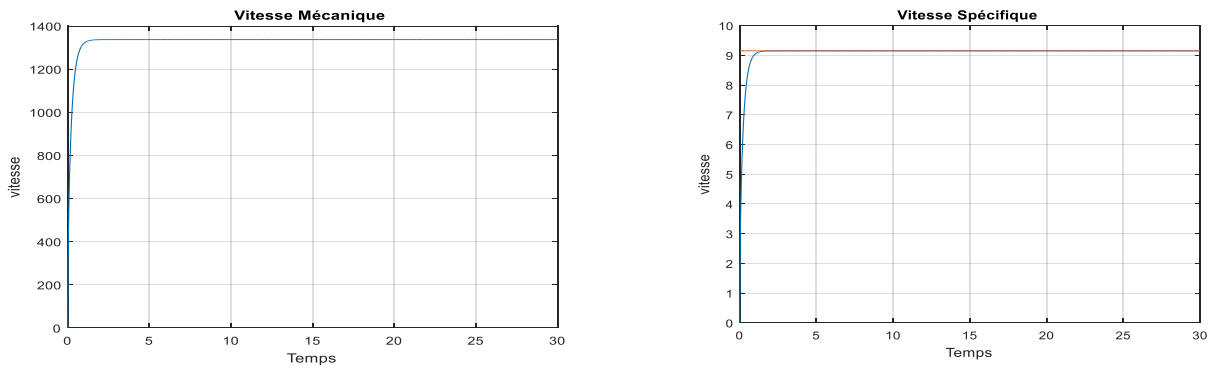


Figure (II-13) : La vitesse mécanique et la vitesse Spécifique avec la vitesse du vent constante (8,5 m/s).

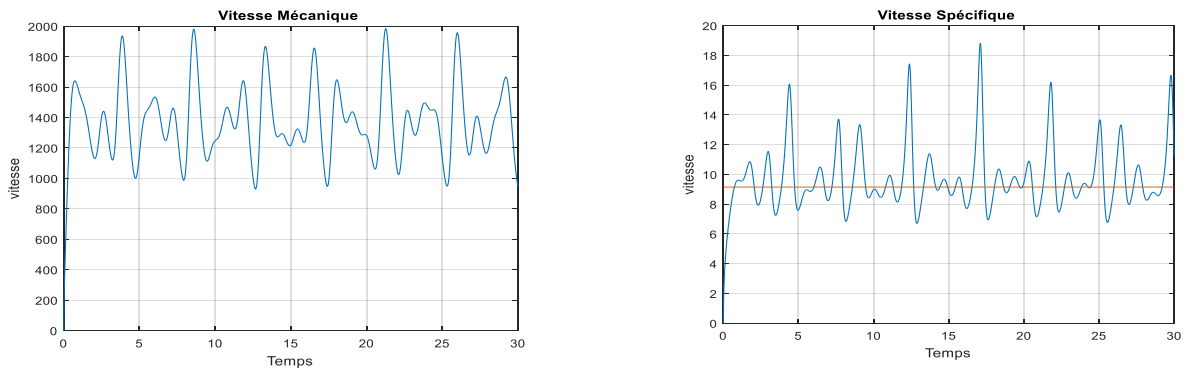


Figure (II-14) : La vitesse mécanique et la vitesse Spécifique avec le profil de la vitesse du vent constante.

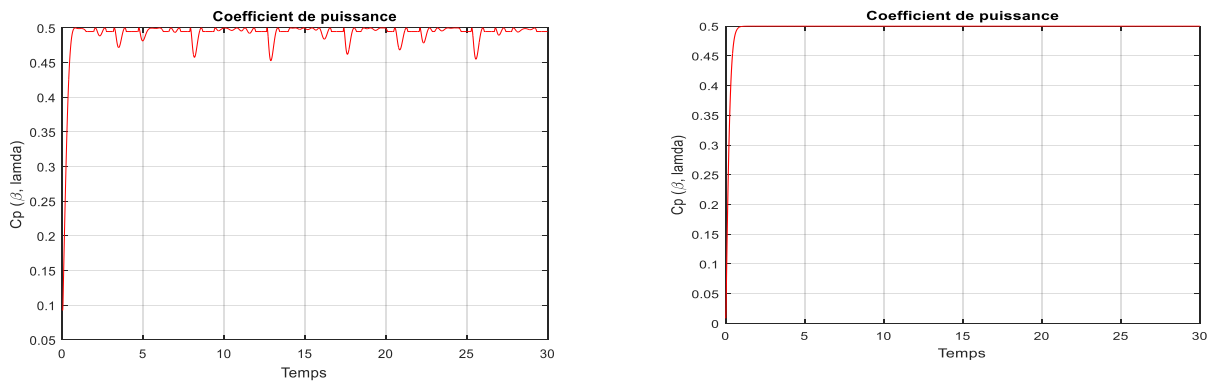


Figure (II-15) : Le coefficient de puissance Réelle et Désiré.

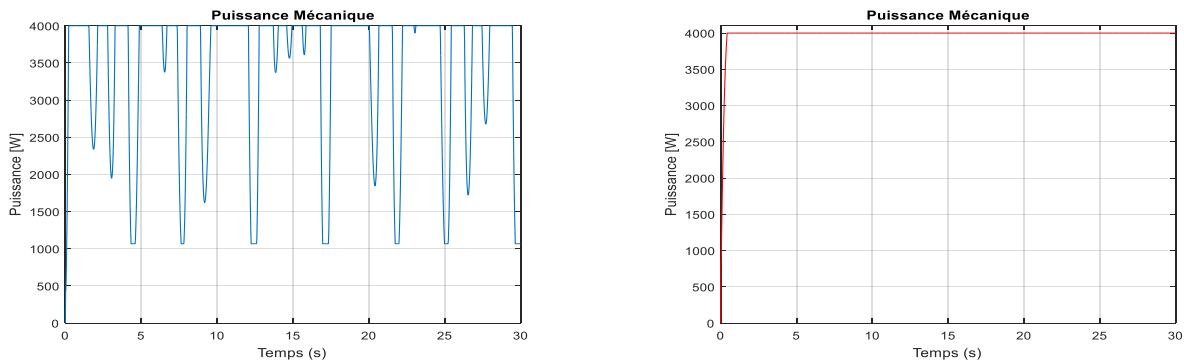


Figure (II-16) : La puissance mécanique à la sortie de la turbine avec la vitesse du vent variable et constante ($V = 8 \text{ m/s}$)

II.4.1 Interprétations des résultats

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne.

L'environnement Matlab - Simulink nous permet de développer les schémas blocs de régulation pour les associer aux modèles électriques.

Nous n'allons pas raccorder la turbine et son multiplicateur à la génératrice. Nous observons donc l'allure de la vitesse mécanique, du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de l'évolution du vent avec les conditions suivantes :

- un angle de calage fixe $\beta = 2^\circ$.
- rapport du multiplicateur $G = 5,4$.
- rayon des pales $R = 3\text{m}$.

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. La figure (II-2) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faibles est autour de $(3 \text{ m/s}$ jusqu'au 13 m/s).

II.5 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné une vue sur la turbine éolienne utilisée dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement de turbine éolienne, partant de la conversion de L'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (**Loi de Betz**)

Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants. Dans ce qui suit nous allons étudier la génératrice la plus utilisé dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment la génératrice asynchrone à double alimentation.

CHAPITRE III
MODELISATION DE LA GENERATRICE
ASYNCHRONE A DOUBLE
ALIMENTATION

III.1. Introduction

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée a suscité un grand intérêt sur tout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables.

III.2 - Description du système

Le système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une MADA, est illustré sur la figure (III-1). La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV). Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via un filtre triphasé de courant et deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu.

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur côté rotor ou bien coté MADA « CCM » et le convertisseur côté réseau « CCR », transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite jusqu'à 30% de la puissance nominale du stator de la MADA, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse autour de la vitesse du synchronisme. Ceci constitue le principal avantage de cette structure.

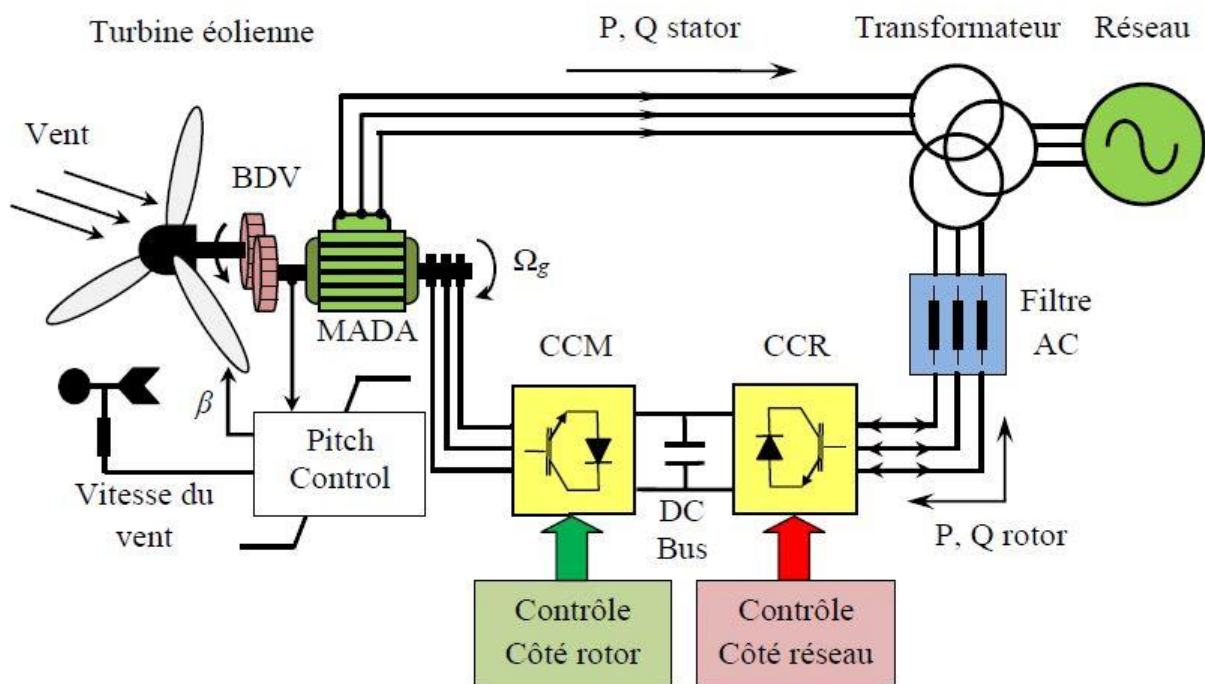


Figure (III.1) : Système de conversion éolienne à base de la MADA

III.3 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 [27]; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures.

Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écuréuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [28, 29]. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

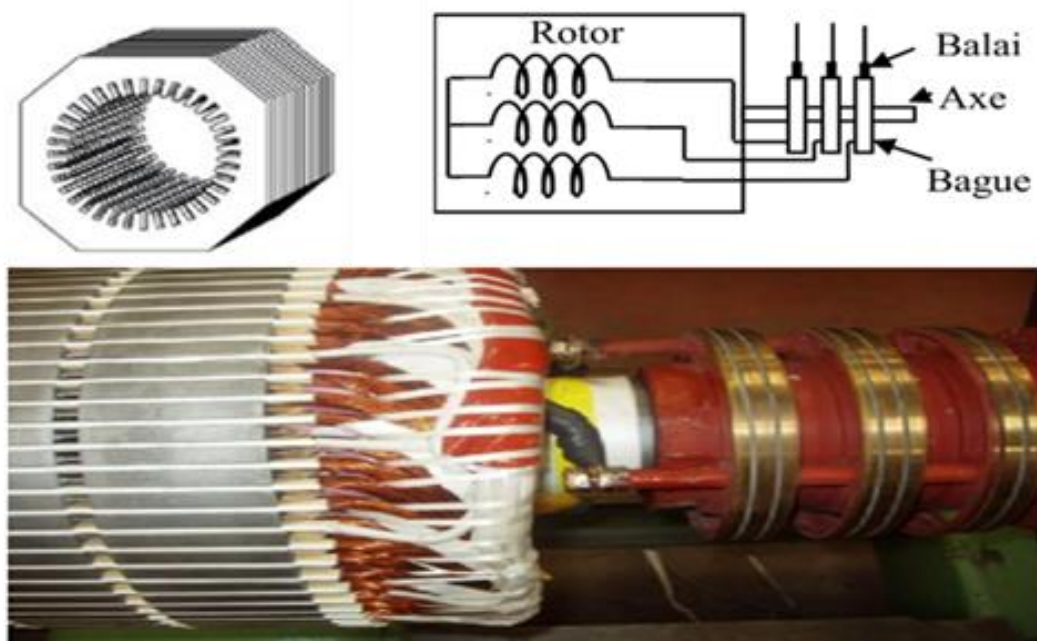


Figure (III-2) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

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

III.3.1 - Machine à double alimentation en cascade asynchrone

La machine à double alimentation en cascade asynchrone (Cascaded Doubly Fed Induction Machine) constituée de deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré sur la figure (III-3) Le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/AC de fréquence. Il est également possible de piloter l'ensemble du système à travers le stator alimenté par le convertisseur [30, 31].

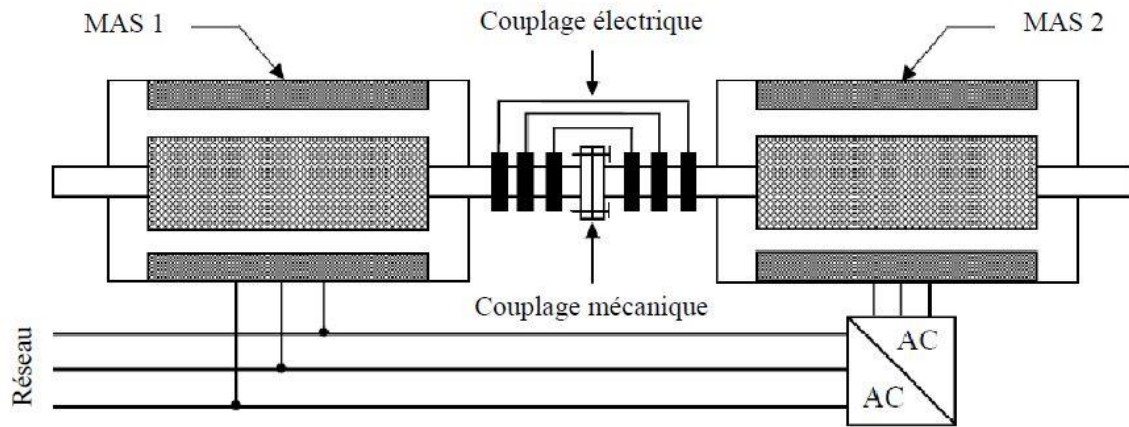


Figure (III-3) : Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone.

Ce type de machines offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard [30].

III.3.2 Machine à double alimentation cascadée à un repère

Il s'agit de deux machines asynchrones à cage connectées mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La Figure (III-4) présente le schéma de principe de cette machine, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur AC-AC.

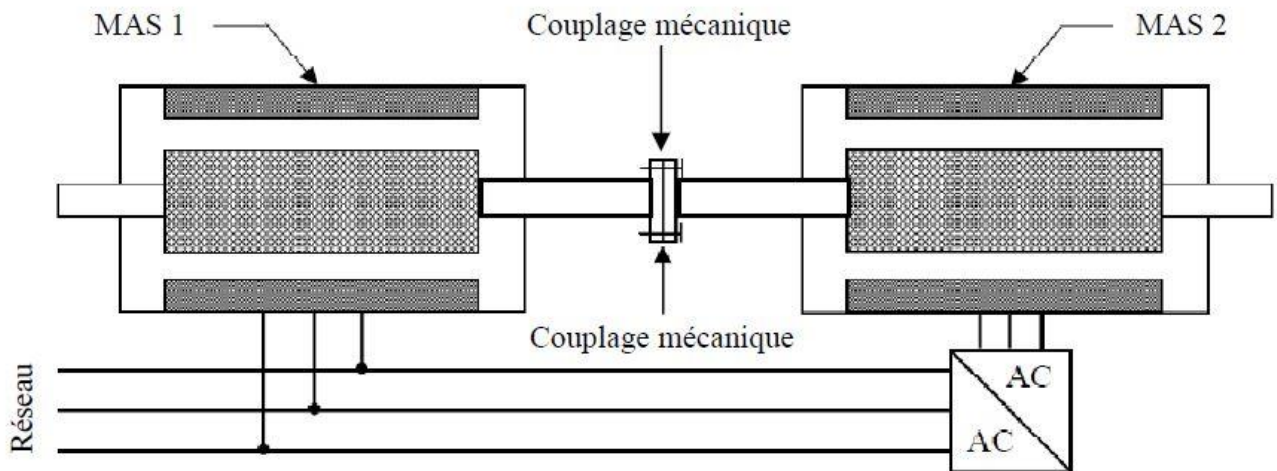


Figure (III-4) - Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

III.3.3 MADA sans balais

Brushless Doubly Fed Induction Machine, cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés ayant des nombres de paires de pôles différents logés la même armature du stator. L'un des deux bobinages est connecté directement au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine à travers un convertisseur AC/AC (Figure (III-5)). Le rotor de cette machine possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste: il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques, où le nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

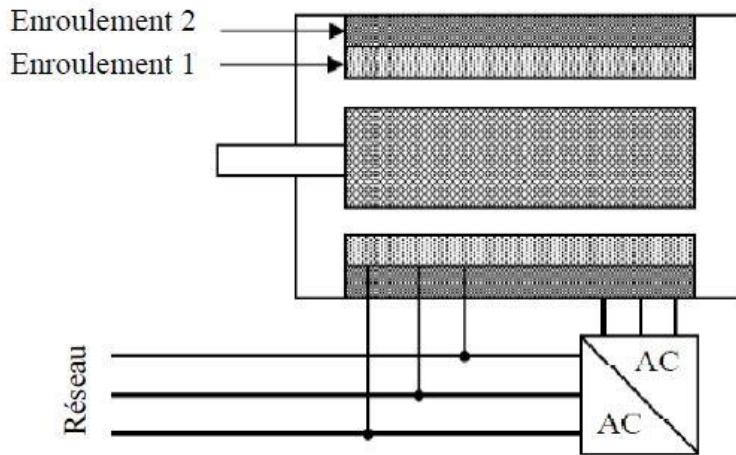


Figure (III-5) - Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable, de plus le convertisseur placé entre le stator de faible puissance et le réseau est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins volumineux et moins chère. La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de paires de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication. Parmi les types de machines à double alimentation sans balais qui sont gagnés un grand intérêt ces dernières années, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (Doubly Fed Reluctance Machine) qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable) [30].

III.3.4 Principe de fonctionnement

La machine asynchrone à double alimentation que nous allons étudier est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode générateur.

III.3.4.1 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator Figure (III-6). La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

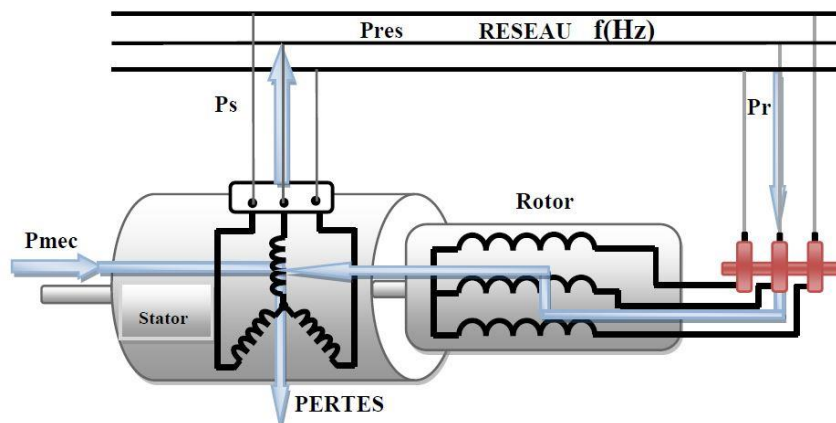


Figure (III-6) : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

III.4 Aperçu sur la configuration de la MADA a rotor bobiné :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

III.4.1 Configuration pour application génératrice :

On dans cette configuration s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

III.4.1.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (III-8), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance rotorique. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs [33].

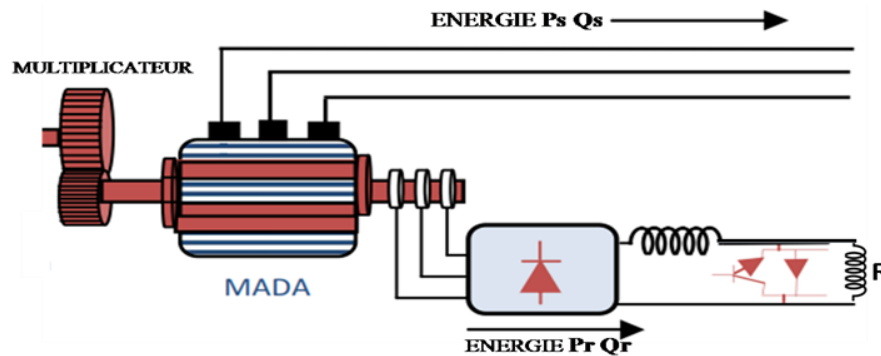


Figure (III-8): MADA à énergie rotorique dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système.

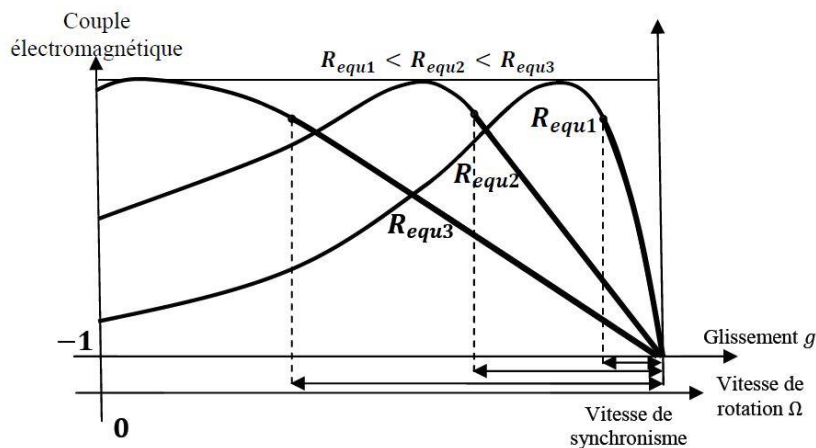


Figure (III-9): Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.

III.4.1.2 MADA -structure de kramer :

Pour augmenter le rendement de la structure du système précédent, cette structure, figure (III-10). Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

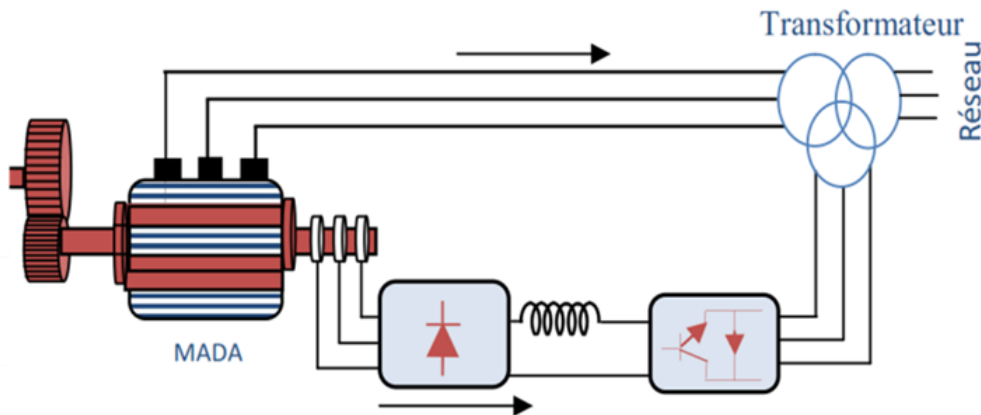


Figure (III-10):MADA, structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [34].

