

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

Commande sans capteur de la
machine asynchrone à double alimentation pour
l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne

Dirigé par:
Serhoud Hicham

Réalisé par:
MOUSSAOUI Taha Yacine
HADA Mounir

Soutenu 09 sept 2015

Résumé

Le présent travail est consacré à une commande vectorielle de l'énergie active et réactive son capteur de vitesse d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système éolien. Le transfert de puissance entre le stator et le réseau est réalisé par action sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les performances et la robustesse sont analysées et comparées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés:

Machine Asynchrone à Double Alimentation - Commande vectorielle son capteur.
Commande MPPT.

Abstract

This work is devoted to active and reactive energy sensorless vector control of a doubly fed induction machine (DFIM) integrated in wind power system. The power transfer between the stator and the network is achieved by acting on the rotor signals via a bidirectional converter. the performance and robustness are analyzed and compared by simulation based on software Matlab / Simulink.

Keywords

Doubly fed induction generator, sensorless vector control, Maximal power point tracking.

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: HICHAM Serhoud, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelle,

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

TABLE DES MATIERES

| | |
|------------------------------------|----------|
| Résumé | |
| Remerciements | |
| Sommaire | |
| Notations Symboliques | |
| Listes des figures | |
| Introduction générale | 1 |

CHAPITRE.I

Généralité sur l'énergies éolienne

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne..... | 4 |
| I.2.1. Définition de l'énergie éolienne | 4 |
| I.2.2. Principaux composants d'une éolienne | 5 |
| I.3. Les différents types d'éoliennes | 7 |
| I.3.1. Eoliennes à axe vertical | 7 |
| I.3.2. Eoliennes à axe horizontal | 9 |
| I.4. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique..... | 9 |
| I.4.1. Loi de BETZ | 9 |
| I.4.2. Production d'énergie mécanique | 12 |
| I.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne | 13 |
| I.5.1. Bilan des forces sur une pale | 13 |
| I.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne..... | 14 |
| I.5.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"..... | 14 |
| I.5.2.2. Système d'orientation des pales "pitch" | 15 |
| I.6. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique | 15 |
| I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe | 15 |
| I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable | 16 |

| | |
|---|----|
| I.7. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens..... | 17 |
| I.7.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif | 17 |
| I.7.2. Systèmes couplés au réseau alternatif..... | 17 |
| I.7.2.1. Machine synchrone | 17 |
| I.7.2.1. Machine asynchrone à cage | 18 |
| I.7.2.3. Machine asynchrone à double alimentation | 19 |
| I.8. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne | 23 |
| I.8.1. Avantages | 23 |
| I.8.2. Inconvénients..... | 24 |
| I.9. Conclusion..... | 24 |

CHAPITRE.II

Modélisation et commande vectorielle de la MADA

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction | 25 |
| II.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation | 26 |
| II.3. Structure de la machine..... | 26 |
| II.4. Modes de fonctionnement de la MADA..... | 26 |
| II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone..... | 27 |
| II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone | 27 |
| II.4.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone | 27 |
| II.4.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone | 28 |
| II.5. principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation..... | 28 |
| II.6. Domaines d'application de la MADA..... | 29 |
| II.7. Avantages et inconvénients de la MADA | 29 |
| II.7.1. Avantages de la MADA..... | 29 |
| II.7.2. Inconvénients de la MADA | 30 |
| II.8. Modélisation de la MADA..... | 30 |
| II.8.1.Hypothèses simplificatrices | 31 |
| II.8.2.Modèle mathématique de la MADA..... | 32 |
| II.8.2.1.Equations électriques..... | 32 |
| II.8.2.2. Equations magnétiques..... | 32 |
| II.8.2.3.Equations mécaniques..... | 33 |

| | |
|--|----|
| II.8.3. Modèle diphasé de la MADA..... | 33 |
| II.8.3.1. La transformation de Park..... | 33 |
| II.8.3.2. Equations des tensions..... | 35 |
| II.8.3.3. Equations des flux..... | 35 |
| II.8.3.4. Equation du couple électromagnétique..... | 36 |
| II.9. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation..... | 36 |
| II.9.1. Principe général | 36 |
| II.9.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique | 37 |
| III.9.2.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé | 37 |
| II.9.2.2. Relation entre les courants statoriques et les courants rotorique..... | 39 |
| II.9.2.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques | 39 |
| II.9.2.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques | 40 |
| II.9.3. Types de commande vectorielle : | 42 |
| II.9.3.1. Commande vectorielle directe..... | 42 |
| II.9.3.2. Commande vectorielle indirecte..... | 43 |
| II.9.3.2.1. Commande indirecte en boucle ouvert..... | 43 |
| II.9.3.2.2. Commande indirecte en boucle fermé | 44 |
| II.9.4. Type du régulateur PI..... | 44 |
| II.9.5. Onduleur de tension à deux niveaux..... | 45 |
| II.9.5.1. Modèle Onduleur de tension à deux niveaux..... | 46 |
| II.9.5.2. Stratégie de commande..... | 47 |
| II.9.5.3. Algorithme de commande | 47 |
| II.10. Simulation de la commande de la MADA..... | 49 |
| II.10.1. Résultats de simulations..... | 49 |
| II.10.2. Interprétations des résultats..... | 50 |
| II.11. Conclusion..... | 50 |

CHAPITRE.III

Commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction..... | 51 |
| III.2. Modèle de la chaîne de conversion | 52 |
| III.2.1. Architecture du dispositif de commande | 52 |

| | |
|---|----|
| III.2.2. Redresseur de tension | 53 |
| III.2.2.1. Modélisation du redresseur | 53 |
| III.2.2.2. Commande du redresseur | 55 |
| III.3. Filtre (côté té réseau) | 55 |
| III.3.1. Modélisation du filtre passif | 55 |
| III.4. Régulation de la tension du bus continu | 55 |
| III.5. Modélisation de la turbine | 59 |
| III.5.1. La modélisation | 59 |
| III.5.1.1. La surface balayée par le rotor | 59 |
| III.5.1.2. La densité de l'air | 59 |
| III.5.1.3. La Vitesse du vent | 59 |
| III.5.1.4 Puissance récupérable par une turbine..... | 60 |
| III.5.1.5. Le coefficient de puissance..... | 61 |
| III.5.1.6. Modèle du Multiplicateur..... | 62 |
| III.5.1.7. Equation dynamique de l'arbre..... | 63 |
| III.5.2. Schéma bloc du modèle de la turbine..... | 63 |
| III.6. Stratégie de commande de la turbine..... | 64 |
| III.7. Algorithme de maximisation de la puissance extraite..... | 65 |
| III.8. Système de la chaîne globale..... | 67 |
| III.9. Résultats de simulation..... | 68 |
| III.10. Interprétations des Résultats..... | 71 |
| III.11. Conclusion | 71 |

CHAPITRE.IV

Commande sans capteur de la GADA intégrée dans un système éolien

| | |
|---|----|
| IV. 1.Introduction..... | 72 |
| IV.2. Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique | 73 |
| IV.2.1. Estimation de la vitesse avec modèle de la machine | 73 |
| IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine | 74 |

| | |
|---|----|
| IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA avec modèle de la machine..... | 75 |
| IV.3.1. La méthode du MRAS..... | 75 |
| IV.4. Application du MRAS à l'estimation des grandeurs mécaniques de la MADA..... | 76 |
| IV 5. Schéma globale de la commande vectorielle de la MADA sans capteurs..... | 78 |
| IV.6. Résultats de simulation | 79 |
| IV.7. Interprétation des résultats | 80 |
| IV.10. Conclusion | 81 |
| Conclusion générale | 82 |
| Annexe | 83 |
| Références bibliographiques | 86 |

NOTATIONS SYMBOLIQUES

| Symbole | Signification | Unité |
|------------|--|-------------|
| C_p | Coefficient de puissance | |
| C_e | Couple électromagnétique | $N.m$ |
| C_r | Couple résistant | $N.m$ |
| $C_{aéro}$ | Couple aérodynamique de la turbine | $N.m$ |
| J | Moment d'inertie des parties tournantes | $K.g.m^2$ |
| f | Coefficient de frottement visqueux de la MADA | $N.m.s/rad$ |
| G | Rapport de vitesse du multiplicateur | |
| g | Glissement | |
| K_p, K_i | Gains du régulateur PI classique | |
| M_{sr} | Inductances mutuelles entre le stator et le rotor | H |
| M_s | Inductances mutuelles entre les phases statoriques | H |
| M_r | Inductances mutuelles entre les phases rotoriques | H |
| P_{mec} | Puissance mécanique sur l'arbre de la machine | W |
| P_r | Puissance active rotorique | W |
| P_s | Puissance active statorique | W |
| P_v | Puissance portée par le vent | W |
| $P_{rés}$ | Puissance de réseau | W |
| Q_s | Puissance réactive statorique | VAR |
| R | Rayon de la turbine | m |
| R_s | Résistances statorique | Ω |
| R_r | Résistances rotorique | Ω |
| L_s | Inductances propres statorique | H |
| L_r | Inductances propres rotorique | H |
| S | Surface balayée par le rotor de la turbine | m |
| $C_{aér}$ | Couple aérodynamique de la turbine | W |
| i_{abcr} | Courants instantanés des phases rotoriques | A |
| v_{abcr} | Tensions instantané des phases rotoriques | V |
| i_{abcs} | Courants instantanés des phases statoriques | A |

| | | |
|--------------------|---|--------|
| v_{abcs} | Tensions instantané des phases statoriques | V |
| i_{dqr} | Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q) | A |
| v_{dqr} | Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q) | V |
| i_{dqs} | Composantes du courant statorique dans le repère (d, q) | A |
| v_{dqs} | Composantes de tension statorique dans le repère (d, q) | V |
| p | Nombre de paires de pôles | |
| s | Opérateur de Laplace | |
| v_{abcr} | Tensions instantanées des phases rotoriques | V |
| v_{abcs} | Tensions instantanées des phases statoriques | V |
| v_{dqr} | Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q) | V |
| v_{dqs} | Composantes de tension statorique dans le repère (d, q) | V |
| β | Angle de calage des pales | ° |
| Ω | vitesse de rotation mécanique du rotor | rd/sec |
| Ω_{mec} | Vitesse de rotation mécanique | rd/sec |
| Ω_{ref} | vitesse mécanique de la génératrice de référence | rd/sec |
| θ | Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique . | rd |
| θ_s | Position de stator | rd |
| θ_r | Position électrique de rotor | rd |
| λ | Vitesse spécifique | |
| λ_{cpmax} | Vitesse spécifique optimale de l'éolienne | |
| ω | Vitesse angulaire de rotation du rotor | rd/sec |
| ω_{coor} | Vitesse angulaire du repère biphasé | rd/sec |
| ω_s | Pulsation des courants statoriques | rd/sec |
| Φ_{abcr} | Flux instantanés des phases rotoriques | Wb |
| Φ_{abcs} | Flux instantanés des phases statoriques | Wb |
| Φ_{dqr} | Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q) | Wb |
| Φ_{dqs} | Composantes du flux statorique dans le repère (d, q) | Wb |
| PI | Proportionnelle intégrale | |
| $[P(\theta)]^{-1}$ | Transformation de Park inverse | |
| $[P(\theta)]$ | Transformation de Park directe | |
| MADA | Machine Asynchrone à Double Alimentation | |
| GADA | Générateur Asynchrone à Double Alimentation | |

| | |
|--------------------|--|
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsions |
| MPPT | Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale |
| $\Omega_{cut-out}$ | Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est arrêtée Puissance mécanique fournie par l'arbre |
| Ω_{cut-in} | Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est démarrée |
| $S_{a,b,c}$ | États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension |
| K_i | Paramètre intégrateur |
| K_p | Paramètre proportionnel |
| i_{ch} | courant de la charge non-linéaire |
| i_{dc} | Courant actif nécessaire pour charger le bus continu |
| C_{vis} | couple des frottements visqueux |
| \bar{e} | Vecteur de la tension de ligne |
| \tilde{e} | Tension instantanée de phase du réseau estimée |
| VOC | Contrôle à tension orientée |
| h_d et h_q | la largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive. |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Fig. I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent..... | 4 |
| Fig. I-2 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne..... | 6 |
| Fig. I-3 : Éolienne de Savonius..... | 7 |
| Fig. I-4 : Éolienne de Darrieus..... | 8 |
| Fig. I-5 : Éoliennes à axes horizontales..... | 9 |
| Fig. I-6 : Tube de courant autour d'une éolienne..... | 10 |
| Fig. I-7: Coefficient de puissance..... | 11 |
| Fig. I-8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes..... | 11 |
| Fig. I-9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné..... | 12 |
| Fig. I-10 : Bilan des forces sur une pale..... | 13 |
| Fig. I-11 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "..... | 14 |
| Fig. I-12 : Variation de l'angle de calage d'une pale..... | 15 |
| Fig. I-13 : Aérogénérateur à vitesse fixe..... | 15 |
| Fig. I-14 : Aérogénérateur à vitesse variable..... | 16 |
| Fig. I-15 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage..... | 17 |
| Fig. I-16 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.. | 18 |
| Fig. I-17 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable..... | 19 |
| Fig. I-18 : Contrôle de glissement par l'énergie dissipée..... | 20 |
| Fig. I-19 : Structure de Kramer pour la MADA..... | 20 |
| Fig. I-20 : Structure avec deux ponts à diodes et à transistors..... | 21 |
| Fig. I-21 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur..... | 21 |
| Fig. I-22 : Structure avec convertisseurs à MLI..... | 22 |
| Fig. II-1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée..... | 26 |
| Fig. II-2 : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone..... | 27 |
| Fig. II-3 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone..... | 27 |
| Fig. II-4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Fig. II-5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone..... | 28 |
| Fig. II-6 : Représentation simplifié de la MADA..... | 31 |
| Fig. II-7 : Modèle de PARK de la MADA..... | 33 |
| Fig. II-8 : Représentation de la machine dans le repère diphasé..... | 34 |
| Fig. II-9 : Principe général de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique | 37 |
| Fig. II-10 : Orientation du flux statorique..... | 38 |
| Fig. II-11 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances..... | 42 |
| Fig. II-12 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances..... | 43 |
| Fig. II-13 : Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte..... | 44 |
| Fig. II-14 : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée..... | 44 |
| Fig. II-15 : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI..... | 45 |
| Fig. II-16 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux..... | 46 |
| Fig. II-17 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse. | 48 |
| Fig. II-18 : Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA..... | 50 |
| Fig. III-1 : Modèle de la chaîne de conversion éolienne..... | 52 |
| Fig. III-2 : Structure classique d'une PLL triphasée..... | 54 |
| Fig. III-3 : structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée..... | 54 |
| Fig. III-4 : Schéma synoptique de la commande du bus continu..... | 56 |
| Fig. III-5 : Contrôle de Bus continu..... | 58 |
| Fig. III-6 : Schéma d'une turbine éolienne..... | 60 |
| Fig. III-7 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)..... | 62 |
| Fig. III-8 : Schéma bloc du modèle de la turbine..... | 63 |
| Fig. III-9 : Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne..... | 64 |
| Fig. III-10: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse | 66 |
| Fig. III-11 : structure de la chaîne globale..... | 67 |
| Fig. III-12 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA..... | 70 |
| Fig. IV-1 : Schéma de principe de l'estimateur de MRAS..... | 74 |
| Fig. IV-2 : Schéma de Principe d'un observateur MRAS..... | 76 |

| | |
|---|----|
| Fig. IV-3 : structure de la chaîne globale..... | 77 |
| Fig. IV-4 : La vitesse rotorique estimé par MRAS avec Zoom..... | 79 |
| Fig. IV-5 : erreur de vitesse estimée..... | 79 |
| Fig. IV-6 : Puissance active statorique et sa référence | 79 |
| Fig. IV-7 : Puissance réactive statorique et sa référence | 79 |
| Fig. IV-8 : Courant d'une phase statorique..... | 79 |
| Fig. IV-9 : Courant d'une phase rotorique..... | 79 |
| Fig. IV-10 : Coefficient de puissance de la turbine..... | 80 |
| Fig. IV-11 : Vitesse relative de l'éolienne..... | 80 |
| Fig. IV-12 : Caractéristique de l'éolienne dans Le plan de puissance, vitesse rotation..... | 80 |
| Fig. IV-13 : Flux statorique de la MADA..... | 80 |

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. 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. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché ont une hélice de plus 120 m de diamètre et une tour qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ, ce qui l'équivalent d'un immeuble d'environ 50 étages ! Cette contrainte mécanique a poussé les chercheurs à mener une nouvelle voie de recherche qui s'intéresse au maximisation de la puissance et l'amélioration du rendement et des performances des systèmes éoliennes et à leur intégration dans les réseaux électriques.

Donc Ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes, les éléments constitutants ainsi la modélisation de l'éolienne.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse fixe. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle qui permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive .

Dans le troisième chapitre, on va présenter la modélisation de l'alimentation du rotor, basée sur deux convertisseurs électroniques commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). L'un de ces deux convertisseurs (celui du coté réseau) est commandé pour assurer la stabilisation de la tension du bus continu alimentant le deuxième convertisseur et des courants sinusoïdaux purement actifs à l'entrée. Ce dernier est placé du coté du rotor, il est commandé pour garantir un réglage du couple électromagnétique de la machine à sa consigne optimale qui correspond à la production maximale de l'énergie et permettre l'orientation du flux statorique de la machine tout en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au stator.

Les différentes méthodes de commandes sans capteur mécanique de vitesse, MRAS (Model Reference Adaptive System) et l'approche MRAS pour estimer la vitesse de rotation par l'introduction d'un régulateur PI de vitesse sont abordées dans le quatrième chapitre. Des tests de simulation sont effectués pour analyser les performances et la robustesse des différentes stratégies de commande proposées dans ce manuscrit.

Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne qui est actuellement largement utilisée.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique [1].

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice qui peut fonctionner à vitesse variable. Elle permet, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent aujourd'hui, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes qui suivent.

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I-1).

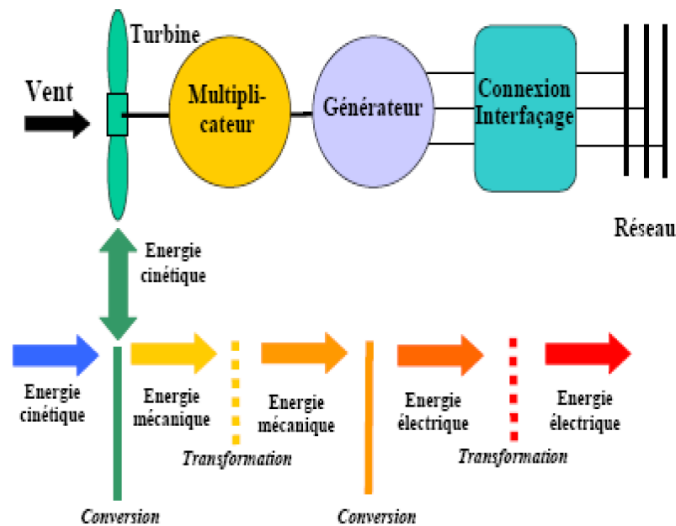


Fig. I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes

sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [2].

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [3].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. 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.

I.2.2. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- ✓ **Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement

supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

- ✓ **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I-2) : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

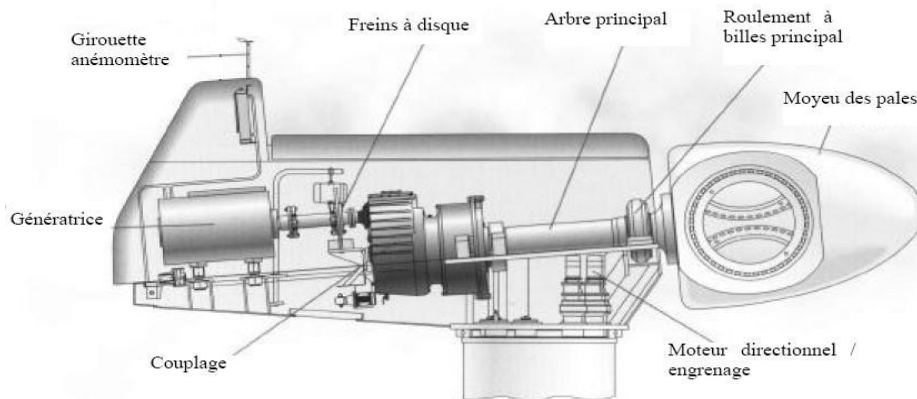


Fig. I-2 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

- ✓ **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [3].

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la

charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

I.3. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [9] :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I-3).

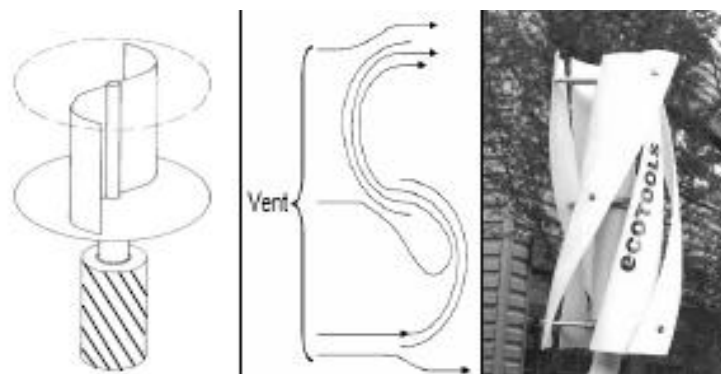


Fig. I-3 : Éolienne de Savonius.

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I-4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

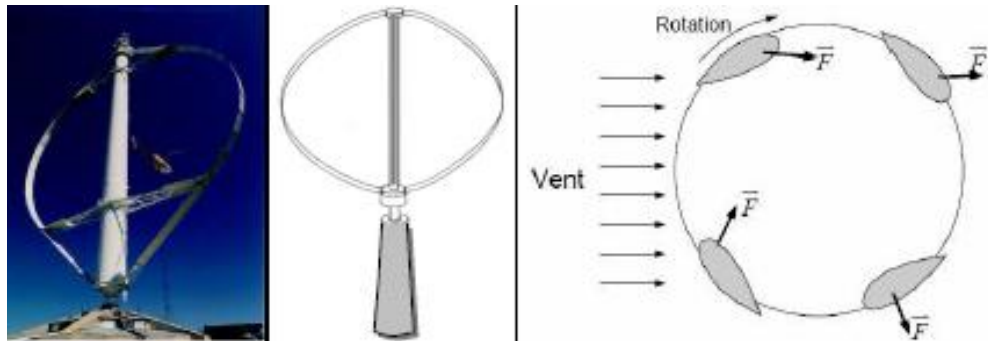


Fig. I-4 : Éolienne de Darrieus.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100 W à 25 kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes. Par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne. Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [3]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [3]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Fig. I-5 : Éoliennes à axes horizontales.

I.4. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.4.1. Loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I-6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I. 1})$$

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

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.1) :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

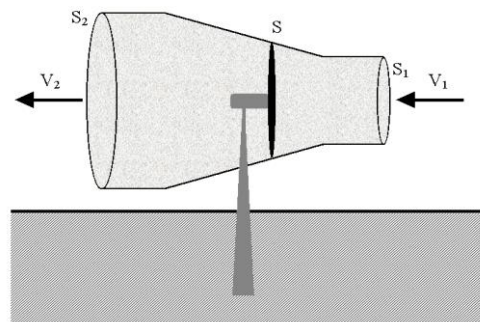


Fig. I-6 : Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{4} \quad (\text{I.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.7), on s'aperçoit que le ratio 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 [3].

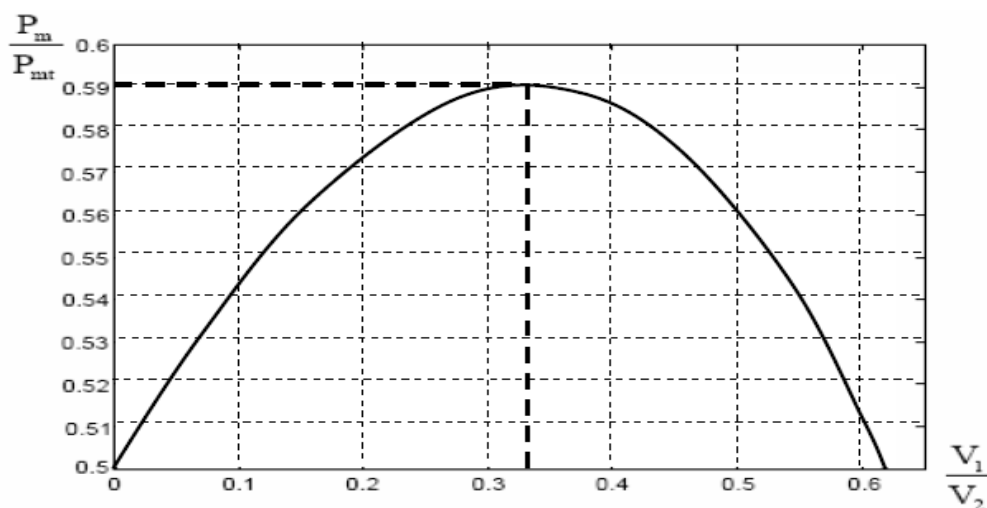


Fig. I-7 : Coefficient de puissance.

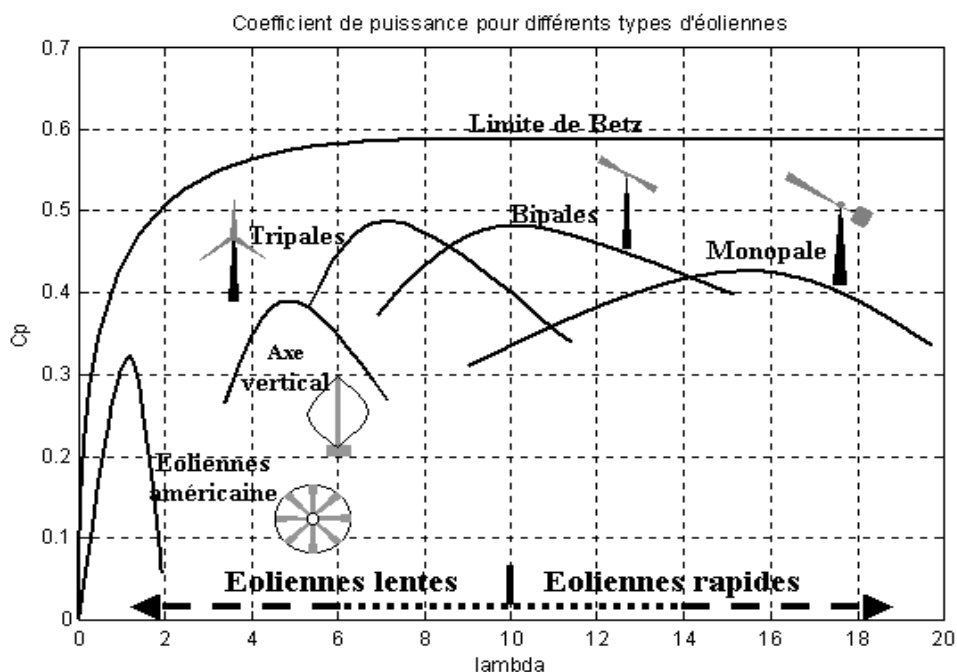


Fig. I-8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure I-8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

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 I-8) 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 [7].

I.4.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I.7)$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_1 R}{KV_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.8)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation avant 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 (Figure I-9) [7].

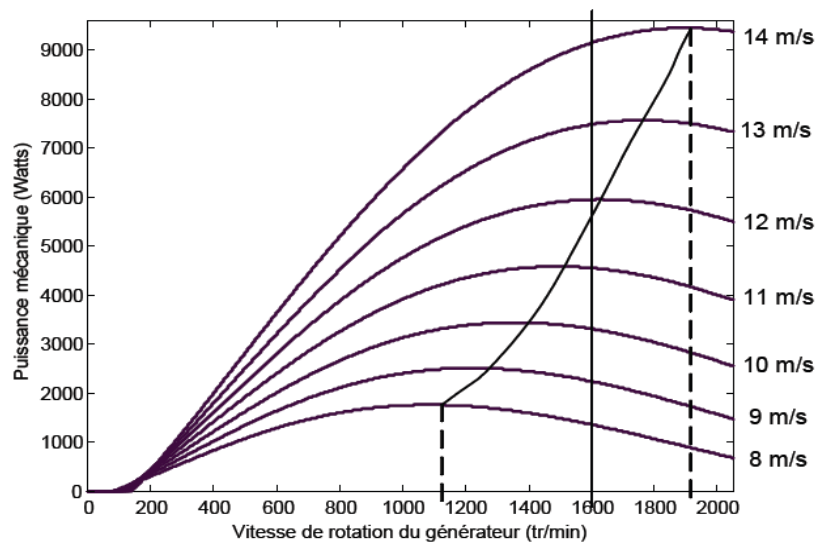


Fig. I-9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

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-9) 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.

I.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

I.5.1. Bilan des forces sur une pale

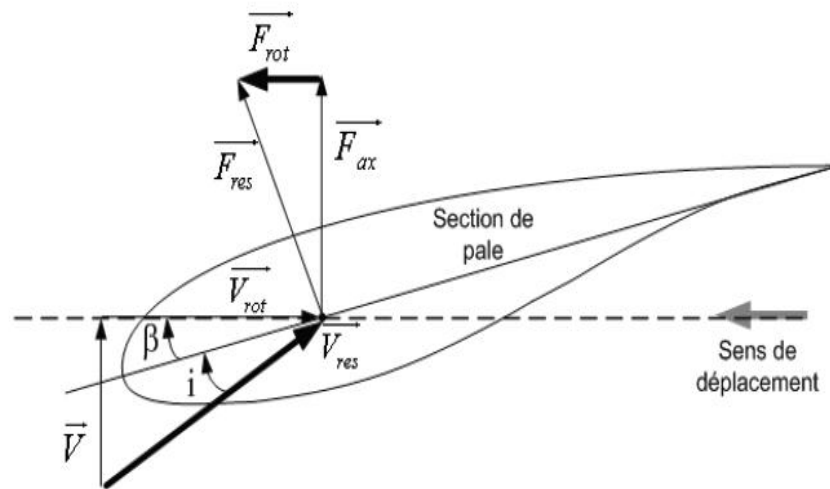


Fig. I-10 : Bilan des forces sur une pale

La Figure (I-10) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [8]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

I.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

I.5.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"

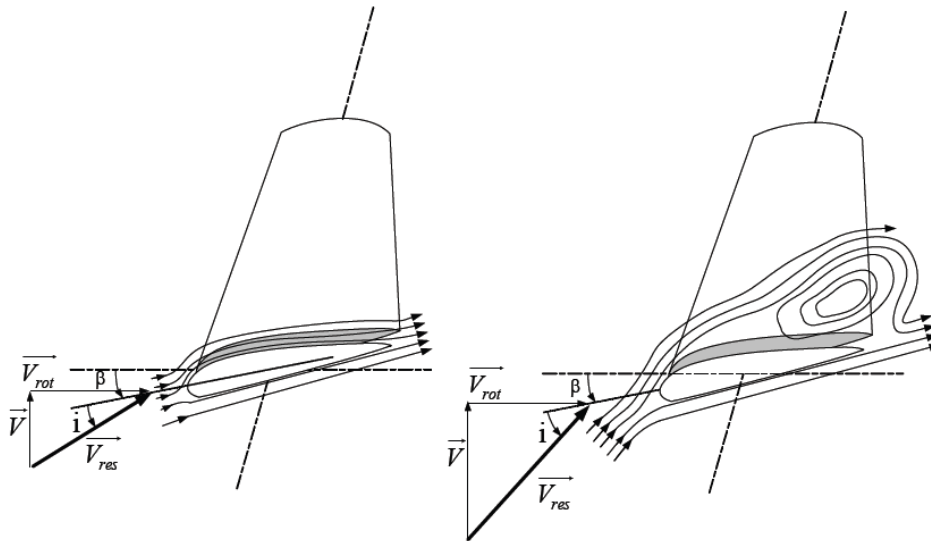


Fig. I-11 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I-11) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [7].

I.5.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"

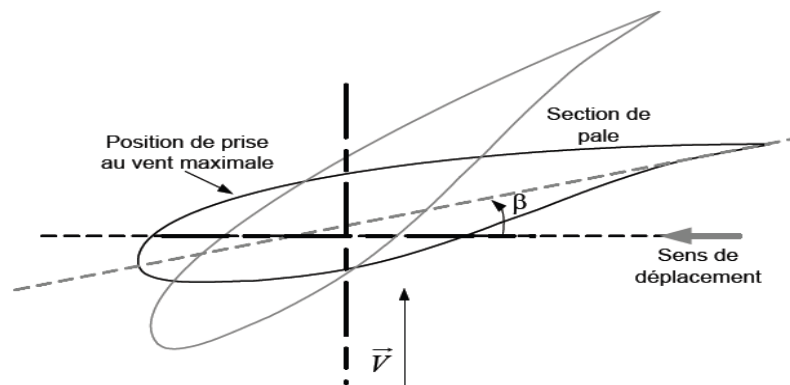


Fig. I-12 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Ce système de régulation utilise l'angle des pales face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale

I.6. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I-13), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice.

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

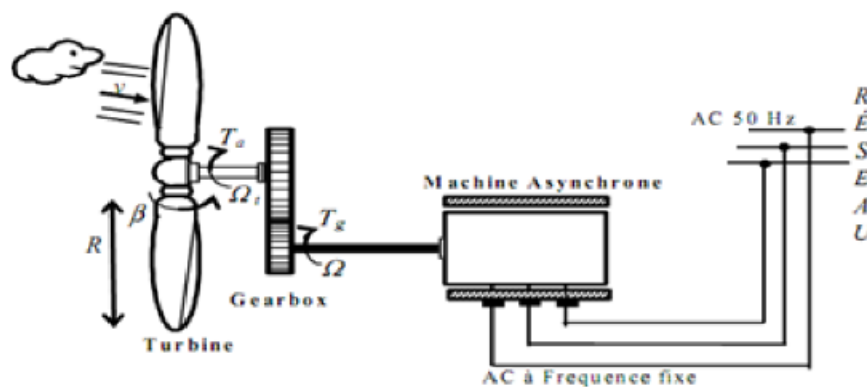


Fig. I-13 : Aérogénérateur à vitesse fixe

✓ Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

✓ Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques).
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I-14) [4].

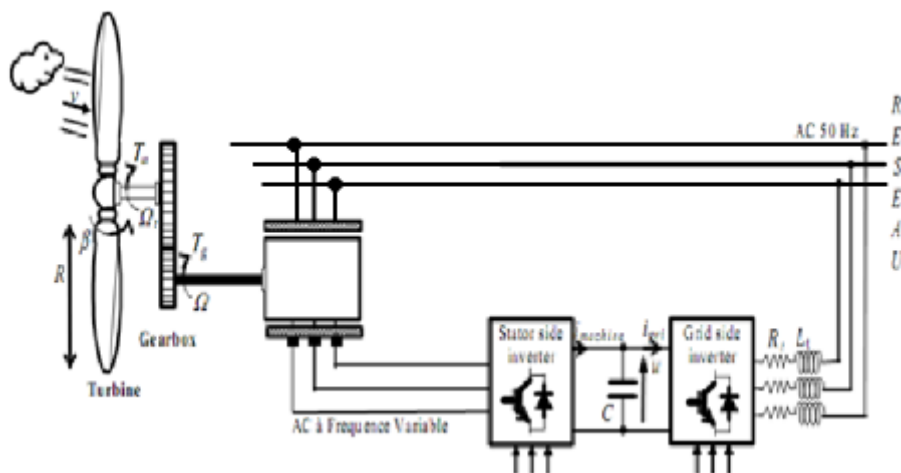


Fig. I-14 : Aérogénérateur à vitesse variable

I.7. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.7.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs.