III.4.1.3MADA structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, cette topologie consiste à remplacer l'association redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer [35], Cette variation peut être positive (fonctionnement hypo-synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone) [34].

Comme dans le cas de la machine brushless, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [32].

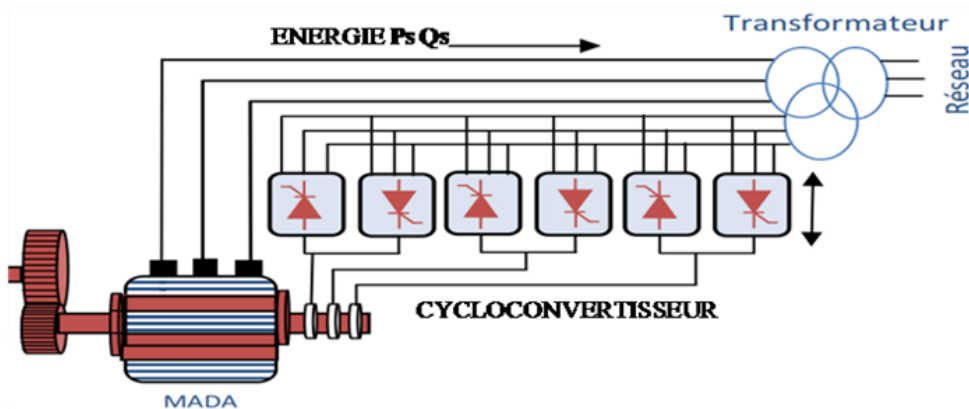


Figure (III-11): Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

III.4.1.4 MADA structure de scherbius avec convertisseurs MLI :

Une autre structure intéressante figure (III-12) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [33].

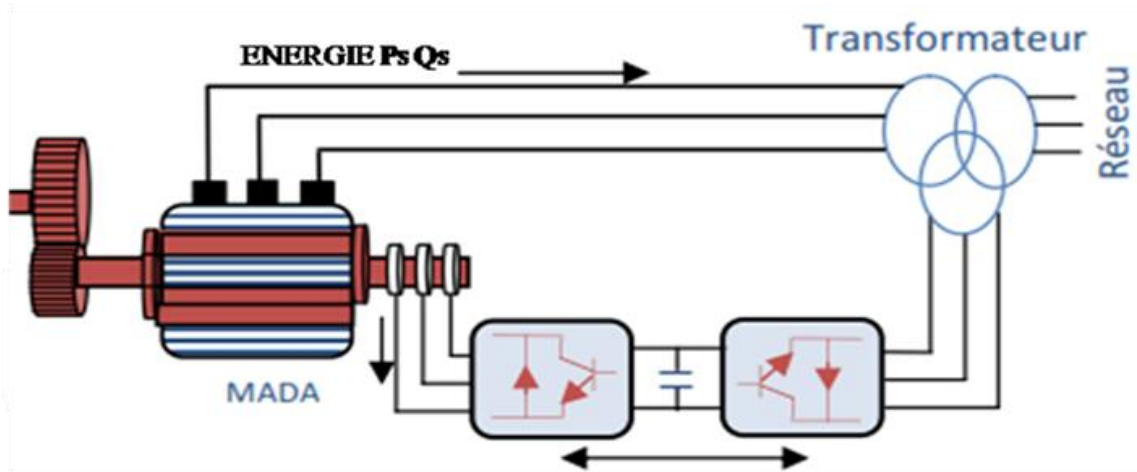


Figure (III-12): Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette structure est alors particulièrement adaptée pour la génération d'électricité dans les systèmes et qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et d'applications.

III.5 Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la "MADA" est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens, [36]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la "MADA" comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que, [34] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La "MADA" peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [37] :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charge etc... .

On note que les applications de la "MADA" en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [38].

III.6 Avantages et inconvénients de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

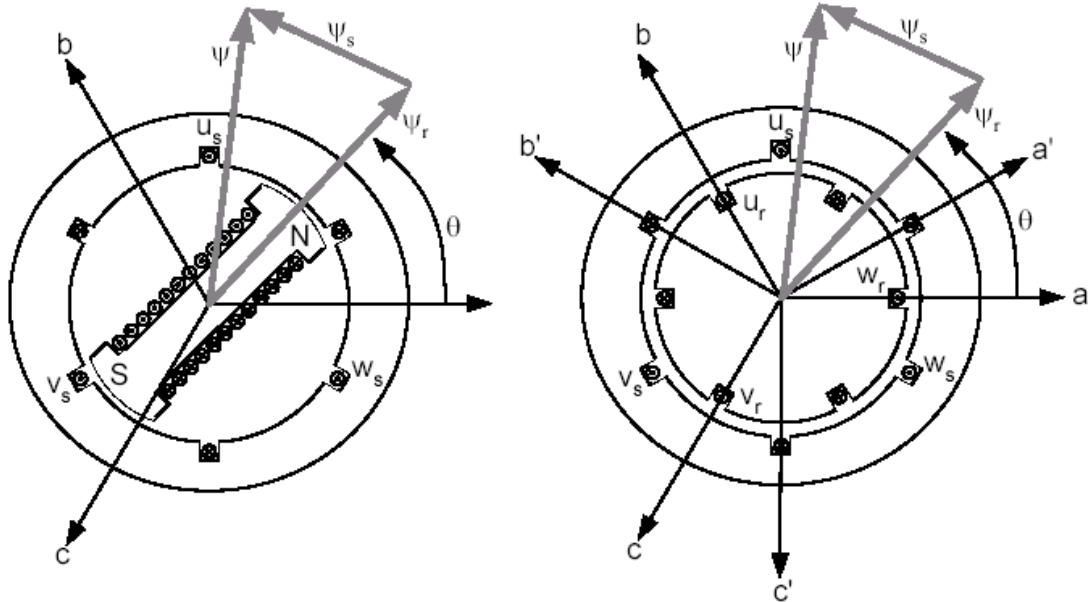


Figure (III-13): Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux ϕ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques ϕ_s et du flux rotorique ϕ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique ϕ_r qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système [7].

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

III.6.1 Avantages de la MADA : [12]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).

- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique .
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir:
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - Régulation découplée des puissances active et réactive.

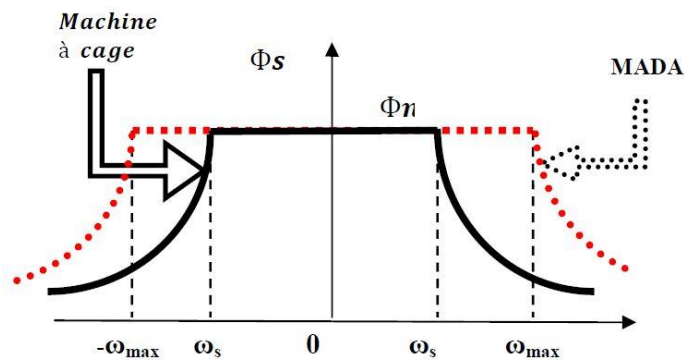


Figure (III-14): Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA .

III.6.2. Inconvénients de la MADA :

- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.

III.7 Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

III.7.1 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions [39] ;

- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

III.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La génératrice asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité

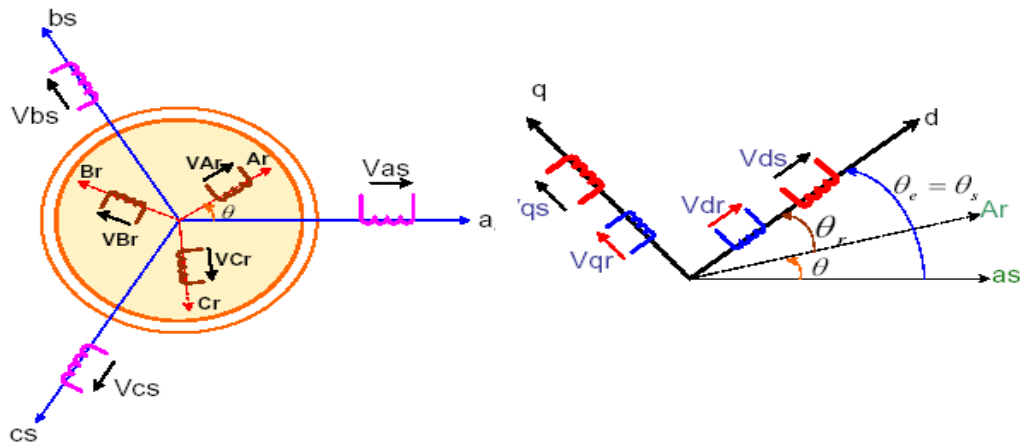


Figure (III-15): Représentation de la MADA dans les deux repères.

- Représentation de la MADA dans le repère (abc) ;
- Représentation de la MADA dans (dq).

III.8.1. Hypothèses simplificatrices :

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- 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.

III.8.2 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA :

III.8.2.1 Equations électriques :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S] \cdot [I_S] + \frac{d}{dt} [\varphi_S] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (III.1)$$

On a aussi :

$$\begin{aligned} [V_S] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} & ; & [I_S] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} & ; & [R_S] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [V_R] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} & ; & [I_R] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} & ; & [R_R] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Où R_S et R_r sont respectivement la résistance des enroulements statoriques et rotoriques.

Et les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_S] = [L_{SS}] \cdot [I_S] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_S] \end{cases} \quad (III.2)$$

Avec :

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

Où L_{SS} , L_{rr} : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s , M_r : sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$ et $[M_{sr}]$: est l'inductance mutuelle stator-rotor

M_{\max} : Est Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant les flux par leurs expressions dans (III.1), on obtient :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S] \cdot [I_S] + \frac{d}{dt} ([L_{SS}] \cdot [I_S] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_R] = [R_R] \cdot [I_R] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_S]) \end{cases} \quad (III.3)$$

III.8.2.2 Equations mécanique

L'équation mécanique de la machine est représenté par :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (II.4)$$

Avec respectivement :

- C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine ;
- C_r : Le couple résistant ;
- f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- $J \frac{d\Omega}{d\theta}$: l'inertie des parties tournantes.

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

$$C_{em} = p [I_S]^t \frac{d\Omega}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]]$$

III.8.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q)

III.8.3.1 La Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal. Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée « du repère (a, b, c) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ». La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Et on a aussi : $[x_{dq0}] = [x_{abc}][P(\theta)]$

III.8.3.2 Application de la transformation de Park

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux (III.6) et des tensions (III.7) et (III.8)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- L_r et L_s : sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.
- M : l'inductance mutuelle.

φ_{sd} et φ_{rd} , φ_{sq} et φ_{rq} sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (W_e - W) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (W_e - W) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Où $w_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ et $w = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que : $\theta_e = \theta + \theta_r$

En choisissant le repère lié au champ tournant ($w_e = w_s$), car c'est le mieux adapté lors d'une étude de la commande des machines [40], on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{rd}, V_{sq} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé ;

w_s et w_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques .

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

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (III.10)$$

Avec P le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (III.11)$$

III.8.4 Mise sous forme d'équation d'état

Notre but est de représenter les équations établis ci-dessus sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (III.12)$$

Avec :

$$[X] = [\varphi_{sd} \ \varphi_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^t, \quad [U] = [v_{sd} \ v_{sq} \ v_{rd} \ v_{rq}]^t$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & W_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -W_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(W_s - W_r) & -\delta & W_r \\ \beta(W_s - W_r) & \alpha & -W_r & -\delta \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

A , β et δ sont des constantes définit comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r}, \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r}, \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right)$$

Pour faire la simulation un peu facile, nous avons écrit la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + W_s \cdot [A_2] + W_r \cdot [A_3] \quad (II.13)$$

Donc on aura les matrices suivantes :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, \quad [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

III.9. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement générateur a été faite. Sons modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW. Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min , alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

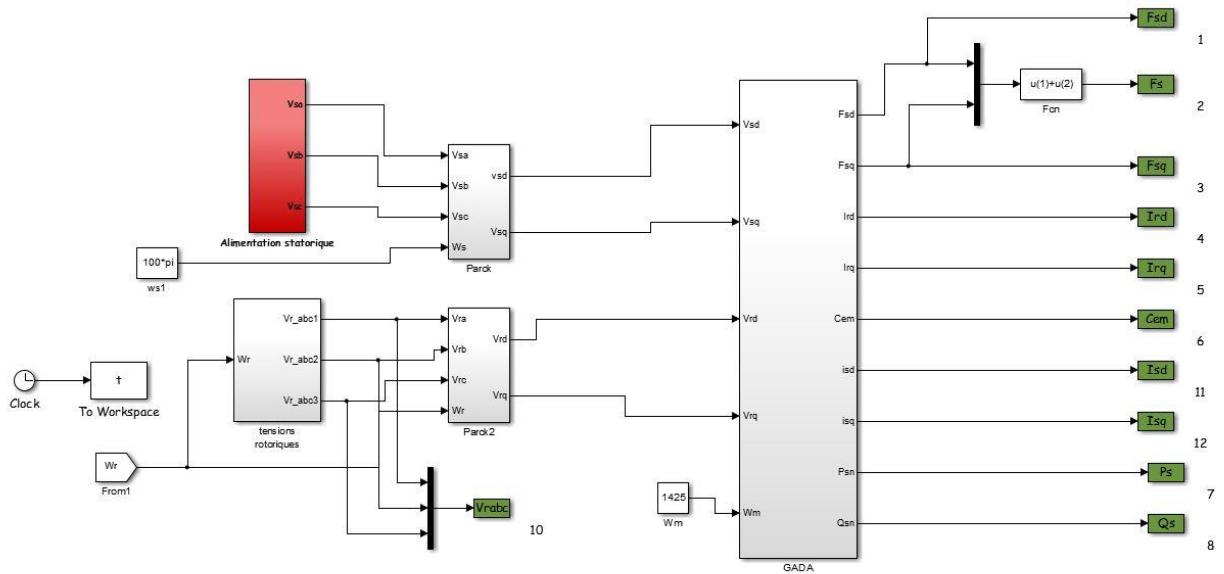


Figure (III-16): Schéma block de la GADA avec les sources des tensions (Rotorique et Statorique)

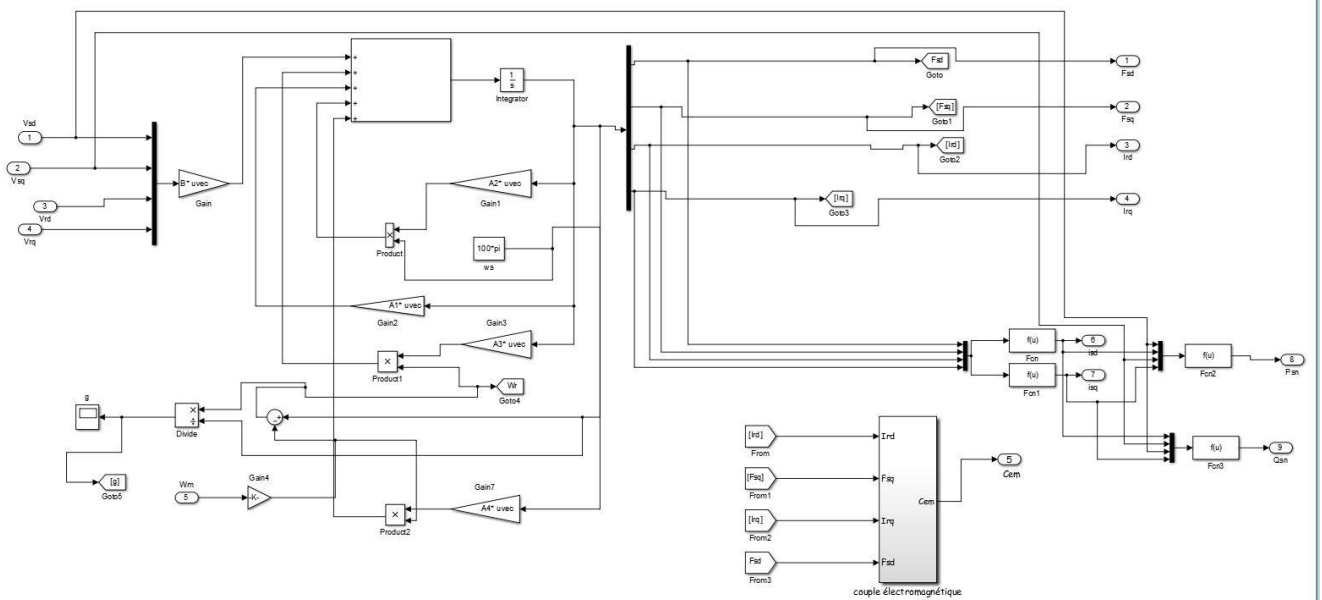


Figure (III-17): Schéma block de la GADA.

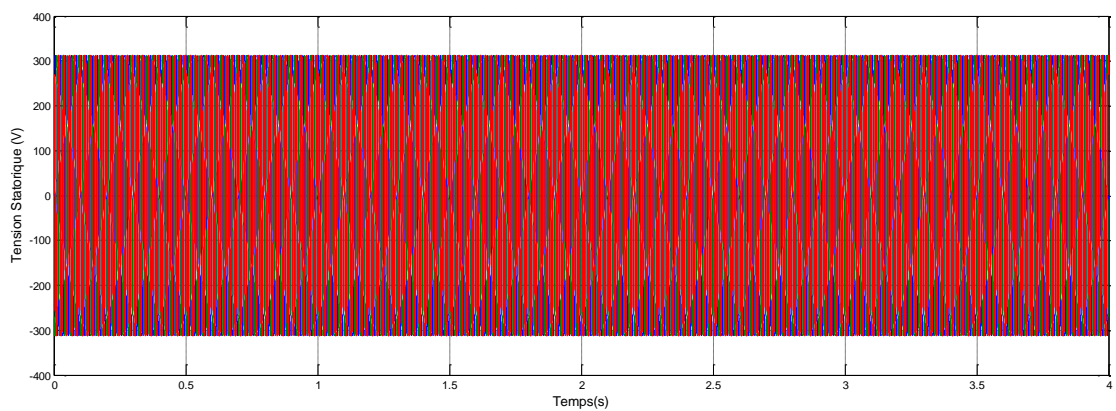


Figure (III-18): Les tensions d'alimentations au stator.

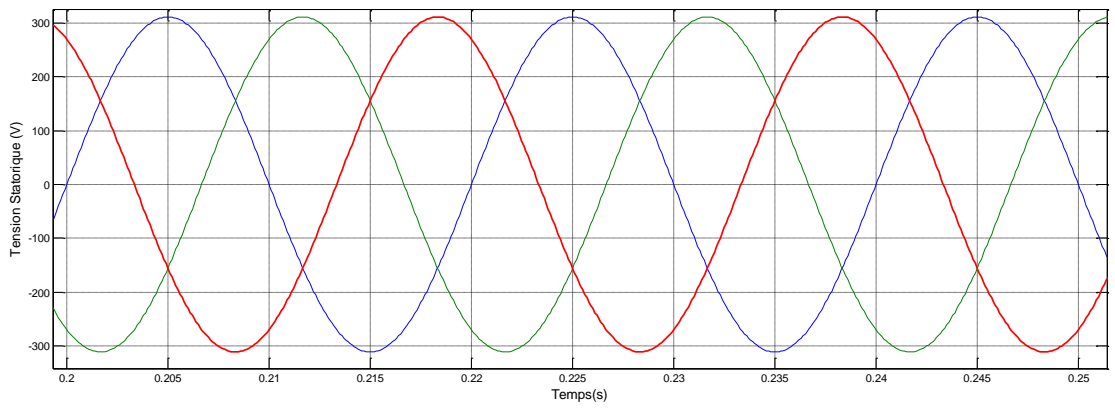


Figure (III-19): Les tensions d'alimentations au stator (Zoom).

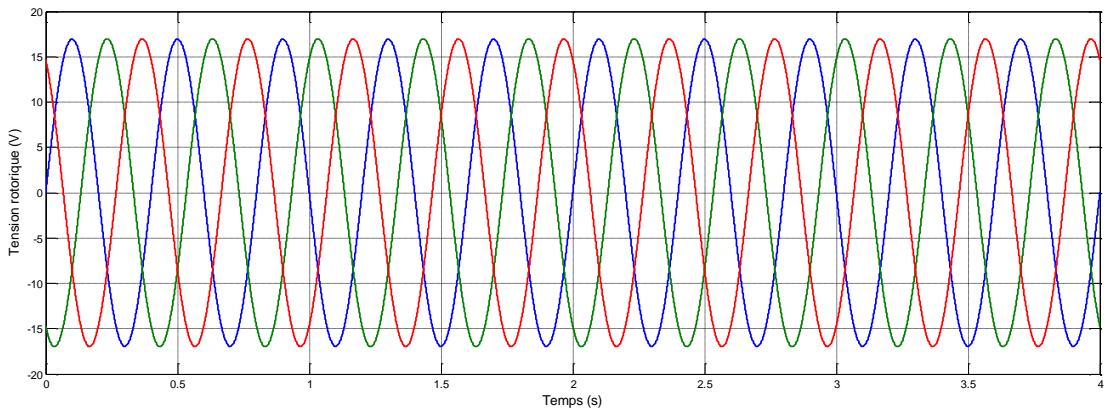


Figure (III-20): Les tensions d'alimentations au rotor.

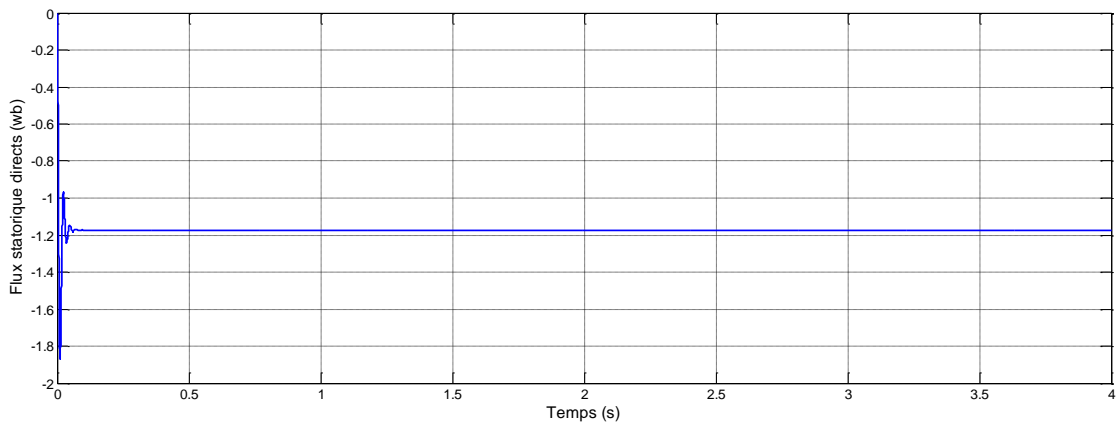


Figure (III-21): Flux statorique directs (wb).