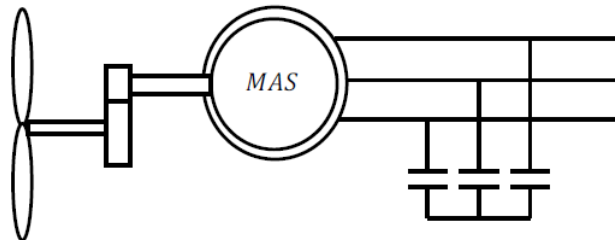


Fig. I-15 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

I.7.2. Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [9].

I.7.2.1. Machine synchrone

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au

réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure I-16) [8].

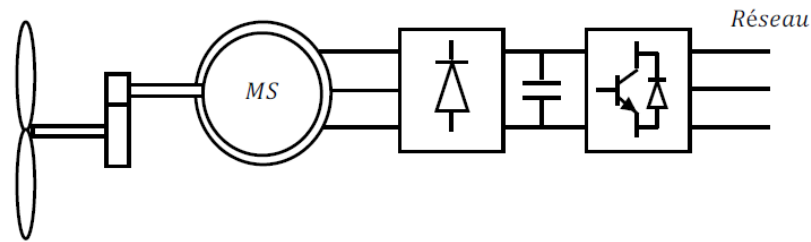


Fig. I-16 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

I.7.2.2. Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant (figure I-17).

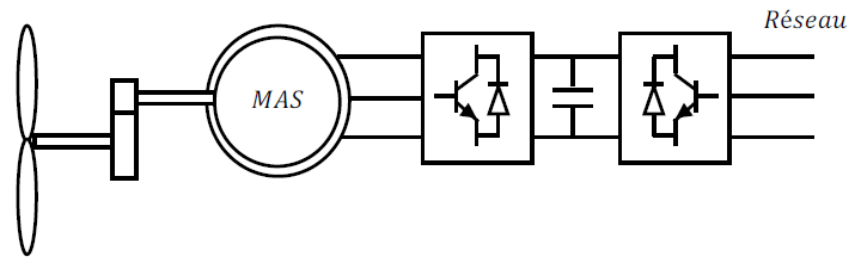


Fig. I-17 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.7.2.3. Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation avec leurs dispositifs de réglage de la vitesse à travers le contrôle de glissement sont envisageables :

A. Contrôle de glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé (figure I.18). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.

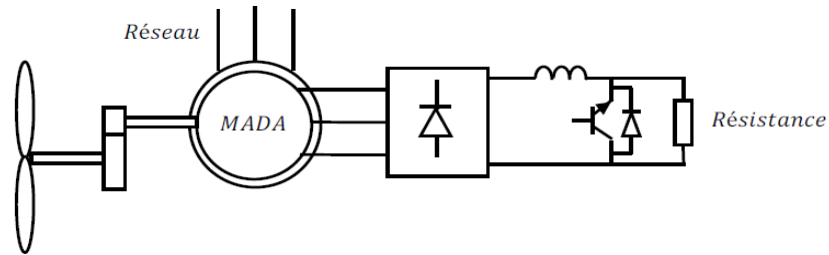


Fig. I-18 : Contrôle de glissement par l'énergie dissipée.

Vue la taille de la résistance (située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse avec un glissement maximum qui ne dépasse pas 10 %. L'inconvénient de ce principe c'est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion [10].

B. Transfert de la puissance rotorique sur le réseau

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. On peut utiliser pour cette récupération un système statique de conversion d'énergie constitué par un convertisseur de puissance [11]. Ce convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25 % de la puissance nominale) pour un glissement maximal correspondant à la puissance statorique nominale. Pratiquement, plusieurs solutions sont envisageables :

- **Structure à base de pont à diodes et pont à thyristors :**

Cette structure est appelée montage de Kramer. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (figure I-19) [12]. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

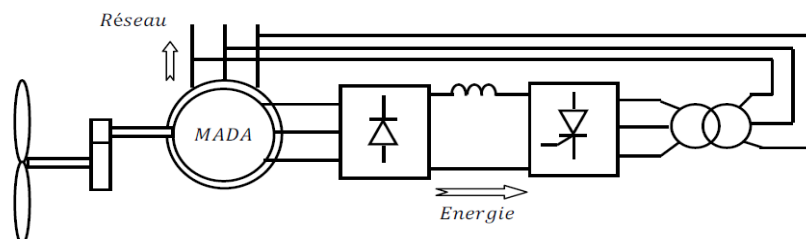


Fig. I-19 : Structure de Kramer pour la MADA.

- **Structure à base de pont à diodes et pont à transistors :**

La structure consiste à remplacer l'onduleur à commutation naturelle constitué de thyristors, par un onduleur à commutation forcée et à modulation de largeur d'impulsions (MLI), constitué par des transistors de puissance (figure I-20). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont à diodes. Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tensions importantes qui peuvent réduire leur durée de vie [13].

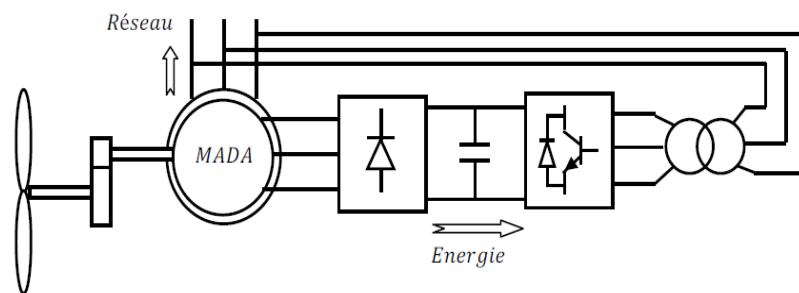


Fig. I-20 : Structure avec deux ponts à diodes et à transistors.

- **Structure à base de cycloconvertisseur :**

Cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans deux sens. Cette topologie présente donc plus de marge de manœuvre pour la commande (figure I-21) [11].

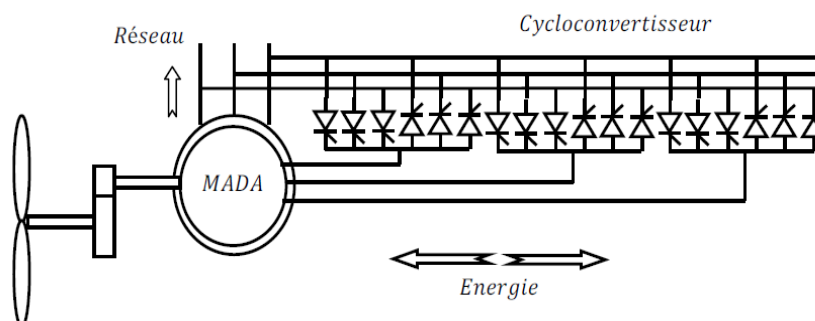


Fig. I-21 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de Scherbius". Formellement, le principe de Scherbius est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu

des convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, le principe de Sherbius est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur. Celui utilisé dans la figure ci-dessus est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau. Comme la puissance est bidirectionnelle, il est possible de faire varier l'énergie de glissement et faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur.

- **Structure à base de convertisseur à MLI :**

Une autre structure intéressante (figure I-22) utilise deux ponts triphasés à IGBT commandés par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau

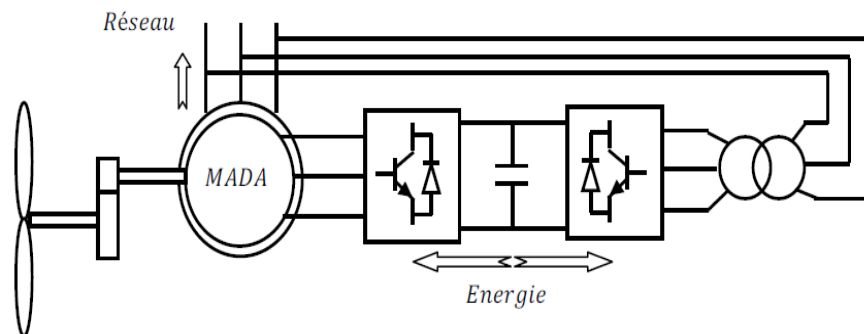


Fig. I-22 Structure avec convertisseurs à MLI.

Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement du convertisseur à MLI du côté du réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

C'est pour ça que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable ;
- Le convertisseur de puissance de petite dimension ;
- Le niveau bas de fluctuations mécaniques ;
- La possibilité de fonctionnement en hypo-synchronisme et en hyper-synchronisme, ce qui permet pour ce dernier mode de fonctionnement de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau ;
- Et enfin le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

I.8. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.8.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gazes. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21 milles tonnes de SO₂ et 17.5 milles tonnes de Nox. Ces émissions sont les responsables des pluies acides [9] ;
- Elle ne nécessite aucun carburant ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [14] ;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte ;
- 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 ;
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.8.2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées [5] ;
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

I.9. Conclusion

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

Nous avons utilisé le développement théorique des systèmes éoliens connu par la théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec un coefficient théorique de 0.59 maximum qui reste inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs.

Modélisation et commande vectorielle de la MADA

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la machine asynchrone à double alimentation, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportées par cette machine, ainsi que les différents domaines d'application.

En plus, on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, cette modélisation était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, ainsi que la commande vectorielle.

II.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [15].

II.3. Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écurueil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écurueil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (figure II-1).

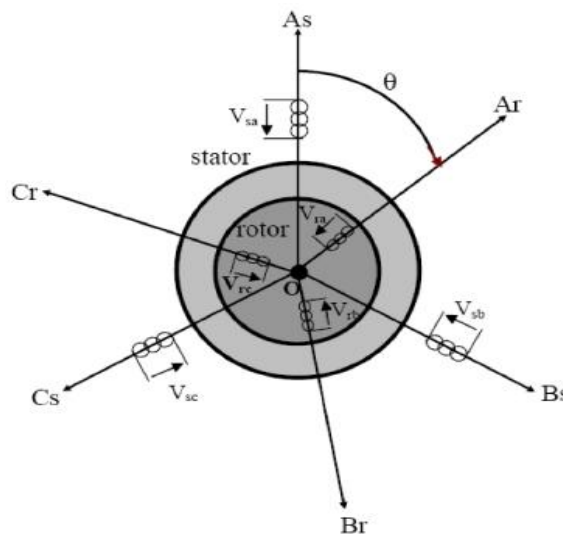


Fig. II-1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.

II.4. Modes de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [2].

Par contre dans le cas de 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 moteur qu'en mode générateur.

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor [1].

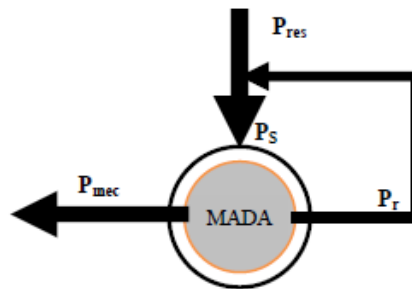


Fig. II-2 : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [3].

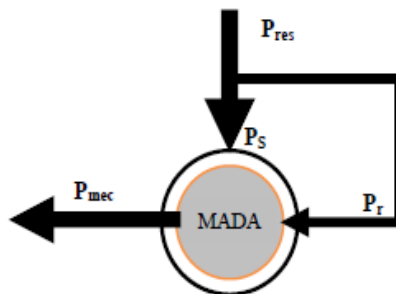


Fig. II-3 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [1].

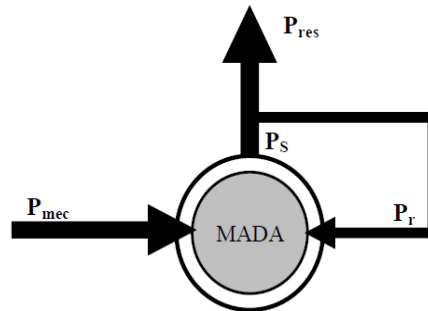


Fig. II-4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

II.4.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- la vitesse de la machine au dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [4]

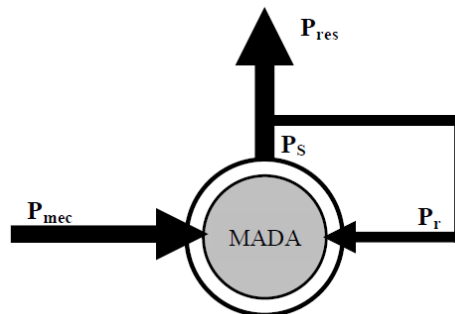


Fig. II-5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$. et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [12] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_g \quad (\text{II.1})$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [12].

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

$$f_{ro} = fg \quad (II.2)$$

II.6. Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [16].

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- 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 du carburant.

II.7. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [19].

II.7.1. Avantages de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer :

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écurie ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine. [19]
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présenté la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [19]

II.7.2. Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais [19].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [19].

II.8. Modélisation de la MADA

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématiques qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

II.8.1. Hypothèses simplificatrices

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les Pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [7][10].

Comportement de la machine asynchrone à double alimentation

- trois bobines statorique (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.
- trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (R_a, R_b, R_c).

La figure (II-6) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).

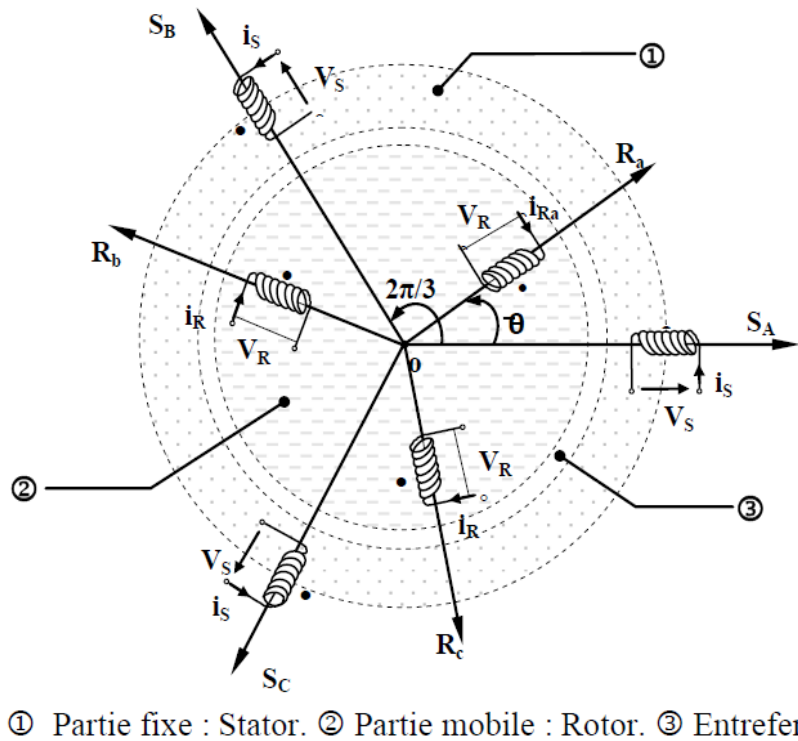


Fig. II-6 : Représentation simplifié de la MADA.

II.8.2. Modèle mathématique de la MADA

II.8.2.1. Equation électrique

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

- Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

- Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

II.8.2.2. Equations magnétiques :

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (\text{II.5})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Tel que : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

En remplaçant les relations (II.5) et (II.6) respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II.7})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II.8})$$

Où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

II.8.2.3. Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f. \Omega \tag{II.9}$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.5) et (II.6). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.8.3. Modèle biphasé de la MADA

II.8.3.1. La transformation de Park

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II-7).

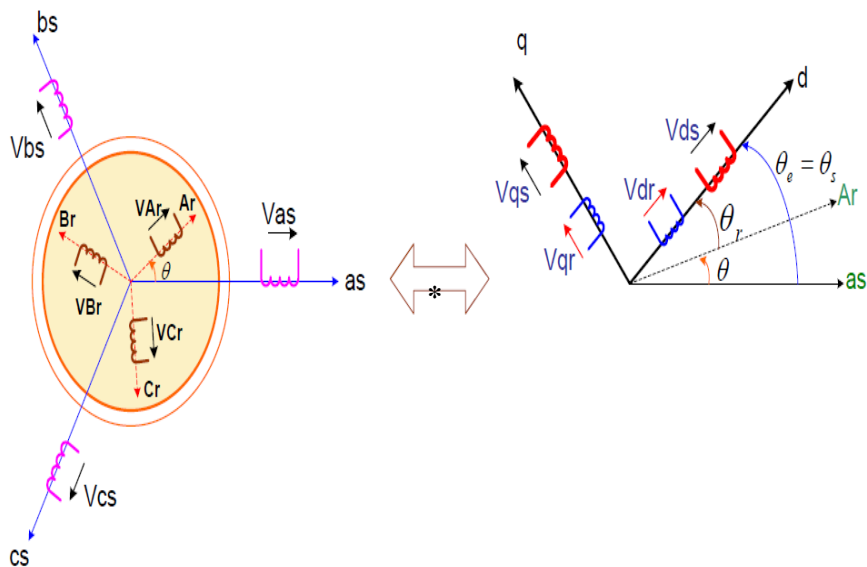


Fig. II-7 : Modèle de PARK de la MADA.

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [20] :

$$[P(\theta)] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

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

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

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

$$[P(\theta)]^{-1} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation (II.12) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

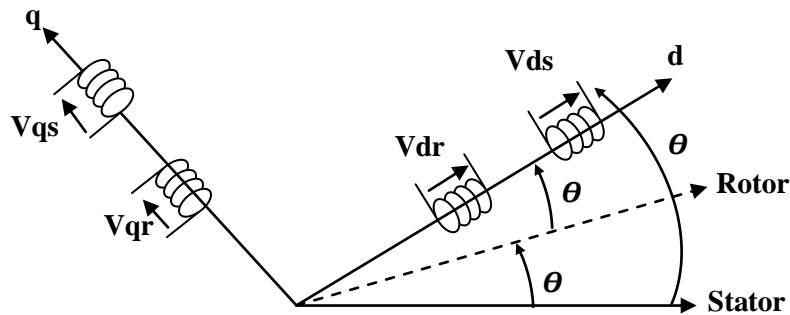


Fig. II-8 : Représentation de la machine dans le repère diphasé

II.8.3.2. Equation des tensions

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) sont données par:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II.13)$$

Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (II.14)$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (II.15)$$

Talque :

ω_s : Pulsation du champ tournant d'axe (d, q)

ω_r : Pulsation électrique du rotor

La composante homopolaire du système (II.13) est nulle pour un système équilibré.