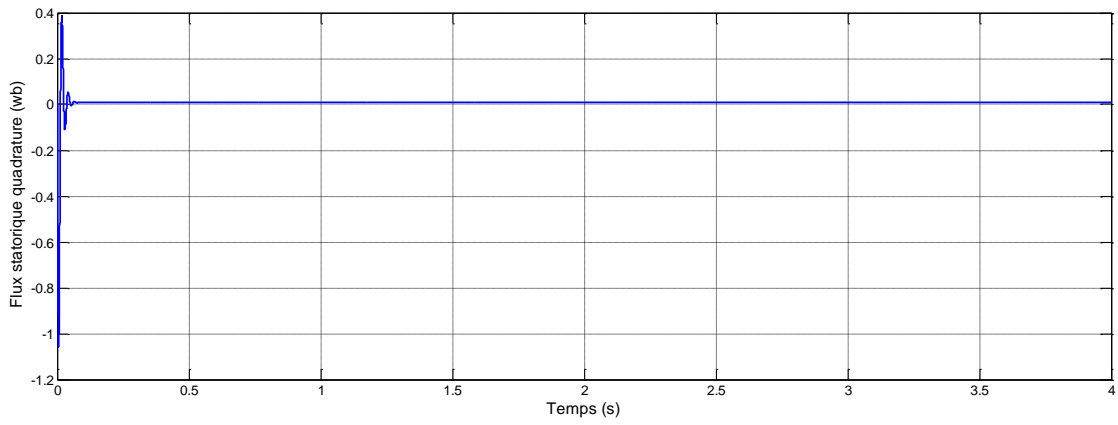


Figure (III-22): Flux statorique quadrature (wb).

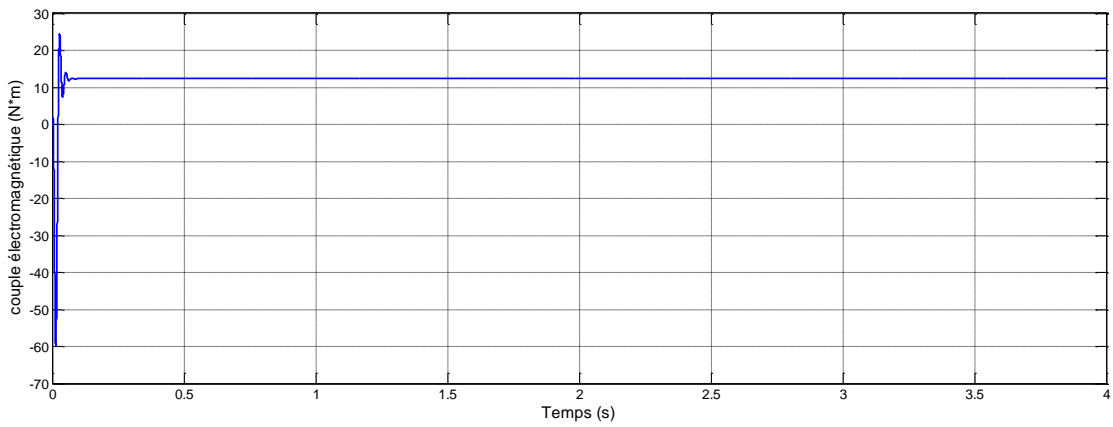


Figure (III-23): Le couple électromagnétique.

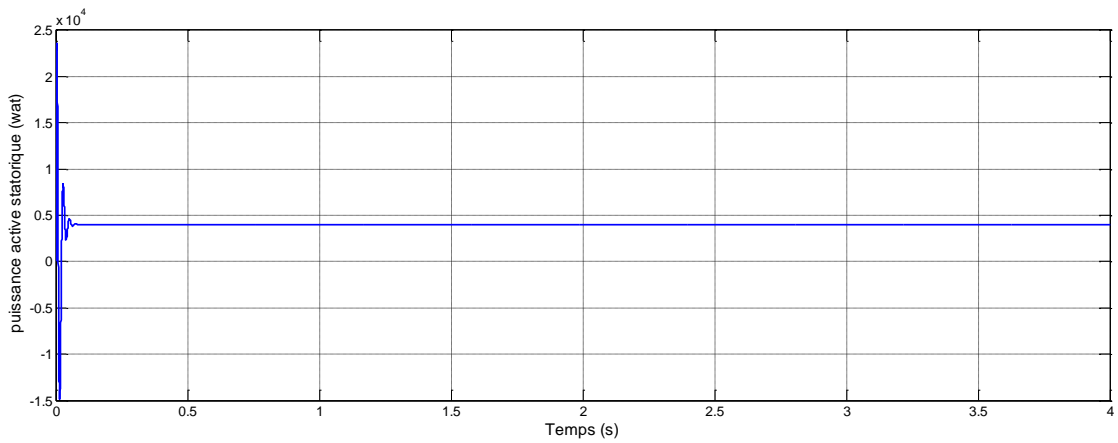


Figure (III-24) : La puissance active statorique.

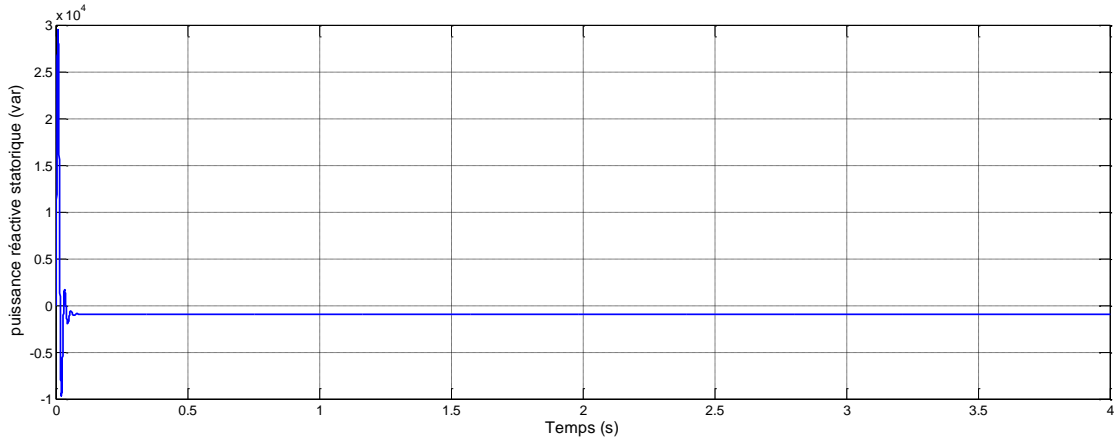


Figure (III-25) : La puissance réactive statorique.

III.9.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environ 0.02 s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques, on peut signaler aussi que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale $-60 N.m$

III.10 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie où nous avons effectué une présentation de ses différentes configurations.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement générateur. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine : "machine généralisée".

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable.

Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé ($d - q$)lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

Les résultats de simulation montrent que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement générateur Ainsi que l'étude de fonctionnement de la MADA faite apparaît la stabilité pour le cas de fonctionnement générateur.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

CHAPITRE IV

COMMANDE VECTORIELLE DE LA ' GADA '

IV.1 Introduction :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de BLONDEL sur la théorie de la réaction des deux axes [41]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [40].

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère $(d - q)$ tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. [42].

Plusieurs méthodes de commande des "MADA" sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée [43].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur. Mise en équation de la "MADA" nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur « Proportionnel – Intégral » est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la "MADA" en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la machine. Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

IV.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes $(d - q)$ où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer.

Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique.

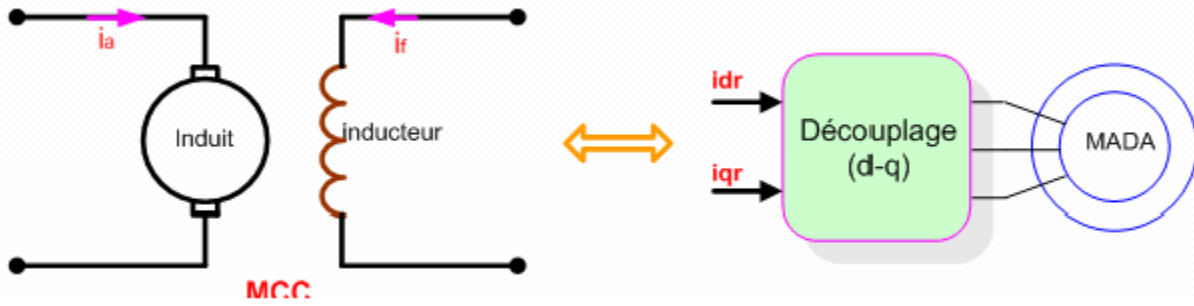


Figure (IV-1) : Principe de la commande vectorielle.

IV.3. Etablissement du modèle de la GADA

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère $(d - q)$ afin que l'axe 'd' soit aligné sur le flux statorique.

On rappelle d'abord le système équations différentielles de la génératrice décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.1)$$

IV.3.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En choisissant le référentiel diphasé $(d - q)$ lié au champ tournant et en plaçant le vecteur flux statorique φ_s sur l'axe d, on peut écrire d'après la figure (IV.2)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (IV.2)$$

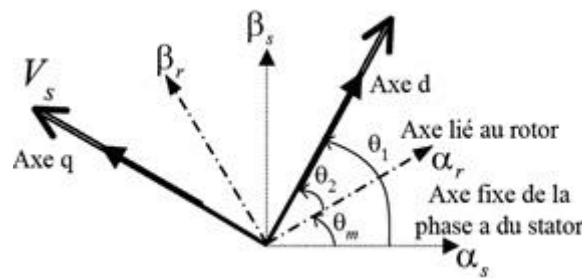


Figure (IV.2): Référentiel diphasé d q lié au champ tournant statorique.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.3)$$

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

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - \omega_r \varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.4)$$

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

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

IV.3.1.1. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

A partir de l'équation de flux (IV.4), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique :

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

IV.3.1.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (IV.6)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = -V_s I_{sq} \\ Q_s = -V_s I_{sd} \end{cases} \quad (IV.7)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.8)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \Rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (IV.9)$$

En considérant la mutuelle constante M, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe 'q' et la puissance réactive au courant rotorique d'axe 'd' à la constante.

$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$: Prés imposée par le réseau.

IV.3.1.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Partir du système d'équation (IV. 5), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

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

Chapitre IV : Commande vectorielle de la GADA

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) - w_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + w_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (IV.11)$$

Avec :

$$w_r = g \omega_s$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + g \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (IV.12)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (IV.13)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s] I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s] I_{rq} + g \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (IV.14)$$

V_{rd} Et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

- $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

Les équations (IV. 9), (IV. 11) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (IV-3).

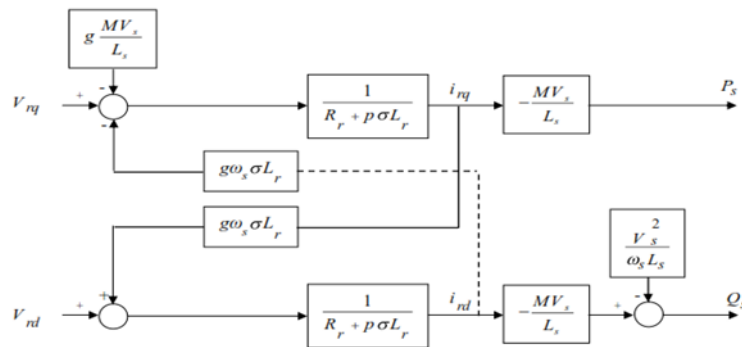


Figure (IV-3) : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimenté en tension.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur [44].

IV.3.2 Type de régulateurs utilisés

Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Dans notre cas, la variable Y à contrôler est remplacée par I_{rq}, I_{rd} et P_s, Q_s .

IV.4 Résultats de Simulation

A l'aide de logiciel MATLAB, Les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse (vérification de découplage) avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active, $P_s = -3000W$ entre $t = 1.5s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive $Q_s = 1000VAR$ entre $t = 1.5s$ et $t = 3s$.

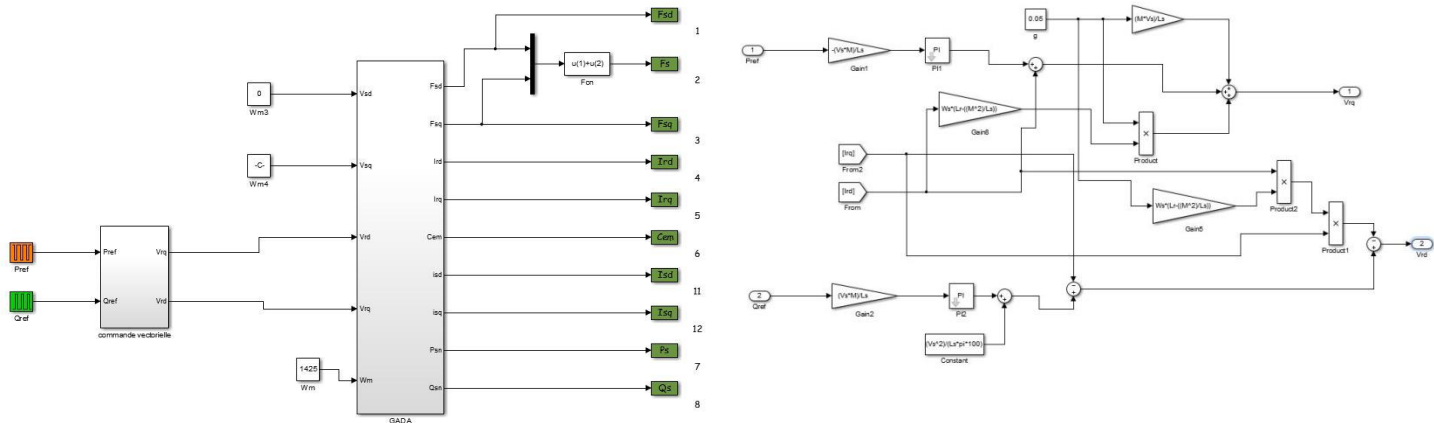


Figure (IV-4) : Schéma block de la commande vectorielle.

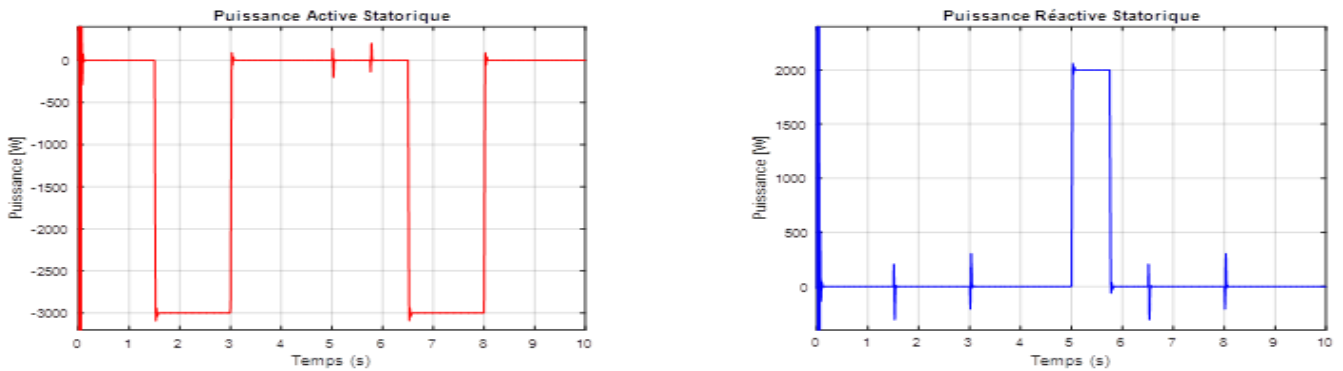


Figure (IV-5) : La puissance Active et Réactive Statorique.

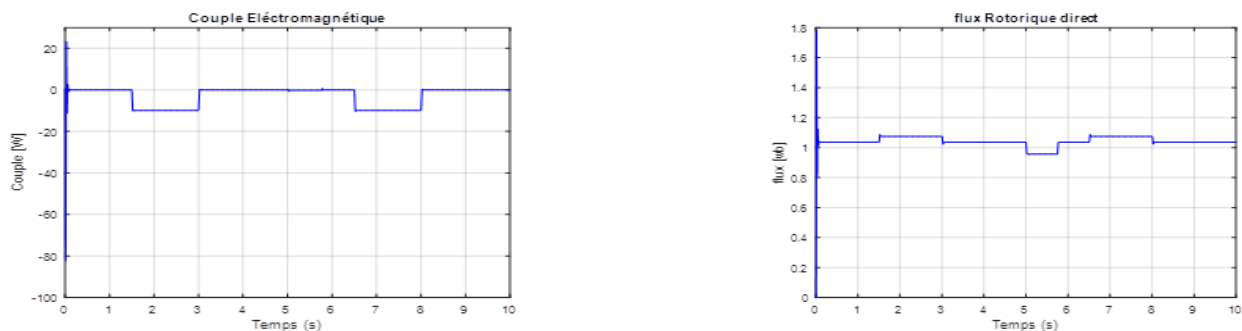


Figure (IV-6) : Le Couple Electromagnétique et le Flux Rotorique direct.

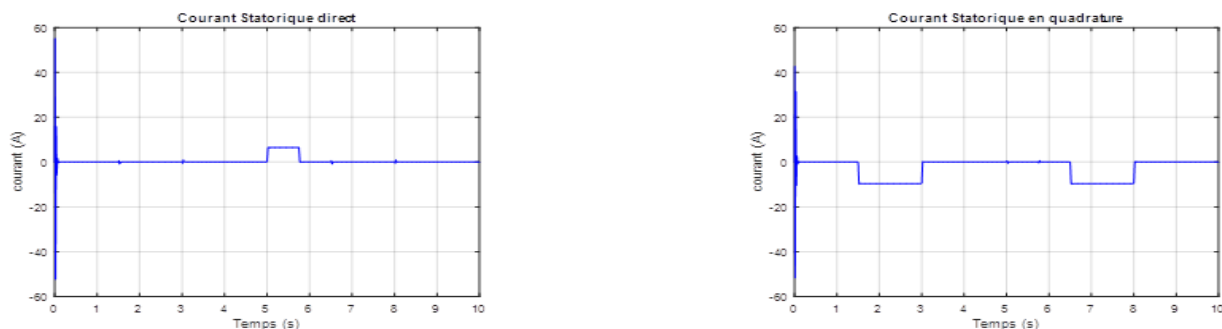


Figure (IV-7) : Les Courants Statorique (direct et quadrature).

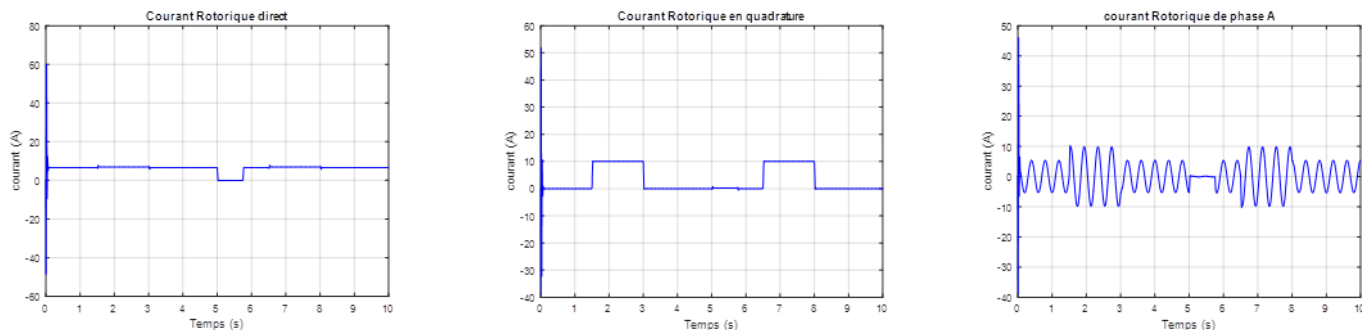


Figure (IV-8) :Les courants Rotoriques.

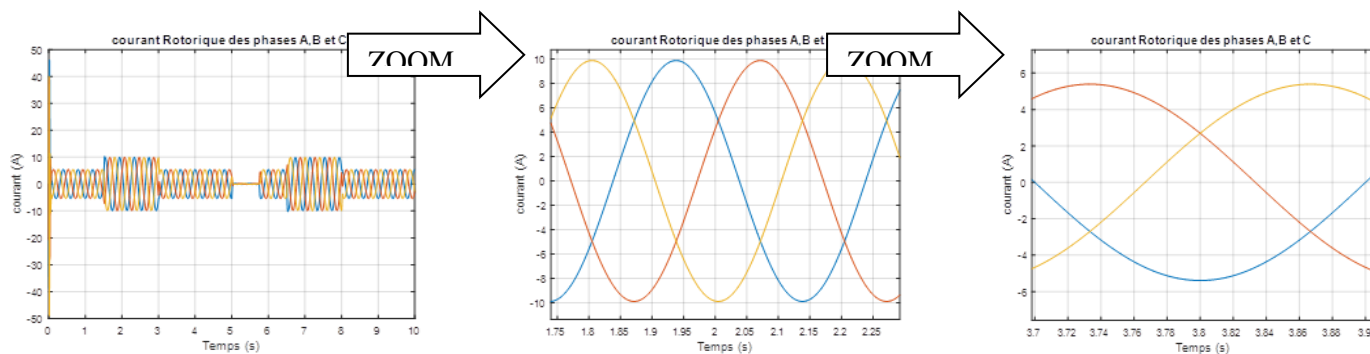


Figure (IV-9) :Courant Rotorique des phases A,B et C.

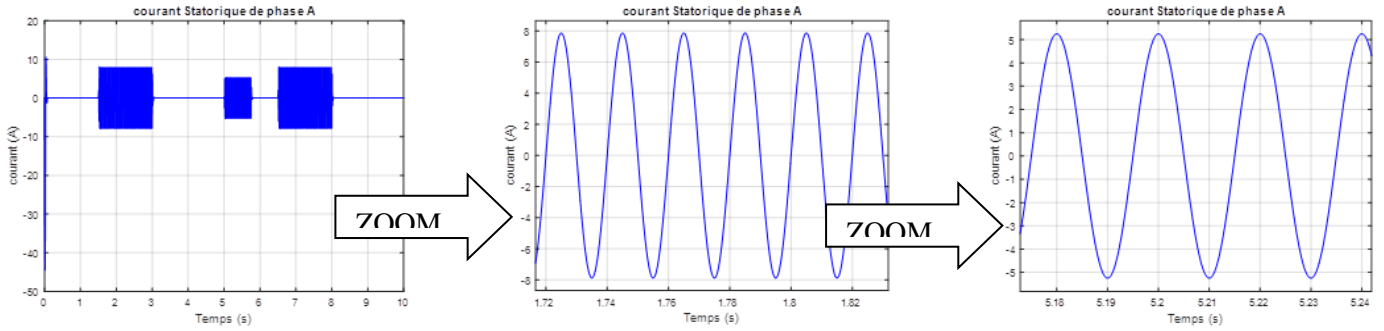


Figure (IV-10) : Les Courants Statorique de phase A.