II.8.3.3. Equation des flux

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

- Au stator :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Telque : les inductances cycliques

$$L_s = l_s - M_{sr} \quad L_r = l_r - M_{rs} \quad L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$$

II.8.3.4. Equation du couple électromagnétique

Après qu'ont effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimée sous différentes formes, on trouve celle-ci [20] :

$$C_e = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (II. 18)$$

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (II. 19)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (II. 20)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (II. 21)$$

II.9. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Où bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

II.9.1. Principe général

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est illustré sur la figure (II-9).

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Pour établir cette commande, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques et rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont nulles.

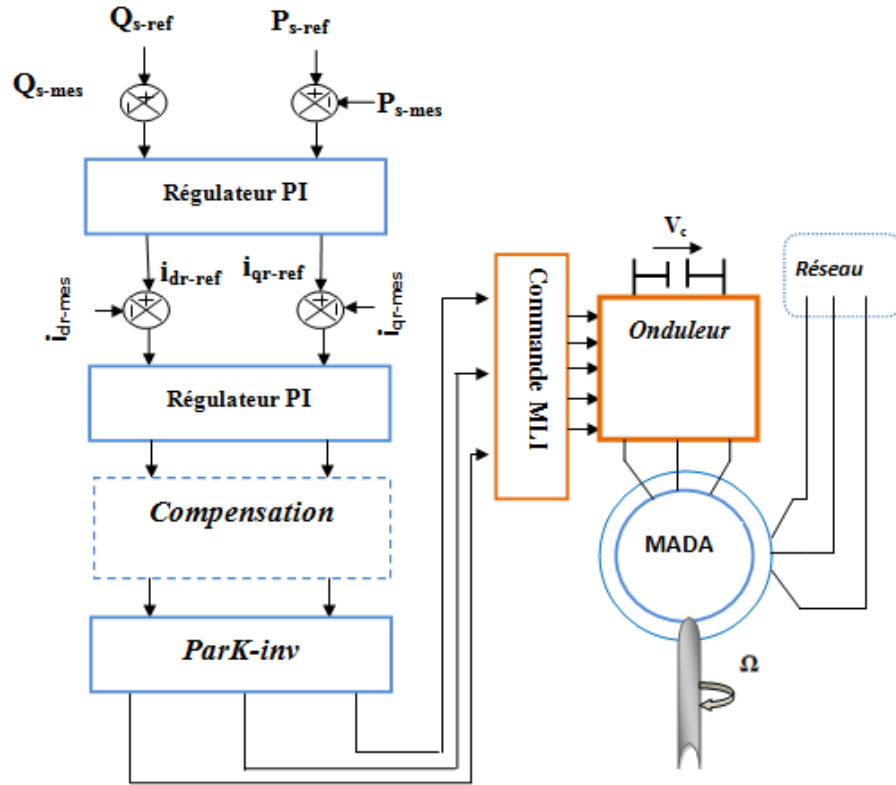


Fig. II-9 : Principe général de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique

II.9.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d’abord le système d’équations différentielles de la machine [6] :

$$[V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \tag{II.22}$$

$$[V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds}$$

$$[V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \tag{II.23}$$

$$[V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr}$$

II.9.2.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En appliquant la technique d’orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l’axe q soit constamment nul).

Nous pouvons écrire :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s ; \Phi_{qs} = 0 \tag{II.24}$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \end{cases} \quad (II. 25)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (II. 26)$$

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

$$V_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d\Phi_{ns}}{dt} \quad (II. 27)$$

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques R_s , hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [19] :

$$V_{ns} \approx \frac{d\Phi_{ns}}{dt} \quad (II. 28)$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi/2)$ sur ce même vecteur.

Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0 ; V_{qs} = V_s \quad (II. 29)$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (II-10)

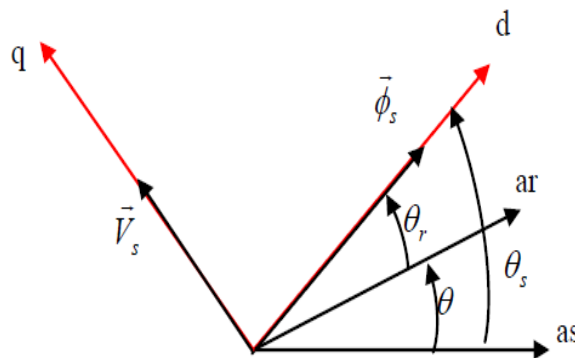


Fig. II-10 : Orientation du flux statorique

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

$$C_e = p \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II. 30})$$

Le courant i_{qr} sera rendu variable par action sur la tension V_{qr} , le flux peut être contrôlé par le réglage du courant i_{dr} . Ce dernier est rendu variable par action sur la tension V_{dr} [5], [6]

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

II.9.2.2. Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques

A partir des équations (II.32), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

II.9.2.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données à l'équation (II.35), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

A partir de l'équation (II.31), on peut avoir :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{II. 37})$$

L'expression de la puissance réactive Q_s devient:

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{II. 38})$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, 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 $V_s^2 / L_s \omega_s$ près imposée par le réseau [6].

II.9.2.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Les équations des flux

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 40})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 41})$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 41})$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P\right] i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P\right] i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

- V_{dr} et V_{qr} sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;
- $[L_r - (M^2/L_s)]$: est le terme de couplage entre les deux axes ;
- $[g\omega_s (MV_s/\omega_s L_s)]$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation ;

Les équations (II. 34), (II. 35) et (II. 41) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure II-11).

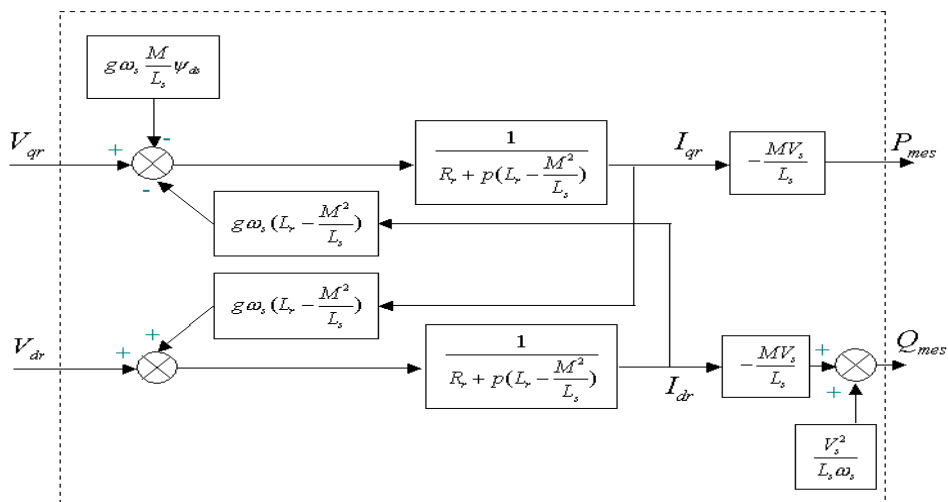


Fig. II-11 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des

couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

II.9.3. Types de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte [14].

II.9.3.1. Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale [14].

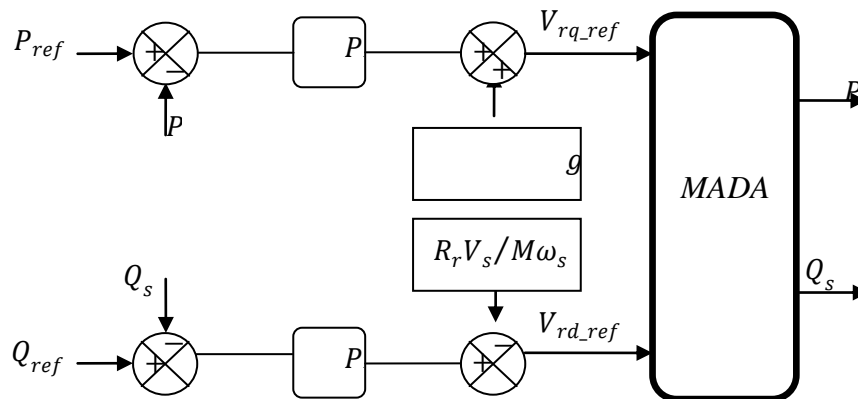


Fig. II-12 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

II.9.3.2. Commande vectorielle indirecte :

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [15].

II.9.3.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure (II-13) [16].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte.

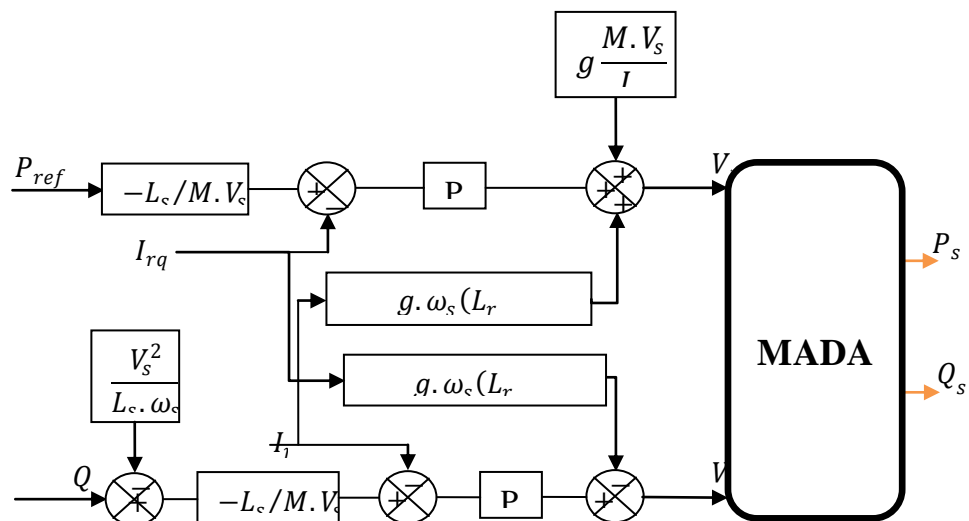


Fig. II-13 : Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.

II.9.3.2.2. Commande indirecte en boucle fermée (Commande avec boucle de puissance):

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (II-14) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle [16].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure (II.14).

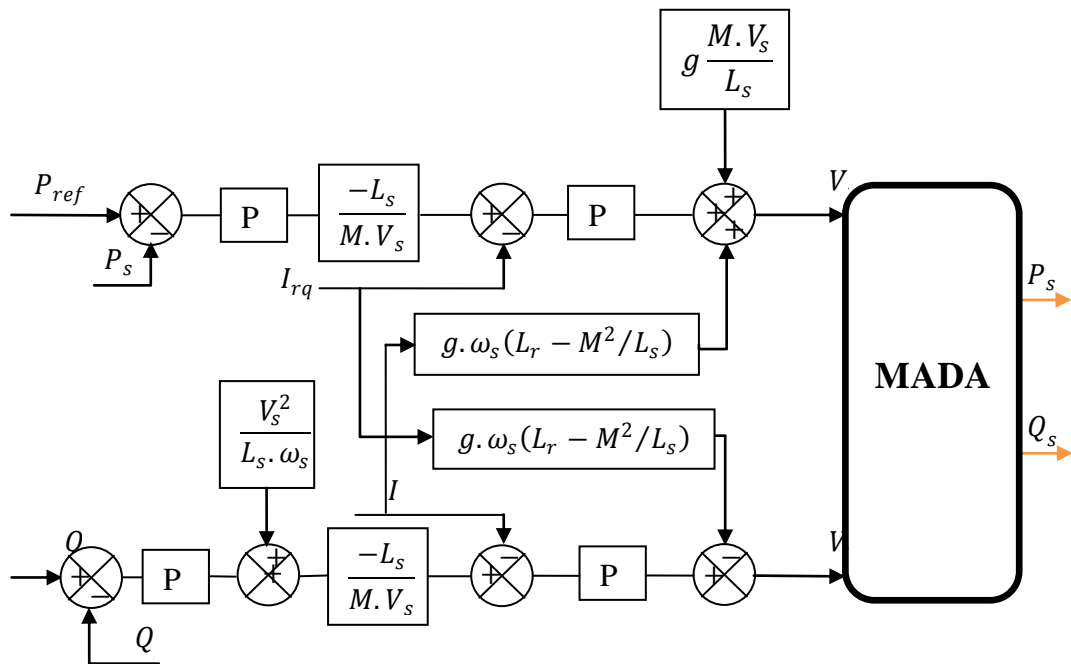


Fig. II-14 : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.

Les gains des correcteurs dans la commande indirecte en boucle (ouverte et fermée) sont calculés de la même manière qu'à section.

II.9.4. Type du régulateur PI

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en oeuvre,

ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [17]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotorique.

II.9.5. Onduleur de tension a deux niveaux

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu alternatif permettent de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

La tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur. [21]

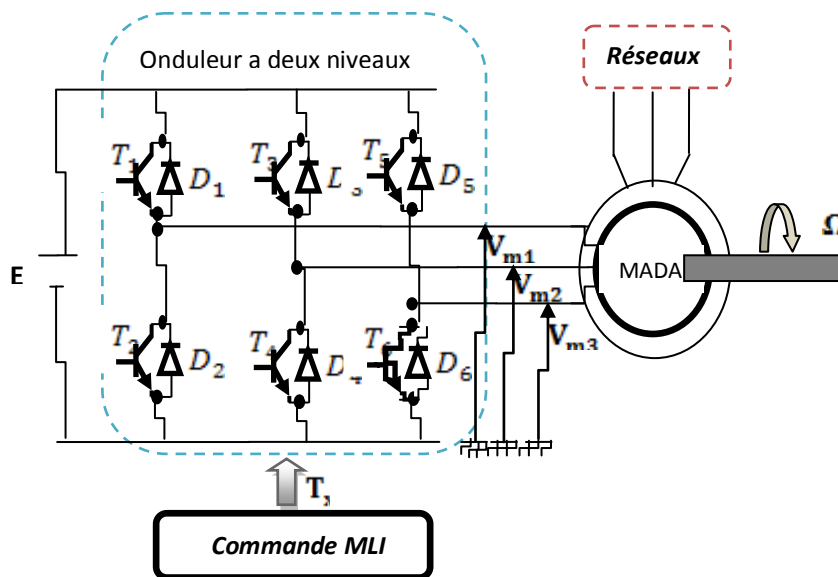


Fig. II-15 : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI

Ou :

- E : la tension du bus continu.
- V_{m-i} : avec $i \in \{1,2,3\}$ sont les tensions simples modulées par le convertisseur MLI.
- T_i, D_i : avec $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$ désignent respectivement le transistor IGBT et la diode en anti parallèle.

II.9.5.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II-16).

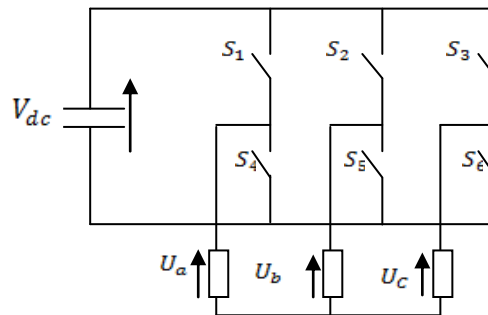


Fig. II-16 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé ;
 $S_a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b=0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé ;
 $S_b=1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.
- Branche3 :
 $S_c = 0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé ;
 $S_c = 1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3} \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3} \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

II.9.5.2. Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangle sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.17).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.48})$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.49})$$

II.9.4.3. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [10] :

❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

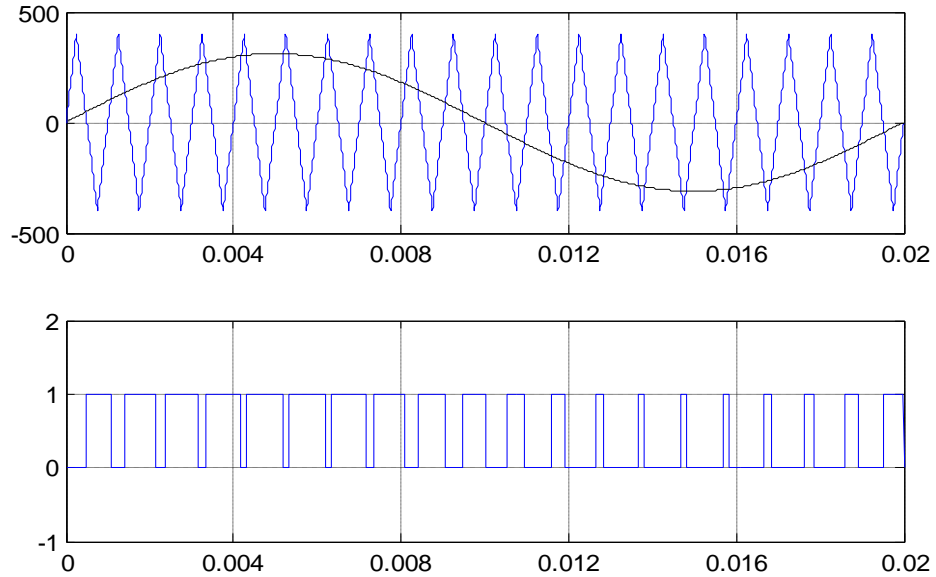


Fig. II-17 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoidale à une porteuse.