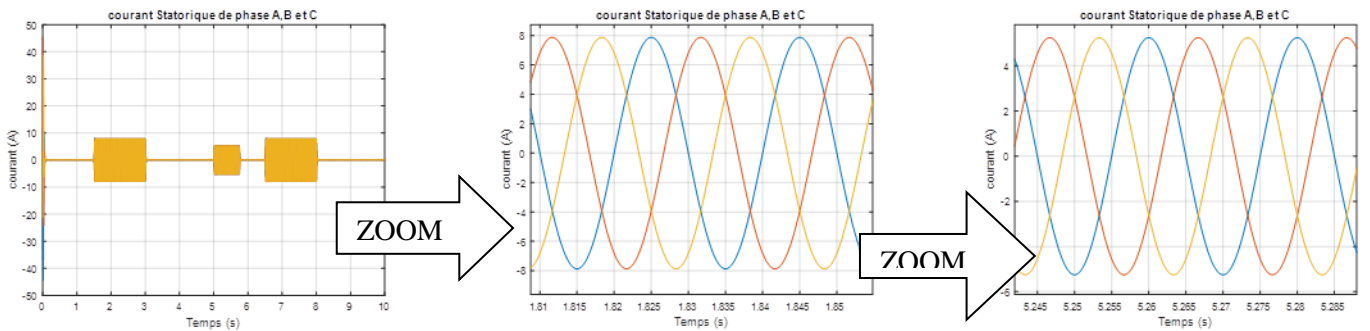


Figure (IV-11) : Les Courants rotoriques des phases A,B et C.

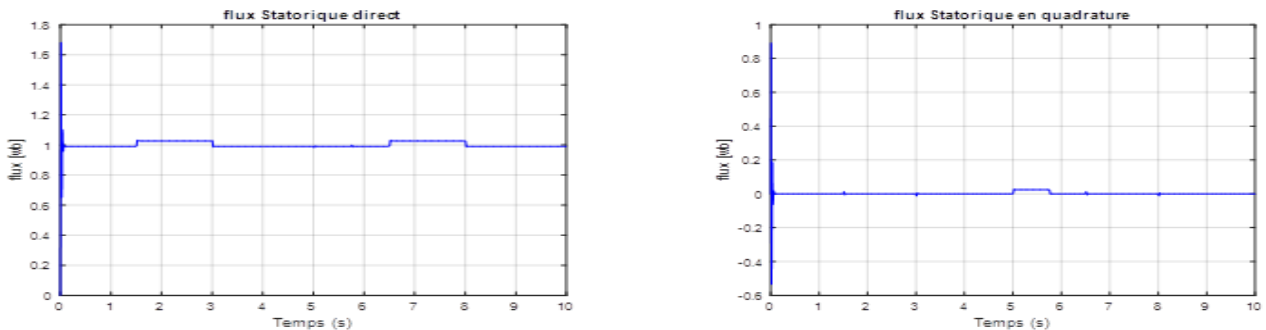


Figure (IV-12) : Le Flux Statorique(direct et quadrature).

IV.4.1 Interprétation des résultats

Les résultats montrent que toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante. D'après ces résultats on constate que :

Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté. Les courants du réseau suivent parfaitement leurs références et remarquer aussi que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance statorique active et ceci traduit par sa forme identique de celle de la puissance statorique active P_s , de l'instant 1.5(s) jusqu'à 3(s) et de 6.5(s) jusqu'à l'instant 8(s).

IV.5 Commande Vectorielle De La Gada Avec Un Onduleur A Deux Niveaux

L'alimentation de la MADA nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique pour l'entraîner à vitesse variable. Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée.

IV.5.1. Modélisation de l'onduleur à MLI :

L'onduleur de tension est un convertisseur qui permet d'obtenir une tension alternative de fréquence et valeur efficace fixe ou réglable à partir d'une source de tension continue et il est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances. Pour sa commande, on utilise la commande par modulation de Largeur d'impulsions (MLI). La structure à trois bras est présentée sur la figure (IV-10).

Pour assurer la continuité des courants alternatifs i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} les interrupteurs (T_1 et T_1'), (T_2 et T_2') et (T_3 et T_3') doivent être contrôlés de manière complémentaire. Les tensions de sortie de l'onduleur V_{Ao}, V_{Bo} et V_{Co} sont, par commodité, référencées par rapport à un point milieu d'un pont diviseur fictif d'entrée 'o'. Pour qu'elles soient identiques à 1/3 période près, il faut commander chaque interrupteur d'un demi-pont avec un retard de 1/3 période sur le précédent.

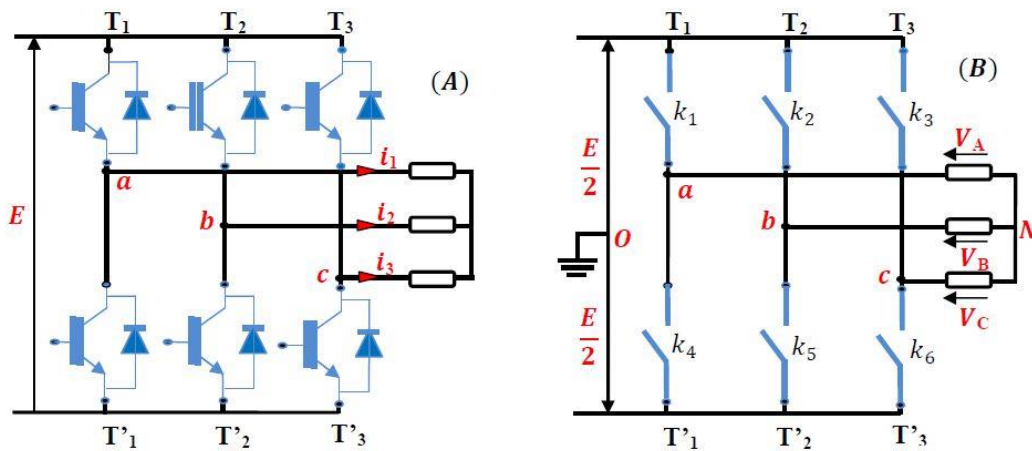


Figure (IV-13) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

L'onduleur est alimenté par une source de tension continue constante d'amplitude E , on déduit aisément les expressions des tensions composés :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ V_{BC} = V_{Bo} - V_{Co} \\ V_{CA} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (IV.15)$$

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

$$\begin{cases} V_{An} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{AB} - U_{CA}] \\ V_{Bn} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{BC} - U_{AB}] \\ V_{Cn} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{BC} - U_{AB}] \end{cases} \quad (IV.16)$$

Chapitre IV : Commande vectorielle de la GADA

La matrice de connexion [T] de l'onduleur s'écrit :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Les tensions imposées de chaque bras de l'onduleur sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

En remplaçant les trois tensions composés V_{AB} , V_{BC} et V_{CA} de l'équation (IV.15) dans l'équation (IV.16) on trouve :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3} \cdot V_{Ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{Bo} - \frac{1}{3} V_{Co} \\ V_{Bn} = -\frac{1}{3} \cdot V_{Ao} + \frac{2}{3} \cdot V_{Bo} - \frac{1}{3} V_{Co} \\ V_{Cn} = -\frac{1}{3} \cdot V_{Ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{Bo} + \frac{2}{3} V_{Co} \end{cases} \quad (IV.19)$$

Peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} \quad (IV.20)$$

IV.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI *triangulo-sinusoidale* présentée en [45]. Les commandes des interrupteurs du convertisseur sont définies à l'aide d'un algorithme comportant uniquement des expressions algébriques, directement adaptables à un système numérique de contrôle.

L'objectif principal de la commande consiste à comparer chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer (ondes modulantes ondulantes ($V_{ri}, i = 1,2,3$) par un signal triangulaire de haute fréquence (porteuse). Les intersections des ondes modulantes avec l'onde triangulaire, déterminent les impulsions de commande (S_1, S_2, S_3) de l'onduleur.

IV.6 Résultats de simulation avec onduleur

A l'aide de logiciel MATLAB, Les résultats de simulation présenter sur les figures ci-dessous, nous permet de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie *triangulo – sinusoidal*, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P_s = -3000W$ entre $t = 1.5s$ et $t = 3s$ et une puissance réactive $Q_s = 1000VAR$ entre $t = 1.5s$ et $t = 3s$.

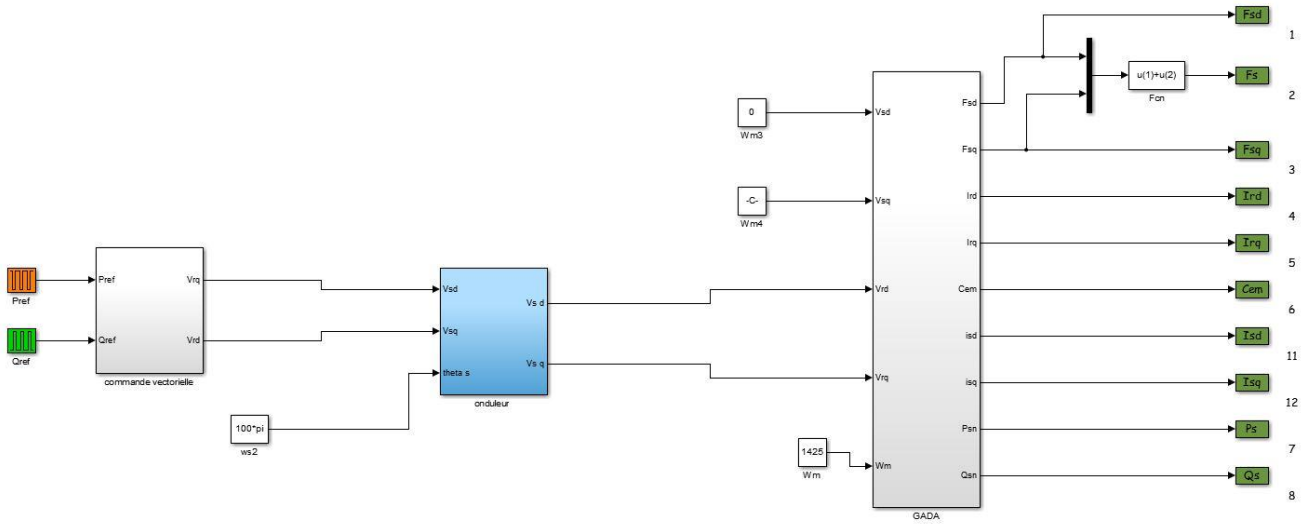


Figure (IV-14) : Schéma block de la commande vectorielle avec l'onduleur

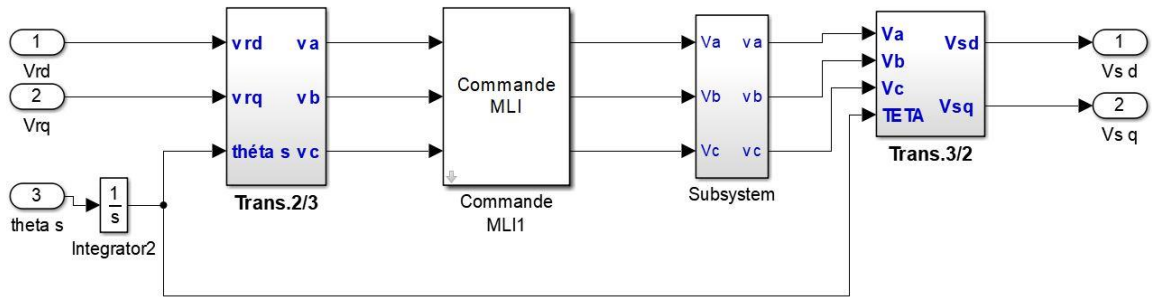


Figure (IV-15) : Schéma block de l'onduleur

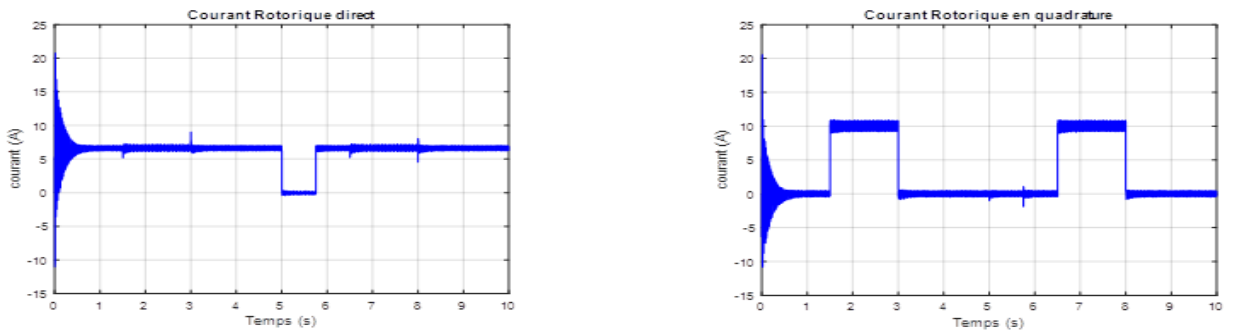


Figure (IV-16) : Les courants rotoriques (direct et quadrature).