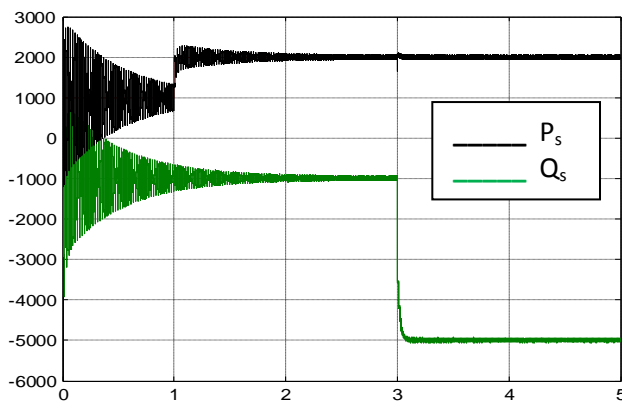
II.10. Simulation de la commande de la MADA

Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MATLAB-Simulink, à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir la machine, l'onduleur, la commande MLI, les régulateurs et divers composants nécessaires à la commande. Nous avons soumis le système à des échelons de référence afin d'étudier le comportement de la régulation des puissances active et réactive de la machine transmises au réseau.

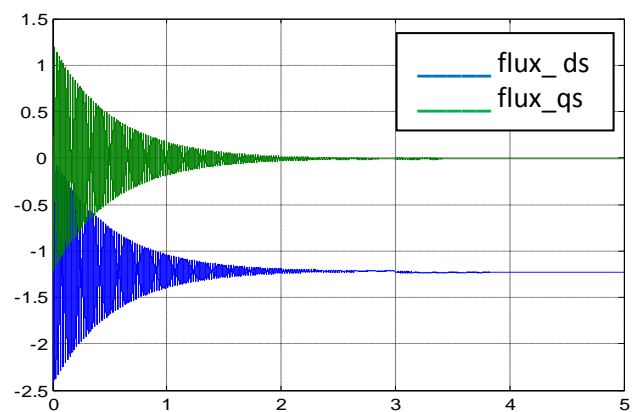
$$R_s = 0.474; R_r = 0.7614; L_s = 0.12; L_r = 0.122; M = 0.107; J = 0.5; F = 0; V_r = 250;$$

II.10.1. Résultats de simulations :

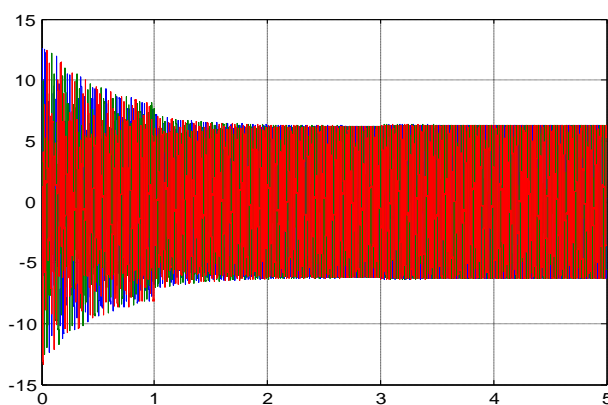
Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous avec une vitesse de rotation de la MADA constant égale 50 rad/s



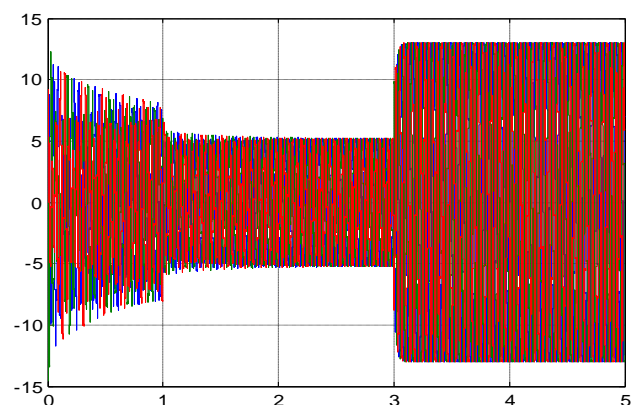
a. La puissance active et réactive statorique



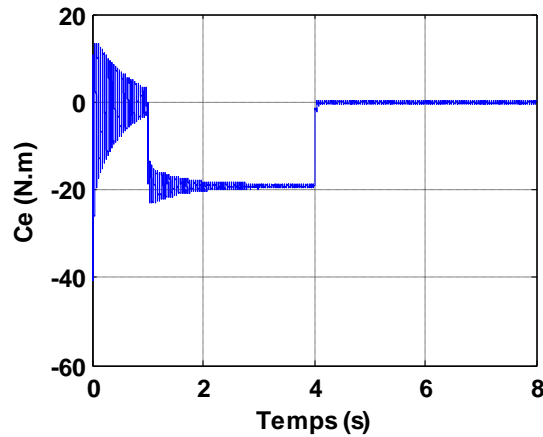
b. Le flux statorique selon l'axe d et q



c. Les courants statorique



d. Les courants rotorique



e. Couple électromagnétique

Fig. II-18 : Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA

II.10.2. Interprétations des Résultats

Ces résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier une description générale de la machine asynchrone à double alimentation. Dans le but d'étudier le comportement de cette dernière nous avons établi un modèle dynamique en tenant compte certaines hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier.

Pour contrôler la MADA nous avons utilisé une loi de commande vectorielle directe par un système d'orientation de flux statorique. Cette commande qui ramène les équations de modèle de la machine en deux équations permet de faciliter la commande de la machine à double alimentation.

Commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

III.1. Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique [11]. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension qui est supposé constante dans le chapitre précédent, ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI. L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau, par la suite, on a modélisera la turbine, son contrôle, et puis, l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

III.2. Modèle de la chaîne de conversion

III.2.1. Architecture du dispositif de commande

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue, qui est fournie par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La structure montrée sur la figure (III-1) comporte deux convertisseurs à MLI, l'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations [12].

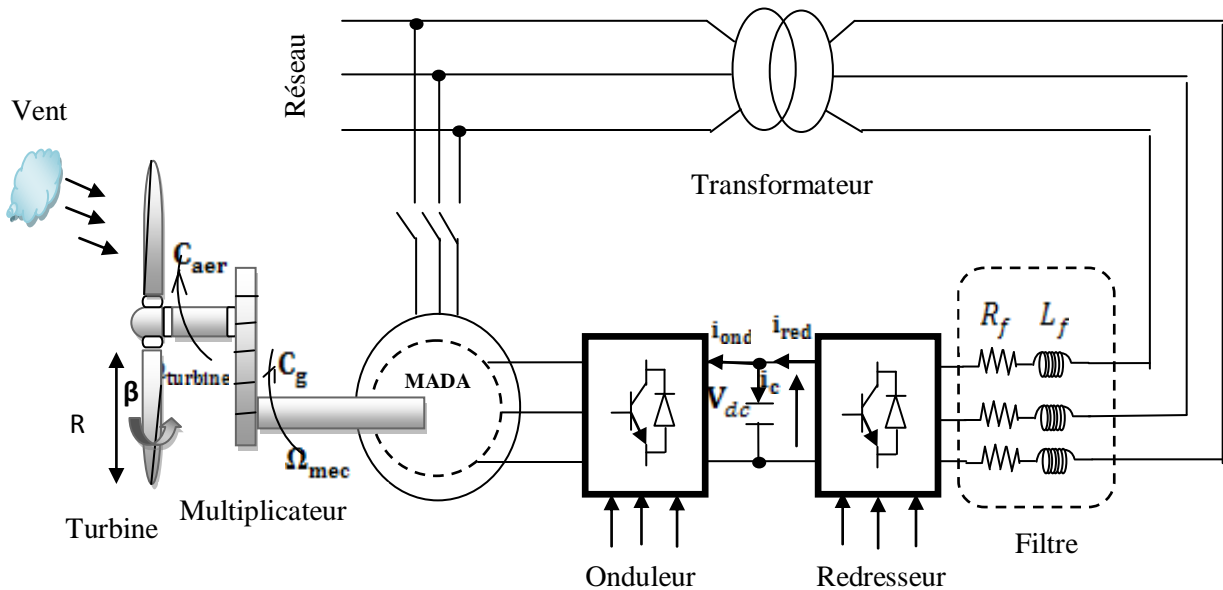


Fig. III-1 : Modèle de la chaîne de conversion éolienne.

Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux, commandés par MLI, ils sont bidirectionnels en puissance, donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment, Sauf que signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

Le rotor de la MADA est entraîné par la turbine qui sera détaillée dans les paragraphes qui suivent.

III.2.2. Redresseur de tension

Le rôle du redresseur de tension est de fournir la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI permet le contrôle des courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance de réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées [11].

III.2.2.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est à deux niveaux, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que [10] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 2})$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - idg \quad (\text{III. 3})$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s L i_{qr} \\ V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_s L i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par le variable h_d et h_q :

$$\begin{cases} h_d = e_d - \omega_s L i_{qr} - V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ h_q = e_q + \omega_s L i_{dr} - V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur h_d et h_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La PLL sert essentiellement pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park de la phase équivalente d'un système triphasé. la PLL réalise la suivre de phase de la composante directe de la tension des réseaux e_d , afin d'éliminer la composante en quadrature, e_q , ce qui se produit lorsque la phase estimée, θ_g est égale à la phase du réseau.

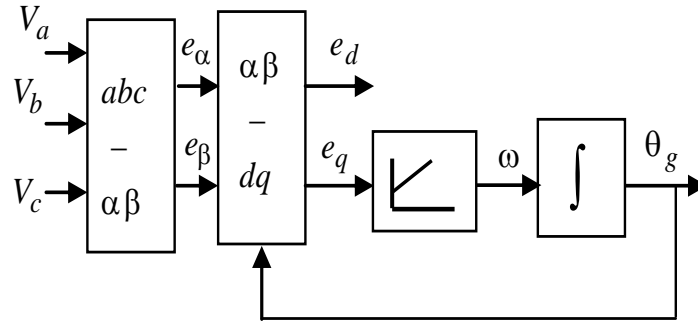


Fig. III-2 : Structure classique d'une PLL triphasée.

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure (III-3).

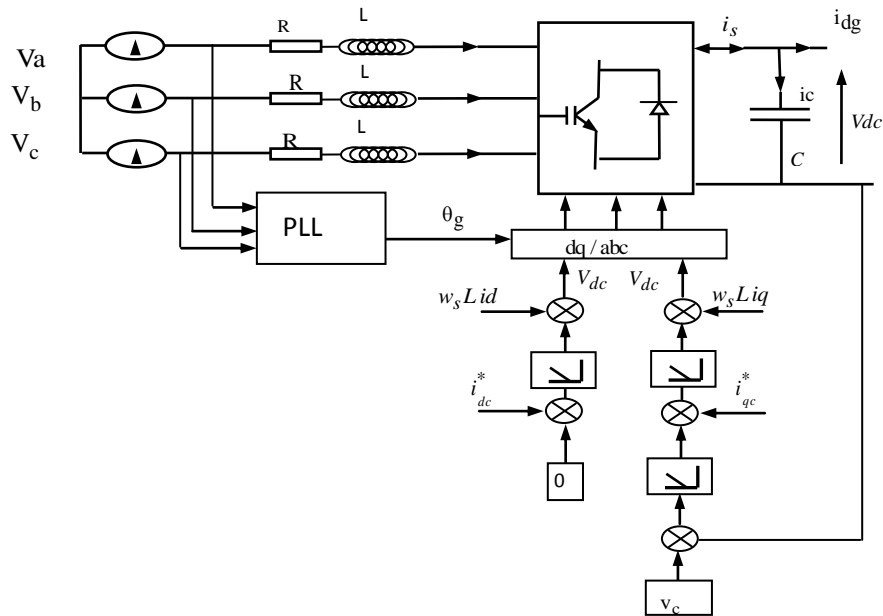


Fig. III-3 : structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée

III.2.2.2. Commande du redresseur

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence [14].

III.3. Filtre (côté réseau)

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Durant la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation [15].

III.3.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau)

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [15].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res-d}(s)}{V_{res-d} - V_{red-d}} = \frac{I_{res-q}(s)}{V_{res} - V_{red-d}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III.6)$$

III.4. Régulation de la tension du bus continu

Le réglage de la tension de bus continu est réalisé par une boucle externe, la transition de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu, donc la boucle de régulation externe permet de maintenir une tension constante au niveau de bus continu et de généré la référence du courant à injecter dans le condensateur i_{c-ref} .

- **Modélisation du bus continu**

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif [11] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} i_c \quad (III.7)$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (III.8)$$

Avec : i_{red} : courant redressé ; $i_{ond} = i_{ch}$: Courant de charge ;

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \tag{III. 9}$$

Ou :

$V_{dc}(t_0)$: est la valeur de la tension continue à l' instant initial.

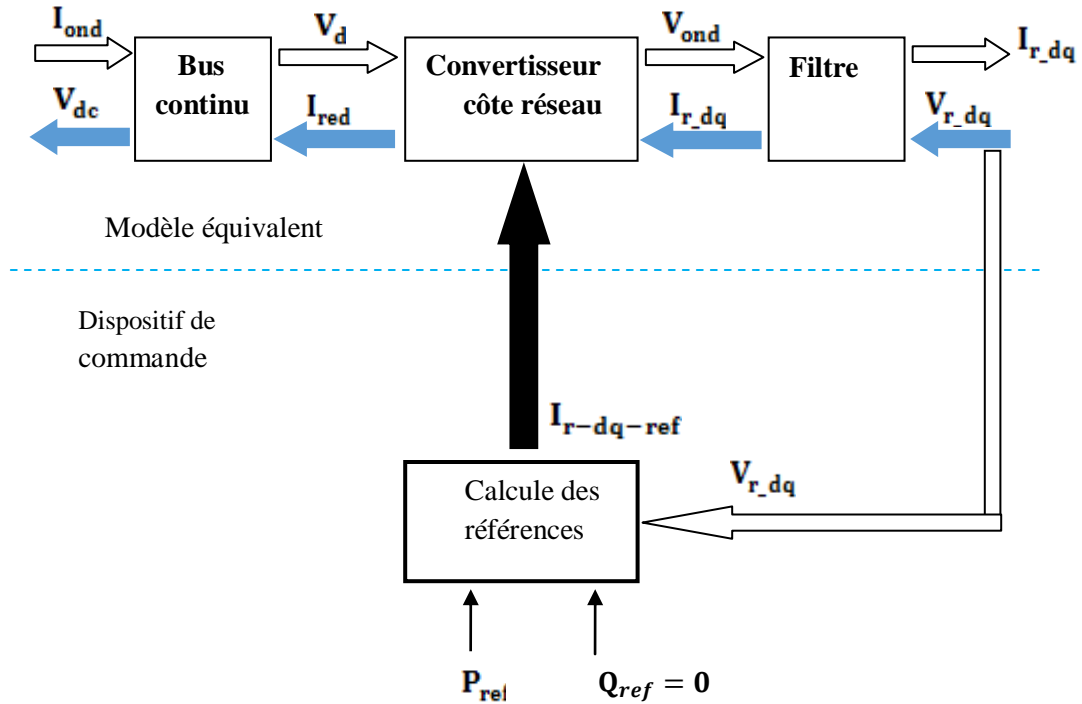


Fig. III-4 : Schéma synoptique de la commande du bus continu.

L'utilisation du redresseur a pour but d'assurer une tension continue constante quelles que soient les perturbations qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement. Pour cela, une boucle de régulation doit être réalisée. Celle-ci permet de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur. Aussi, afin de déterminer les signaux de commande du redresseur, il faut prendre en compte les puissances transitées qui sont en fonction des courants du réseau alimentant le convertisseur [6] :

$$\begin{cases} P = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \tag{III. 10}$$

A partir de ces relations il devient aisé de réguler les courants du coté réseau en imposant des références sur les puissances actives et réactives (P_{ref} , Q_{ref}) :

$$\begin{cases} i_{dr_ref} = \frac{P_{ref} v_{dr_mes} + Q_{ref} v_{qr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \\ i_{qr_ref} = \frac{P_{ref} v_{qr_mes} - Q_{ref} v_{dr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \end{cases} \quad (III. 11)$$

La composante du courant en quadrature est utilisée pour réguler la tension du bus continu, quand à la composante directe, elle est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [13]. La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Il est à relever que le réglage du bus continu est réalisé par une boucle externe tandis que les courants transités seront réglés par une boucle interne intégrée dans la commande du redresseur commandé. Cette solution est la plus adaptée pour la commande des courants à la sortie d'un convertisseur statique [11].

Le redresseur sera commandé par deux grandeurs. La puissance réactive de référence sera fixée à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau. La puissance active sera estimée à partir de la valeur référence du bus continu. L'estimation de la valeur référence de la puissance active passe par la connaissance du bilan énergétique, donc une modélisation des transits de puissance active [13].

Pour pouvoir faire une modélisation du transit dans la liaison avec le réseau, il est impératif d'effectuer le bilan énergétique de cette dite liaison. En supposant que les pertes dans les convertisseurs et le condensateur sont nulles, la puissance transmise au redresseur s'exprime par :

$$P_{red} = P_{ond} - P_c \quad (III. 12)$$

P_c Est la puissance emmagasinée dans le condensateur, elle s'exprime par :

$$P_c = V_{dc} \cdot I_c \quad (III. 13)$$

La puissance fournie par l'onduleur connecté à la MADA s'exprime par :

$$P_{ond} = V_{dc} \cdot I_{ond} \quad (III. 14)$$

La puissance transitée par le redresseur vers le réseau passe par un filtre, celui-ci contient une résistance et donc une partie de la puissance transitée vers le réseau sera dissipée par effet Joule, d'où l'expression de la puissance renvoyée au réseau [13] :

$$P = P_{red} - P_{filtre} \quad (III.15)$$

Tel que :

$$P_{filtre} = R_{filtre} \cdot (I_{d_res}^2 - I_{q_res}^2) \quad (III.16)$$

Et donc la puissance renvoyée au réseau s'exprime par :

$$P = P_{red} - P_c - P_{filtre} \quad (III.17)$$

A partir des relations (III.11, III.12, III.13, III.14) cette puissance peut être écrite en fonction de la tension du bus continu tel que :

$$P = (I_{red} - I_c) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.18)$$

Il est possible donc d'estimer la valeur de la puissance de référence établie à partir d'une valeur référence du courant dans le condensateur tel que :

$$P_{ref} = (I_{red} - I_{c_ref}) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.19)$$

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur PI (le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe(B)) générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (Figure III-5).