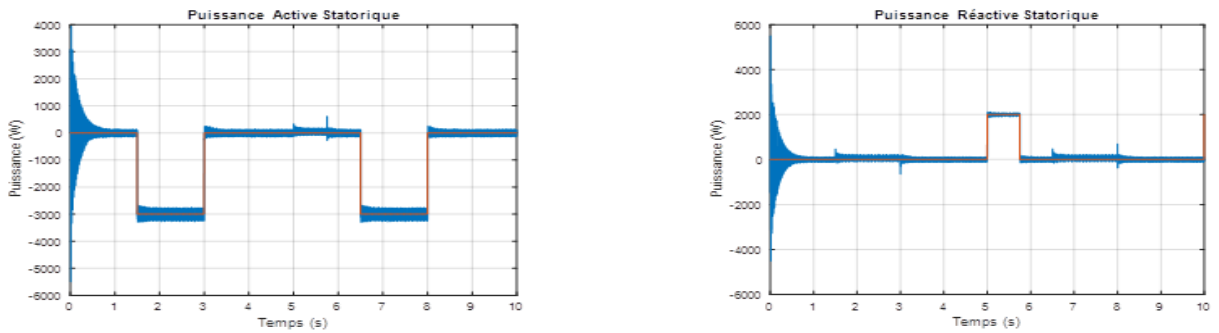


Figure (IV-17) : La puissance Active et Réactive Statorique.

IV.6.1 Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation montrent que les performances de la cascade utilisant un onduleur à deux niveaux connecte au rotor de la GADA, et toutes les grandeurs est similaires à ceux trouvés avec une alimentation continus parfaite.

Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté, ainsi que les courants du réseau suivent parfaitement leurs références.

II.7 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d . La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répondeue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

Dans ce chapitre, on à présenter les résultats de simulation dans le cas sans onduleur et dans le cas de l'association de l'onduleur avec la GADA.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne, la modélisation et la commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, ensuite utiliser ce modèle pour élaborer la stratégie de commande qui permet l'amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique.

Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, nous avons étudié chaque partie du système dans un chapitre séparé.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté l'état de l'art sur les conversions d'énergie éolien ainsi que son actualité et la théorie associée à ce domaine. Il nous a permis de voir le principe de la conversion aérodynamique de l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent en énergie mécanique) et la production d'énergie mécanique.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes intéressés à l'étude de la modélisation et stratégie de commande des turbines à vitesse variables, nous avons exposé la modélisation de la turbine et une modélisation du système d'orientation des pales pour limiter la puissance aérodynamique recueillie par la turbine pour des vitesses de vent élevées. Et pour la stratégie de la commande nous avons utilisé une technique de maximisation de la puissance extraite (MPPT), Les résultats de simulation ont montré l'efficacité du contrôle que ce soit pour la poursuite du point de fonctionnement optimale pour avoir une bonne commande de vitesse.

En suite dans le troisième chapitre, notre objectif s'est orienté verset la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation « GADA », ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK, Les résultats de simulation de ce modèle nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la génératrice.

Dernièrement le quatrième chapitre présente la commande vectorielle à orientation du flux statorique. Ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande on ajoute un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue supposée parfaite.

Annexe :

Annexe A

✚ Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Valeurs nominales :

Puissance nominale : $P_n = 4 \text{ kW}$
Tension nominale : $v/U = 220/380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$
La vitesse nominale : $\Omega n = 1440 \text{ tr/min.}$
Nombre de paires de pôles : $P = 2$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale: $N_p = 3$
Diamètre d'une pale : $R_T = 3 \text{ m}$
Inertie: $J = 315 \text{ Kg.m}^2$

Paramètre :

Résistance du stator : $R_s = 1.2 \Omega$
Résistance du rotor : $R_r = 1.8 \Omega$
Inductance stator : $L_s = 0.1554 \text{ H}$
Inductance du rotor : $L_r = 0.1568 \text{ H}$
Inductance mutuelle : $M = 0.15 \text{ H}$

Constantes mécaniques :

Moment Inertie : $J = 0.2 \text{ Kg.m}^2$
Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.S/rad}$

Annexe B

✚ Calcule les régulateurs K_i et K_p :

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$F_{BO}(p) = \left(\frac{K_p + \frac{K_i}{P}}{1 + \tau P} \right) = \left(\frac{K(K_p P + K_i)}{P(1 + \tau P)} \right) = KK_i \frac{1 + \left(\frac{K_p P}{K_i} \right)}{P(1 + \tau P)}$$

On prend $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

Alors $F_{BO}(p) = \frac{K_i K}{P}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit : $F_{BF}(p) = \left(\frac{1}{1 + \tau P} \right)$

Et on a $F_{BF}(p) = \left(\frac{K_i K}{K_i K + P} \right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{K_i K} P} \right) \Rightarrow \tau_r = \frac{1}{K_i K}$

Avec:

τ_r : Le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

Or $K_i = \frac{K_p}{\tau}$ Alors $\tau_r = \frac{\tau}{K_p K}$

$$\text{Donc} \begin{cases} K_p = \frac{\tau}{\tau_r K} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r K} \end{cases}$$

Le temps de réponse τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité.

Bibliographie

Liste des références :

- [1].**A. BOYETTE** «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [2] **S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA.** « Stability augmentation of a grid connected wind farm ». Springer 2009.
- [3].**T. BOUMEDIENE** «Commande par mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée utilisée en Aérogénérateur», Thèse de Magister en Génie Electrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [4].www.energies-renouvelables.org
- [5].**L. KHETTACHE** «Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée»; Thèse de Magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [6].**A. CONSTANTIN,** «Advanced Modeling and Control of Wind Power Systems», these de master, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 200
- [7].**F. POITIERS,** « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double
- [8].**V. ROGEZ.** « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004
- [9].**I. HAMZAOUI,** « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [10].**H. CAMBLONG** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat, ÉNSAM France, 2003.
- [11].**B. MULTON, Equipe SETE,** « Energies. Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan.11/2008.
- [12].**N. LAVERDURE,** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005
- [13].**L. LOUZE,**«Production décentralisée de l'énergie électrique :Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». », Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine. 08/07/2010.
- [14].**S. EL AIMANI.** « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [15].**Global Wind Energy Council,** « Global Wind 2008 Report. », disponible sur le site:
<http://www.gwec.net.01/2010>
- [16].**F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ.** « Wind turbine control systems, principles, Modelling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.

Bibliographie

- [17].**T. BELKACEM** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [18].**B. Cherif**«Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation» mémoire de magister Université Mohamed Khider – Biskra .
- [19].**D.LEGOURIERE**, « Energie éolienne », éditions EYROLLES, pp 28-31
- [20].**B. BOUKHEZZAR, H. SIGUERDIDJANE, M. M. HAND.** « Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization ». Journal of Solar Energy Engineering Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006.
- [21].**H. CAMBLONG.** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2003.
- [22].**V. CALDERARO, V. GALDI, A. PICCOLO, P. SIANO.**« A fuzzy controller for maximum energy extraction from variable speed wind power generation systems ». Electric Power Systems Research, Volume 78, Issue 6, pp 1109-1118, Elsevier 2008.
- [23].**I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ.**« Optimal control of wind energy systems ».Springer 2008
- [24].**G. SEGUIER, F. NOTELET**, « Electro-technique industrielle ». Edition Lavoisier, 2006.
- [25].**O. BOUHALI**, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [26] **M. G. MOLINA, P. E. MERCADO.** « A new control strategy of variable speed win turbine generator for three-phase grid-connected applications ». Power Systems Conference and Exposition, vol.2, pp 759 – 764, IEEE 2008.
- [27].**Y.ELBIA**, "Commande floue optimisée d'une Machine Asynchrone à Double alimentation et à Flux Orienté ", Thèse de Magister, Université de Batna, Juin 2009.
- [28].**P-E. VIDAL**, "Commande non-linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation " Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2004.
- [29].**S.DRID**, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation", thèse de Doctorat, Université de Batna, Novembre 2005.
- [30].**B. Hopfensperger, D. J. Atkinson**, « Doubly-fed a.c machines: classification and comparison »; European conf. Power Electronics and Applications (EPE), pp.1-17, Graz, 2001.
- [31].**A. Dendouga**, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) »; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.
- [32].**H. POLINDER, F. F.A. VAN DER PIJL, G.J de Vilder, P. Tavner.** « Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines ». , 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp 543-550, IEEE 2005.

Bibliographie

- [33].**A.A. EL-SATTAR, N.H. SAAD, M.Z. SHAMS EL-DEIN.**« Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault ». *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 7, pp 1240-1246, Elsevier 2008.
- [34].**I. BOLDEA.** « Variable speed generators ». Taylor & Francis 2006.
- [35].**I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ.** « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008.
- [36].**F. MERRAHL.** « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) ». Mémoire de Magister ENP 2007.
- [37].**M. GARCÍA, M. PAZ COMECH.** « Voltage dip generator for wind energy systems up to 5 MW ». *Applied Energy*, Volume 86, Issue 4, pp 565-574, Elsevier 2009.
- [38].**F. IOV, A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. BLAABJERG.** « Wind turbine block set in matlab/Simulink, general overview and description of the models ». Institute of Energy Technology, Aalborg University. Danemark, March 2004.
- [39].**F. KHATOUNIAN', E. MONMASSON, F. BERTHEREAU, E. DELALEAU, J.P. LOUIS,** « Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application ». Université de Cergy, France.
- [40].**N.AKKARI,** «Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse De Doctorat De L'université El Hadj Lakhdar De Batna, 2010.
- [41].**B. HAMANE,** «Contrôle robuste d'aérogénérateur», mémoire de magister, université d'oran, 2012.
- [42].**G. SALLOUM,** «Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation», Thèse De Doctorat, Institut Polytechnique De Toulouse, 2007.
- [43].**A. MEROUFEL, Y. DJERIRI, A. MASSOUM ET A. HAMMOUMI,** «Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien», *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682
- [44]. **F. AKEL,** «Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne», Mémoire De Magister En, Ecole Militaire Polytechnique, 2009
- [45].**B. ZINE LAABIDINE** « Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation par régulateur pi-flou », Mémoire de magister, Ecole normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, GADA et onduleur), puis nous avons utilisé la commande vectorielle pour commander cette génératrice.

L'objectif principal de cette commande est de contrôler les puissances générées par la génératrice d'une façon Indépendante, on les découple par orientation du flux statorique.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, turbine, modélisation, onduleur, commande vectorielle.

Abstract

This work presents the modeling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production. With this intention, a model of the different components of the wind generator (Turbine, DFIM and inverter) was established.

The main objective of this method is to control the powers generated by the generator in an Independent way, they are decoupled by orientation of the stator flux.

Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, vector control.

ملخص

يعرض هذا العمل نمذجة ومراقبة المولد اللاتزامني المزدوج التغذية (DFIM) في إنتاج طاقة الرياح. ولهذا تم إنشاء نموذج لمختلف عناصر هذا النظام (التوربينات، المولد اللاتزامني المزدوج التغذية والعاكس).

والهدف الرئيسي من هذه المراقبة هو السيطرة على الطاقة المولدة من طرف المولد بطريقة مستقلة، التي تستخرج عن طريق توجيه التدفق.

كلمات مفتاحية: المولد اللاتزامني المزدوج التغذية، التحكم الشعاعي تصميم النموذج