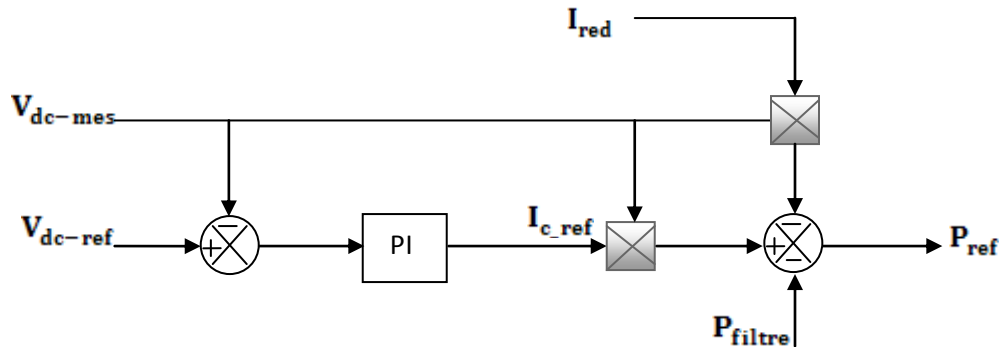


Fig. III-5 : Contrôle de Bus continu

III.5. Modélisation de la turbine

III.5.1. La modélisation

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertie en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent La surface balayée par le rotor

III.5.1.1. La surface balayée par le rotor

La surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 600 Kw est de quelque 1.500 m², le diamètre du rotor étant d'environ 43 à 44 m. L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 2 \times 2 =$ quatre fois plus d'énergie.

III.5.1.2. La densité de l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume. Où n'autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne [10] [29].

III.5.1.3. La Vitesse du vent

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et différent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

III.5.1.4. Puissance récupérable par une turbine

La turbine qui comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (III-6) montre le schéma d'une turbine éolienne. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III. 20})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III. 21})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la Longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{ent} : est la vitesse du vent en (m/s).

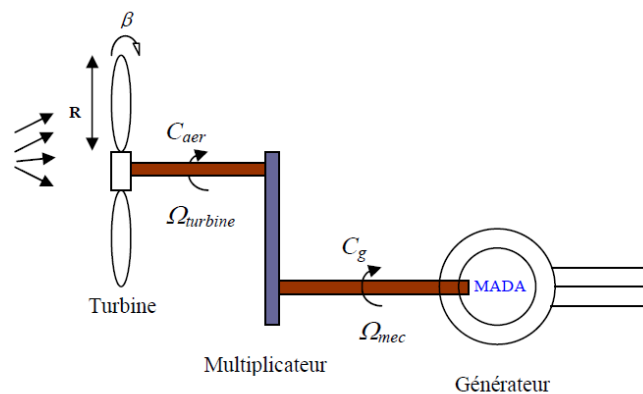


Fig. III-6 : Schéma d'une turbine éolienne

D'après la relation (III.21) on remarque que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, on ne peut pas extraire la totalité de la puissance car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p , qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [4], [29], [6], [21]. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta)(\rho S v^3) \quad (III. 22)$$

C_p : coefficient de puissance défini comme suit :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 + 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0,001 \quad (III. 23)$$

β : angle d'orientation des pales.

λ : est le ratio de vitesse défini comme :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III. 24)$$

Avec :

R : Longueur de pales. Ω_t : Vitesse de la turbine.

V_{vent} : Vitesse de vent en (m/s)

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 25)$$

III.5.1.5. Le coefficient de puissance

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ [6] [5]. 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 .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (III-7).

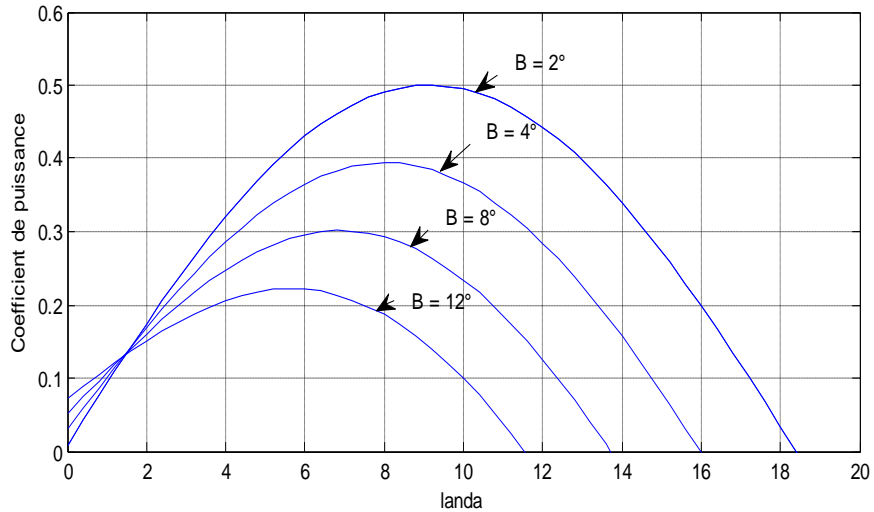


Fig. III-7 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

III.5.1.6. Modèle du Multiplicateur

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplications de l'ordre de 100. ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques [4].

Le multiplicateur a pour rôle d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice, et pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse G qui correspond au rapport de multiplication.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III. 26)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 27)$$

III.5.1.7. Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [5] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum des\ couples = C_{mec} \tag{III.28}$$

Avec :

J_t : Le moment d’inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l’éolienne

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_{mec} : Le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} ;

Le couple de frottement visqueux C_{vis} ;

Et le couple issu du multiplicateur C_g

III.5.2. Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l’action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure III-8).

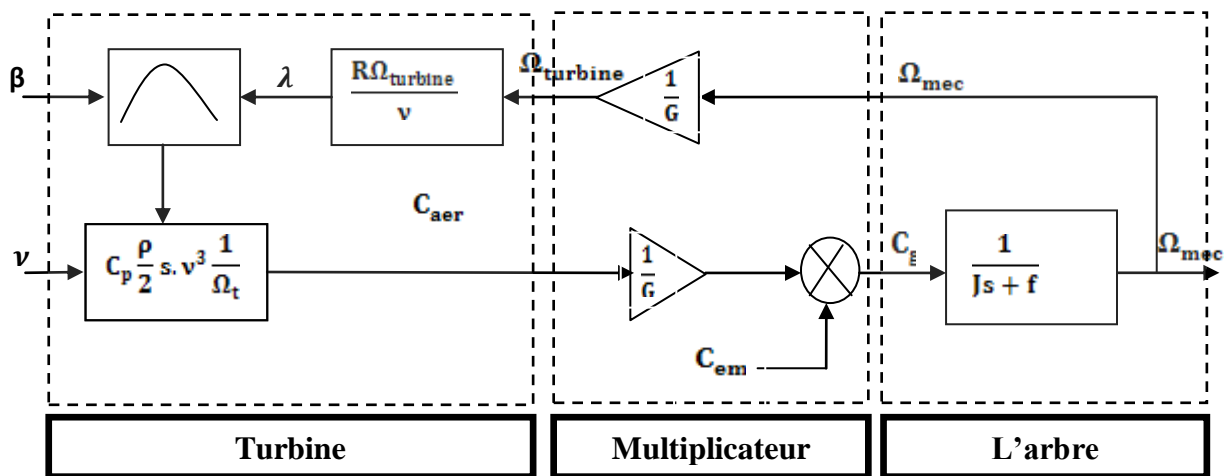


Fig. III-8 : Schéma bloc du modèle de la turbine

III.6. Stratégie de commande de la turbine

Comme il est illustré sur la figure (III-9), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [19].

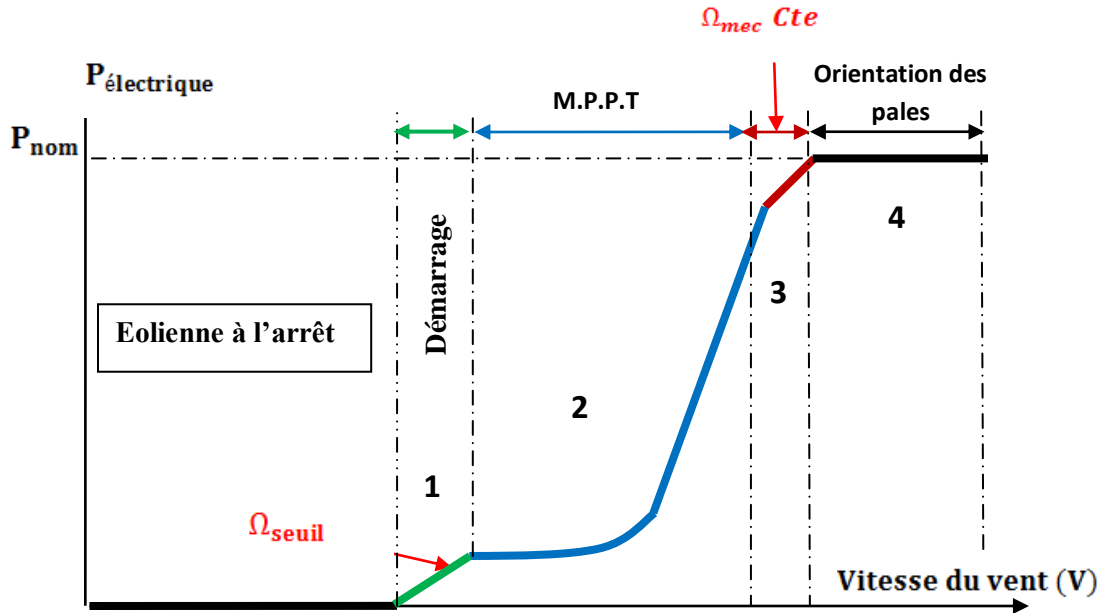


Fig. III-9: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

- **Zone1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- **Zone2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- **Zone3** : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

- **Zone4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (angle de calage), c'est le «**Pitch Control**».
- Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

III.7. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite

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

A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [19] :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [14], [19].

- **Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse**

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III. 29)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux $C_{vis} \cong 0$, on obtient :

$$C_{mec} = C_g \quad (III. 30)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine_estimé}} V_{estimé}^3 \quad (III.31)$$

Avec :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (III.32)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur λ_{Cpmax} , qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^3}{2G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (III.33)$$

La figure (III-10) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

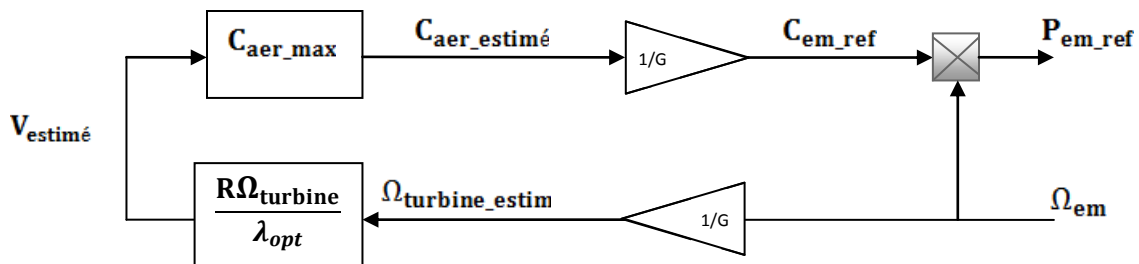


Fig. III-10: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

III.8. Système de la chaîne globale

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présentée sur la figure(III.11) [4] :

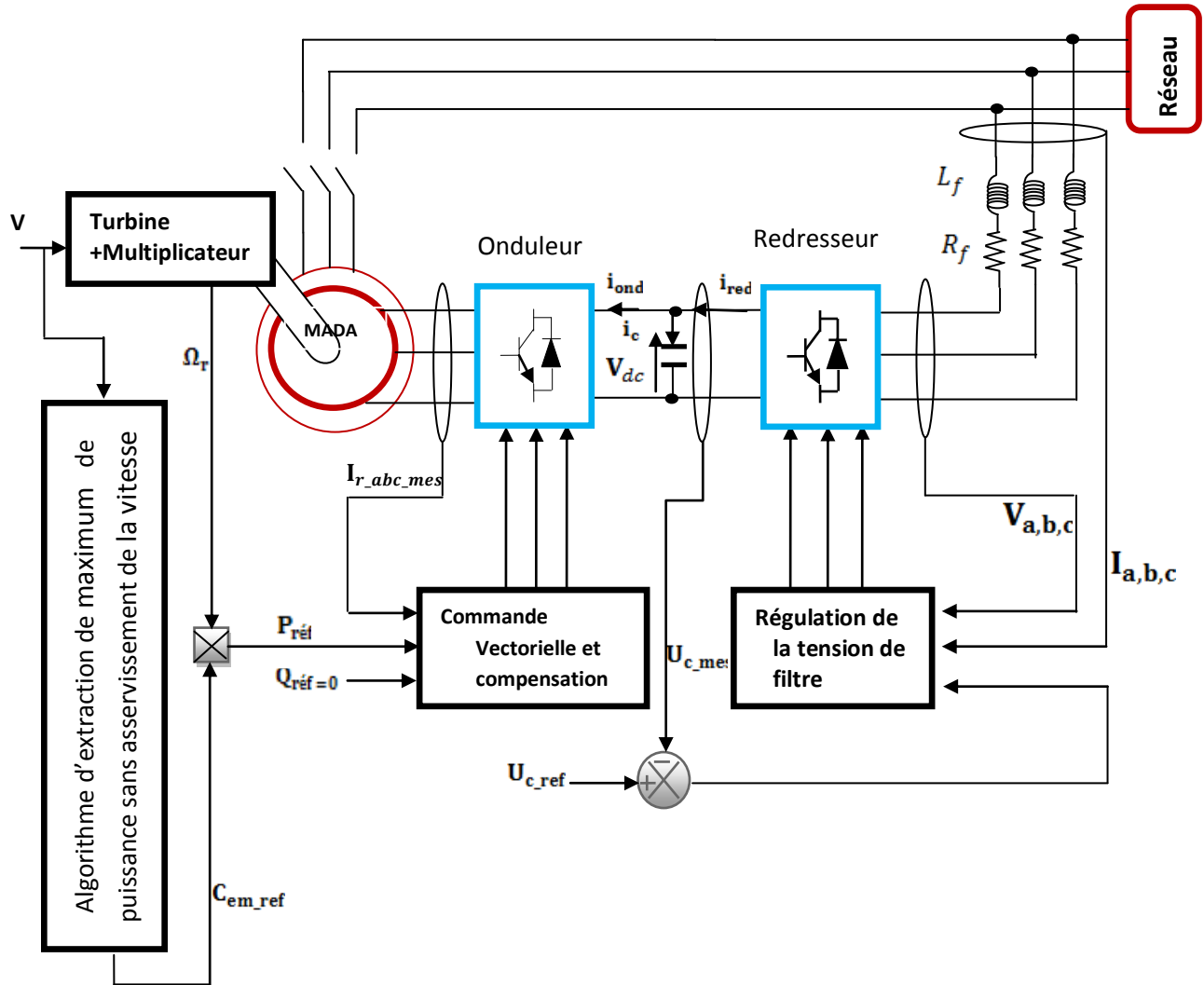
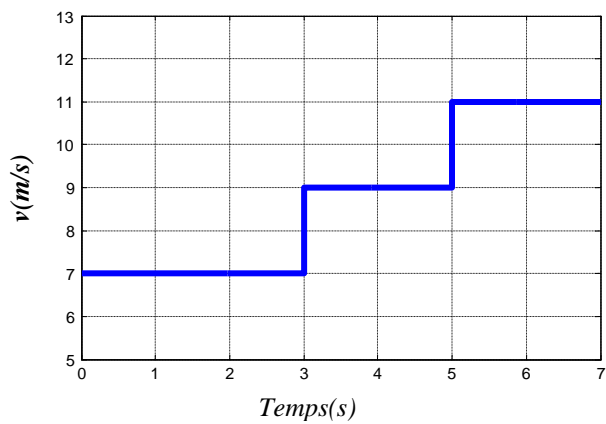


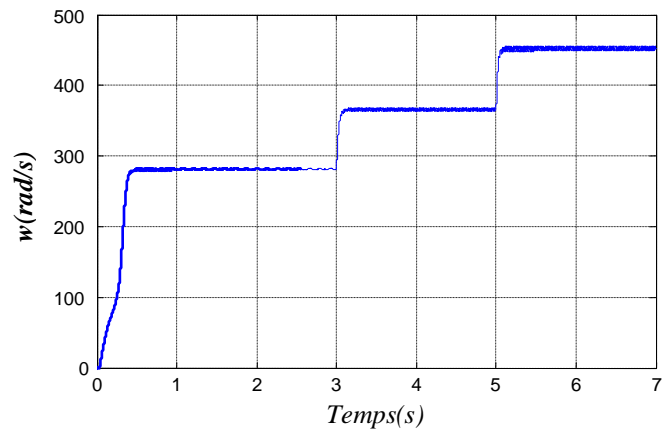
Fig. III-11 : structure de la chaîne globale

III.9. Résultats de simulation

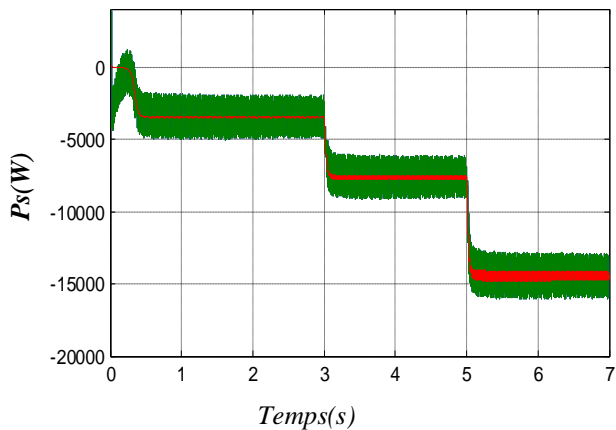
Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab/simulink, Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre. Différente vitesse de vent est appliquée sur les pales de l'éolienne. La tension de référence du bus continu, notée V_{dc} , est fixée à 800 V. La puissance réactive de référence Q_s est fixée à 0. Nous montrons que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment.



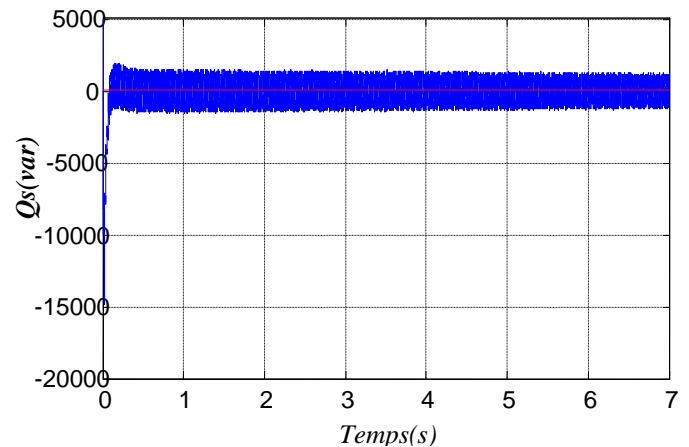
a. Vitesse du vent



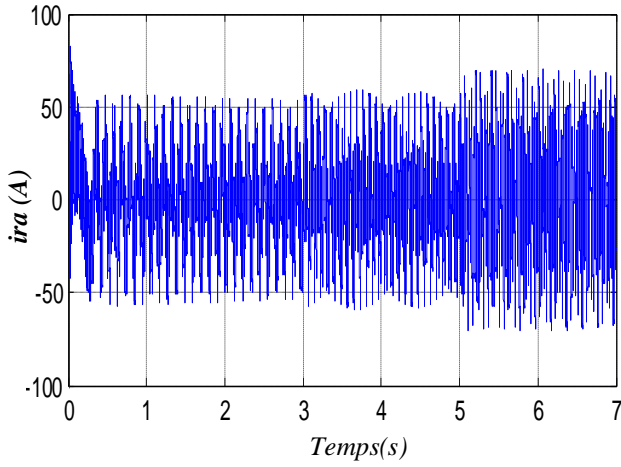
b. Vitesse de rotation



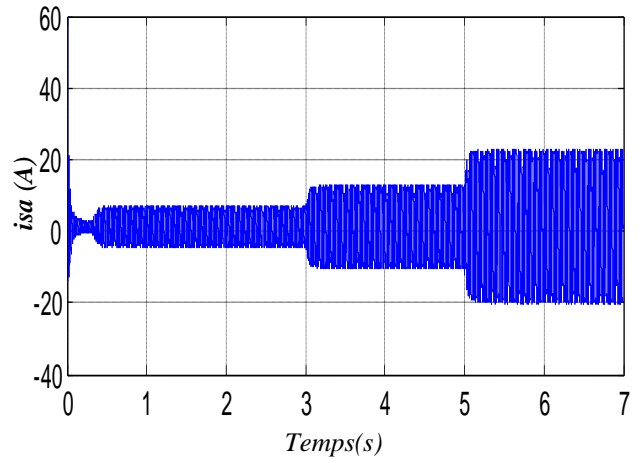
d. Puissance active statorique et sa référence



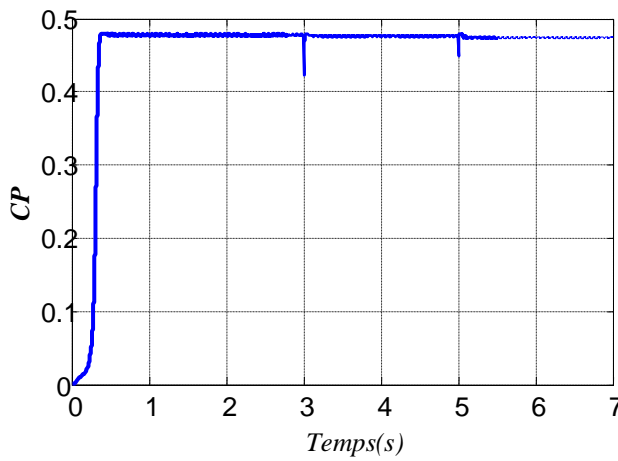
d. Puissance réactive statorique et sa référence



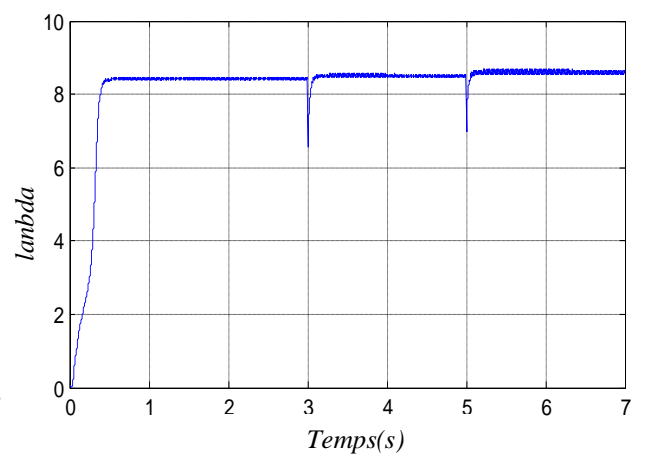
e. Courant rotorique d'une phase



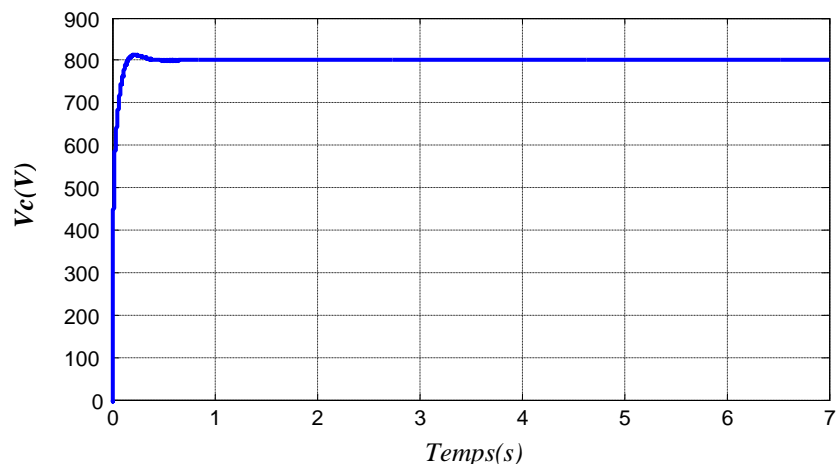
f. Courant statorique d'une phase



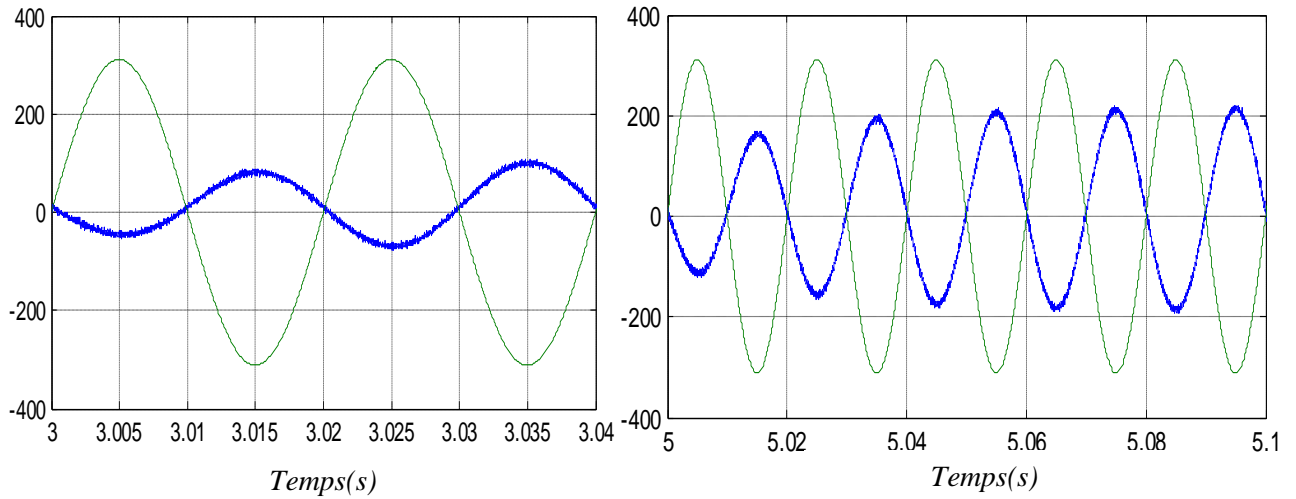
g. Coefficient de puissance de la turbine



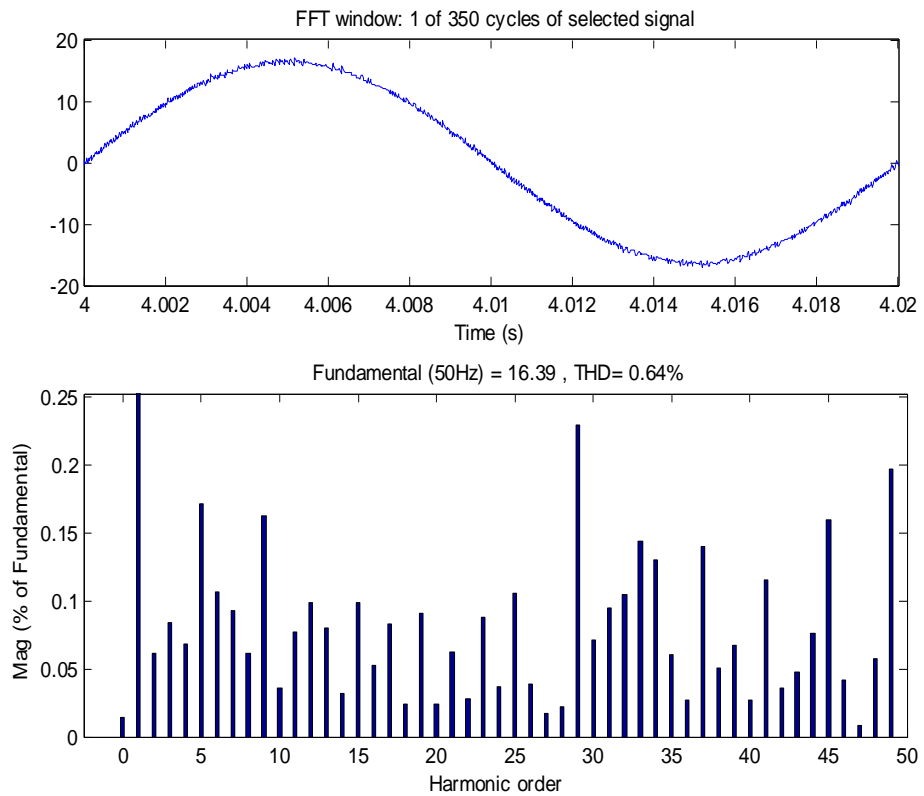
h. Vitesse relative de l'éolienne



I-tension bus continue



Zoom sur le courant statorique et la tension réseau



m-Spectre harmonique du courant de ligne

Fig. III-12 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

III.10. Interprétations des Résultats

Les figures ci dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statoriques et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statoriques.

la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux a leurs valeurs de références optimales 8.1et 0.49 successivement , avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

Le courant statorique fourni par la DFIG est en opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la DFIG n'injecte que la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref} = 0$).

Nous constatons que durant le régime de fonctionnement .le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau, cela signifie que la DFIG absorbe une puissance active du réseau.

On remarque que la de tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse.

L'analyse spectrale du courant montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique.

III.11. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques à commande MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié, la structure est associée à des stratégies de commande qui règle le couple électromagnétique recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse du turbin

Commande sans capteur de la GADA intégré dans un système éolien

IV.1. Introduction

La commande de la MADA s'appuie sur la mesure de ses courants statoriques et rotoriques, la vitesse ou la position du rotor, grandeurs physiques qui doivent fournir des informations suffisantes en qualité et en quantité de l'état de la machine.

La position du rotor ainsi que sa vitesse sont généralement obtenues à l'aide d'un codeur incrémental. Outre son coût, ce capteur pose, entre autres, les problèmes suivants :

- Pour ne pas avoir des erreurs de quantification importantes, le codeur doit être suffisamment Précis.
- Pour pouvoir fonctionner dans des environnements hostiles, le codeur doit être protégé contre la poussière et les chocs mécaniques.
- Le codeur sera nécessairement logé entre la charge et l'arbre de la machine. Ceci va induire une augmentation de l'éloignement entre ces deux éléments, donc un accouplement élastique plus long. De plus, il doit supporter les à-coups des couples imposés par la machine.

Pour toutes ces raisons, il est intéressant d'étudier la suppression du capteur mécanique et de le remplacer par des estimateurs ou observateurs de la vitesse ou de la position basés sur la mesure des grandeurs électriques de la machine.

Nous étudions dans ce chapitre un estimateur par la méthode de MRAS (Model Reference Adaptive System).

IV.2. Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique

IV.2.1. Estimation de la vitesse avec modèle de la machine

- **Méthode à base d'estimateur**

Les estimateurs connus longtemps, s'appuient sur la duplication de modèle d'état dans la partie de commande afin de reconstruire les variables internes inaccessibles sur le système réel. Nombreuses sont les méthodes proposées dans la littérature qui traitent la commande sans capteur de vitesse de la machine [22].

- **Méthode basée sur la loi d'autopilotage**

La méthode d'estimation de la vitesse utilise la loi d'autopilotage des machines électriques et peut être facilement implantée. Elle repose dans le cas de la machine asynchrone sur la relation fondamentale entre les fréquences propres de la machine asynchrone. L'objectif de cette méthode est d'obtenir la vitesse électrique du rotor à partir des deux autres fréquences du moteur, qui peuvent être estimées. Ces estimations sont évaluées à partir des courants statoriques mesurés et des flux rotoriques (courants magnétisants) estimés du moteur.

- **Système adaptatif avec modèle de référence MRAS**

Le Système Adaptatif à Modèle de Référence est basé sur la comparaison des sorties de deux estimateurs. Le premier, qui n'introduit pas la grandeur à estimer (la vitesse dans notre cas), est appelé modèle de référence et le deuxième est le modèle ajustable. L'erreur entre ces deux modèles pilote un mécanisme d'adaptation qui génère la vitesse. Cette dernière est utilisée dans le modèle ajustable [23].

- **Méthode à base d'observateur**

Le problème posé par le traitement en boucle ouvert peut être évité en utilisant des observateurs afin de reconstituer l'état du système. En fait, un observateur n'est qu'un estimateur en boucle fermée qui introduit une matrice de gains pour corriger l'erreur sur l'estimation. Afin de pouvoir observer les grandeurs non mesurables de la machine, il est nécessaire que le système soit observable. Différentes structures d'observateurs d'état, ont été proposées en littérature. Elles sont très attractives et donnent de bonnes performances dans une gamme étendue de vitesse[20].

- **Observateurs déterministes**

Dans la pratique, l'observateur déterministe prend deux formes différentes, observateur d'ordre réduit où seulement les variables d'état non mesurables du système sont reconstruites, et l'observateur d'ordre complet pour lequel toutes les variables d'état du système sont

reconstruites. Les observateurs présentent une entrée supplémentaire qui assure éventuellement la stabilité exponentielle de la reconstruction, et impose la dynamique de convergence. Les performances de cette structure dépendent bien évidemment du choix de la matrice gain.

- **Filtre de Kalman**

Une des méthodes utilisées pour l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone est le filtre de Kalman étendu (EKF) [14]. Le filtre de Kalman est un observateur non linéaire en boucle fermée dont la matrice de gain est variable. A chaque pas de calcul, le filtre de Kalman prédit les nouvelles valeurs des variables d'état de la machine asynchrone (courant statorique, flux rotorique et vitesse). Cette prédiction est effectuée soit en minimisant les effets de bruit et les erreurs de modélisation des paramètres ou des variables d'état soit par un algorithme génétique [25]. Les bruits sont supposés blancs, Gaussiens et non corrélés avec les états estimés.

IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine

- **Estimation de la vitesse à partir des saillances de la machine**

Généralement, les machines à induction sont théoriquement conçues symétriques et ne doivent pas comporter de saillances. Donc la machine présente des saillances à cause des imprécisions de construction (comme l'excentricité), de l'existence des encoches rotoriques et du phénomène de saturation. Les saillances présentes dans une machine introduisent une variation spatiale des paramètres (résistance ou inductance), et permettent au courant ou à la tension de contenir des informations sur la position de ces saillances et par conséquent la position du rotor, donc une information sur la vitesse [24], [26]. On peut dénombrer diverses techniques pour l'estimation de la vitesse utilisant cette donnée physique de la machine liée à la présence de saillances. L'insensibilité vis-à-vis des paramètres de la machine constitue l'un des grands avantages pour ces techniques en contrepartie de l'exigence de moyens performants en termes de traitement du signal. Le défi reste donc dans la réalisation de l'estimation en temps réel, spécialement pour les commandes bouclées.

- **Estimation basée sur l'intelligence artificielle**

Les algorithmes génétiques, la logique floue et les réseaux neurones sont tous des techniques de calcul numérique à base d'intelligence artificielle, qui est populaire dans le domaine de l'informatique. Mais, de plus en plus, des applications à base de ces nouvelles approches de calcul numérique se développent pour des applications pratiques dans les domaines de la science et de l'ingénierie [25]. Les observateurs ou bien les estimateurs basés sur les techniques de l'intelligence artificielle amènent une meilleure dynamique, une

meilleure précision et ils sont plus robustes [18], [17], [25]. Leurs robustesses sont très bonnes même pour des variations importantes des paramètres de la machine. Néanmoins, le besoin de la connaissance parfaite du système à régler ou à estimer et le manque de l'expertise sur système limitent les applications actuelles à une gamme bien spécifique.

IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA avec modèle de la machine

IV.3.1. La méthode du MRAS

Le principe d'estimation par cette méthode repose sur la comparaison des grandeurs obtenues de deux façons différentes, d'un côté par un calcul ne dépendant pas explicitement de la vitesse (modèle de référence) et d'autre coté par un calcul dépendant explicitement de la vitesse (modèle adaptatif). Cette méthode développée par Schauder [19], [20], [26] est connue sous le nom d'origine anglo-saxonne *Model Reference Adaptive System* (MRAS).

Pour l'estimation de la vitesse, il propose la comparaison de l'estimation du flux commun obtenu avec les équations statoriques (indépendantes explicitement de la vitesse) et d'autre part avec les équations rotoriques (dépendantes explicitement de la vitesse).

L'objectif est de trouver le paramètre vitesse du modèle adaptatif afin d'assurer les résultats des deux estimations de flux rotorique identiques. Ainsi la valeur de la vitesse estimée devient celle de la vitesse réelle. Le fonctionnement adéquat de l'estimation est assuré par un choix judicieux de la fonction d'adaptation pour faire converger le modèle adaptatif vers le modèle de référence à partir du critère de Popov [29]. Le schéma de cette méthode est résumé dans la figure (IV-1). Cette méthode a un inconvénient, elle utilise que des grandeurs observées de flux pour reconstruire la valeur de la vitesse. C'est pour cela qu'on préfère appliquer une autre approche proposée par Yang [27],[21] qui considère les mesures des courants et les flux estimés comme grandeurs de sortie du modèle de référence (machine asynchrone réelle). Ce choix permet une meilleure précision étant donné que le modèle doit converger vers les grandeurs de sortie de la machine réelle.

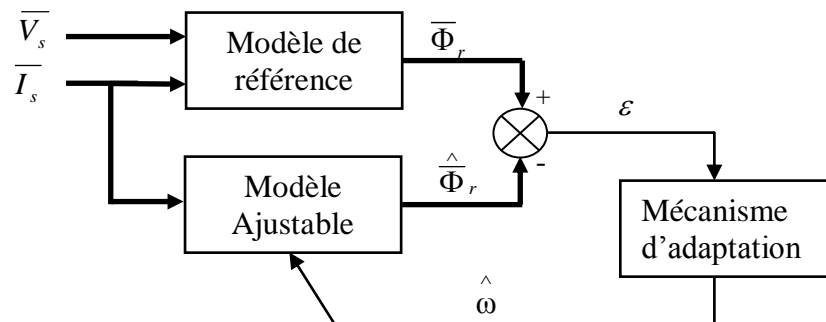


Fig. IV-1 : Schéma de principe de l'estimateur de MRAS

➤ **Application à l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone**

L'exploitation de cette méthode pour l'estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage a été développée par SCHAUDER dans [23] et [10]. Dans son travail, il propose pour l'estimation de la vitesse le choix de deux modèles pour construire le flux rotorique :

- **Modèle de référence** : qui ne dépend pas explicitement de la vitesse et qui est construit à partir des équations statoriques de la machine.

$$\frac{d \bar{\Phi}_{dr}}{dt} = \frac{L_r}{M} (\bar{V}_{ds} - R_s \bar{i}_{ds} - \sigma L_s \frac{d i_{ds}}{dt}) \quad (IV.1)$$

$$\frac{d \bar{\Phi}_{qr}}{dt} = \frac{L_r}{M} (\bar{V}_{qs} - R_s \bar{i}_{qs} - \sigma L_s \frac{d i_{qs}}{dt}) \quad (IV.2)$$

- **Modèle adaptatif** : qui dépend explicitement de la vitesse et il sera construit à partir des équations rotoriques de la machine.

$$\frac{d \hat{\Phi}_{dr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \hat{\Phi}_{dr} - \hat{\omega} \hat{\Phi}_{qr} + \frac{M}{T_r} \bar{i}_{ds} \quad (IV.3)$$

$$\frac{d \hat{\Phi}_{qr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \hat{\Phi}_{qr} + \hat{\omega} \hat{\Phi}_{dr} + \frac{M}{T_r} \bar{i}_{qs} \quad (IV.4)$$

Les grandeurs d'entrée sont les deux tensions (V_{sd} , V_{sq}), les deux grandeurs de mesure sont les deux courants (i_{sd} , i_{sq}), la fonction d'erreur choisie est ε (le choix d'une telle fonction d'erreur va lui permettre de vérifier la deuxième condition d'hyper stabilité de POPOV) et le mécanisme d'optimisation est un simple correcteur PI.

IV.4. Application du MRAS à l'estimation des grandeurs mécaniques de la MADA

Dans le cas de la MADA, nous optons pour l'estimation de la position du rotor à partir de deux modèles de flux rotorique, une conséquence de la loi de commande adoptée et basée sur l'orientation de ce flux. Par dérivation de la position estimée nous en déduisons la vitesse de rotation du rotor.

Les équations du modèle de référence et du modèle adaptatif choisis, [GHO], sont données par :

- **Modèle de référence**

$$\frac{d \bar{\Phi}_{dr}}{dt} = \frac{L_r}{M} (\bar{V}_{ds} - R_s \bar{i}_{ds} - \sigma L_s \frac{d i_{ds}}{dt}) \quad (IV.5)$$

$$\frac{d \bar{\Phi}_{qr}}{dt} = \frac{L_r}{M} (\bar{V}_{qs} - R_s \bar{i}_{qs} - \sigma L_s \frac{d i_{qs}}{dt}) \quad (IV.6)$$

• **Modèle adaptatif**

$$\frac{d \hat{\Phi}_{dr}}{dt} = V_{dr} - \frac{1}{T_r} \hat{\Phi}_{dr} - \hat{\omega} \hat{\Phi}_{qr} + \frac{M}{T_r} \bar{i}_{ds} \tag{IV.7}$$

$$\frac{d \hat{\Phi}_{qr}}{dt} = \bar{V}_{qr} - \frac{1}{T_r} \hat{\Phi}_{qr} + \hat{\omega} \hat{\Phi}_{dr} + \frac{M}{T_r} \bar{i}_{qs} \tag{IV.8}$$

L'erreur entre les deux modèles, fonction à minimiser, est donnée par :

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\Phi}_r - \hat{\Phi}_r \tag{IV.9}$$

La loi d'adaptation présente une intégration en boucle ouverte (problème d'offset). Pour l'amélioration de la réponse d'estimation un filtre passe bas à été proposé par des nombreux auteurs

$$\hat{\omega} = K_p \left(\varepsilon_\alpha \hat{\phi}_{r\beta} - \varepsilon_\beta \hat{\phi}_{r\alpha} \right) + K_i \int \left(\varepsilon_\alpha \hat{\phi}_{r\beta} - \varepsilon_\beta \hat{\phi}_{r\alpha} \right) dt \tag{IV.10}$$

Avec : K_p, K_i des constantes positives.

La structure de la commande sans capteur de vitesse de la machine asynchrone double alimentation par la méthode d'estimation de la vitesse selon le principe MRAS est montrée dans la figure (IV-2).

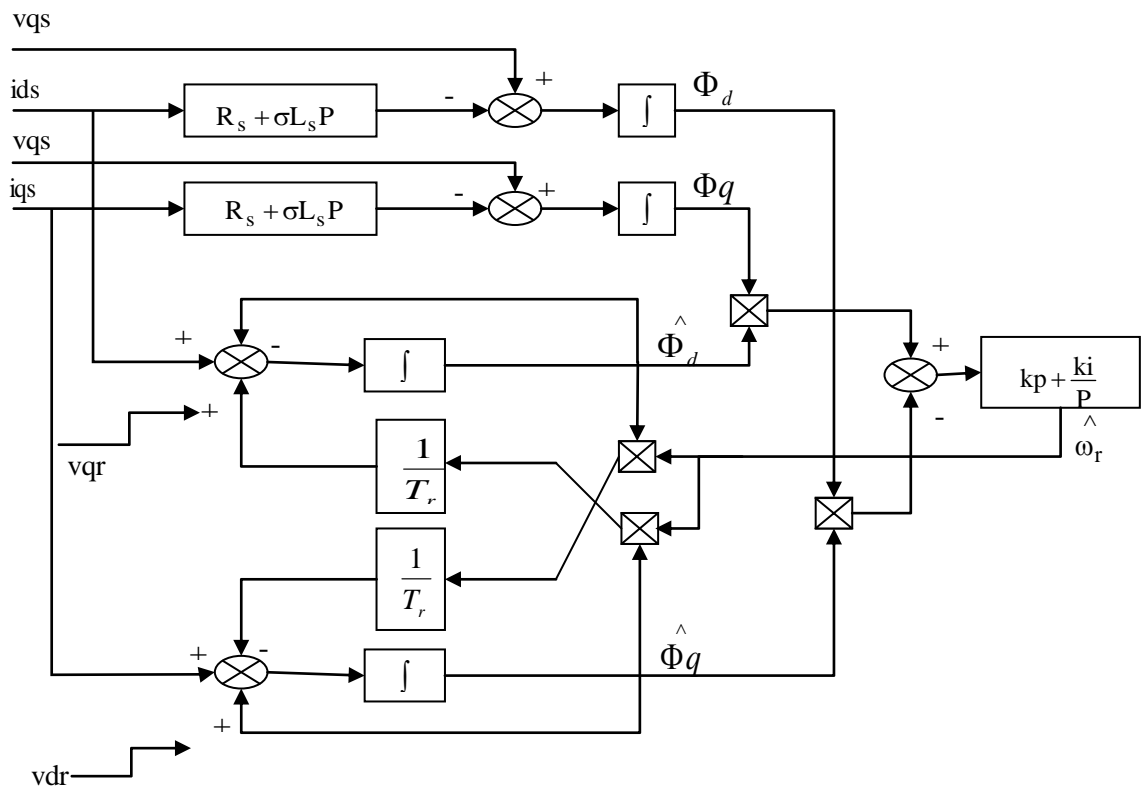


Fig. IV-2 : Schéma de Principe d'un observateur MRAS

IV 5. Schéma global de la commande vectorielle de MADA sans capteurs

Le schéma global de la commande de MADA sans capteurs mécaniques est représenté sur la figure 4.3.

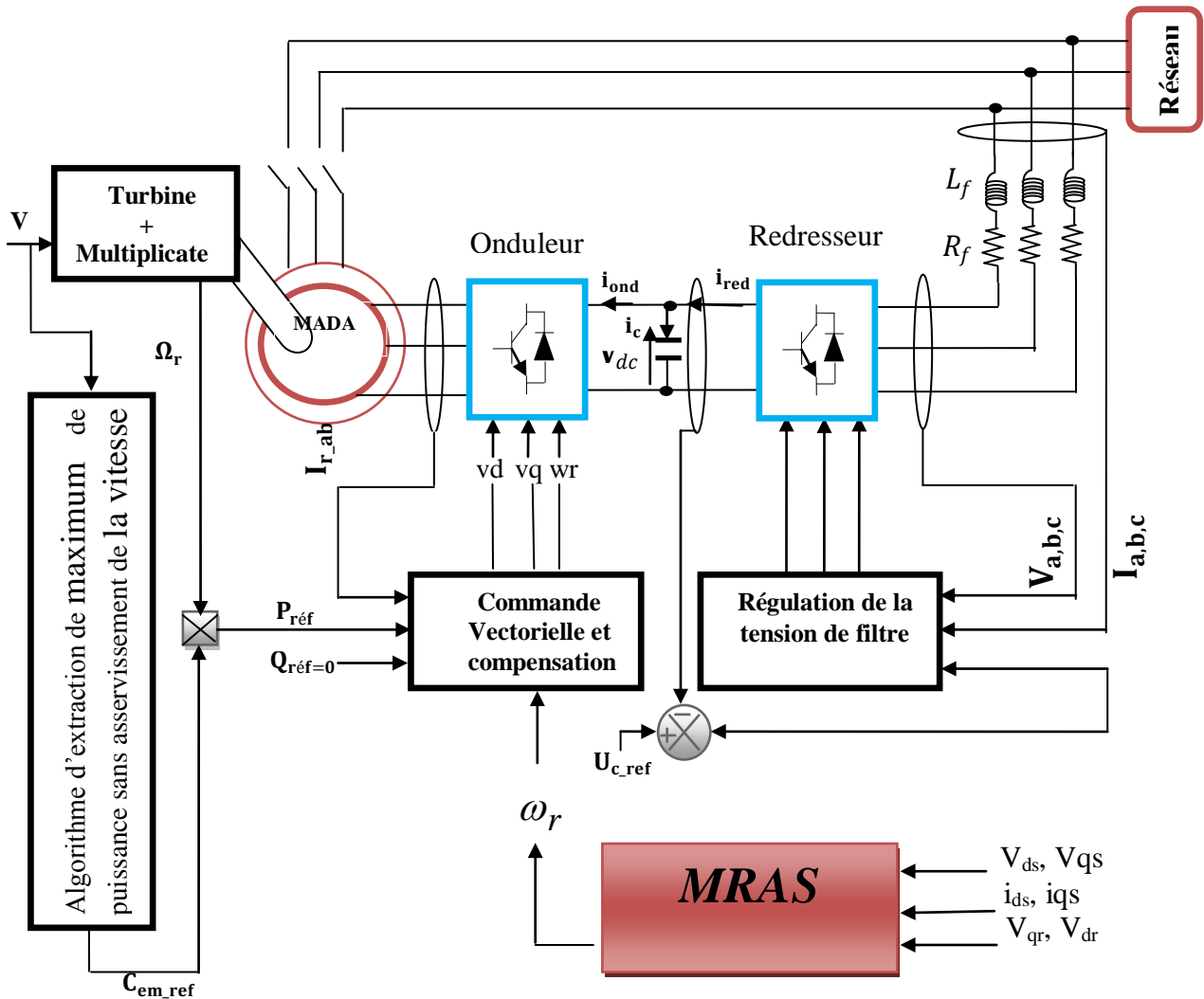


Fig. IV-3 : structure de la chaîne globale

IV.6. Résultats de simulation

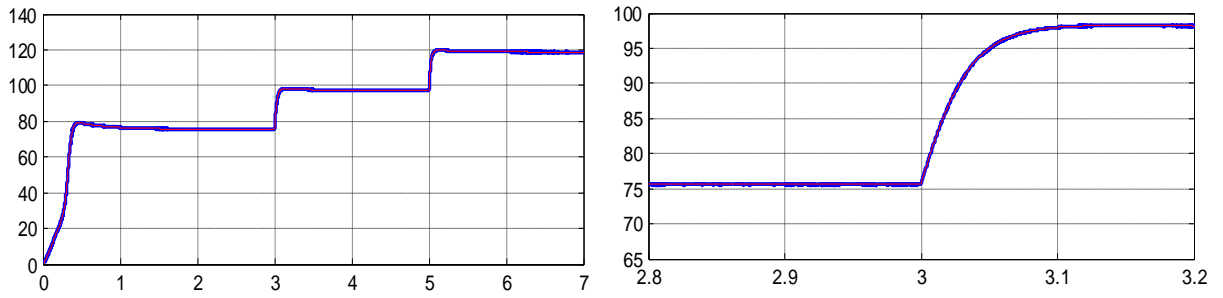


Fig. IV-4 : La vitesse rotorique estimée par MRAS avec Zoom

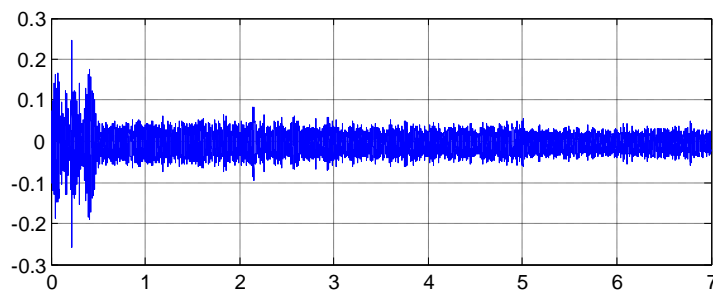


Fig. IV-5 : erreur de vitesse estimée

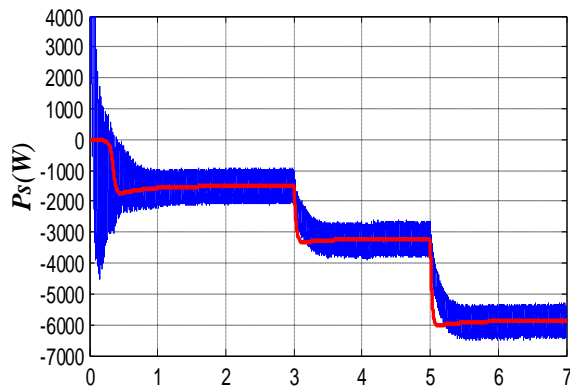


Fig. IV-6 : Puissance active statorique et sa référence

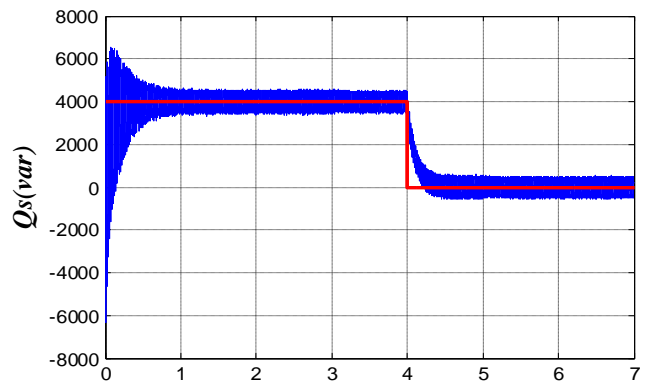


Fig. IV-7 : Puissance réactive statorique et sa référence

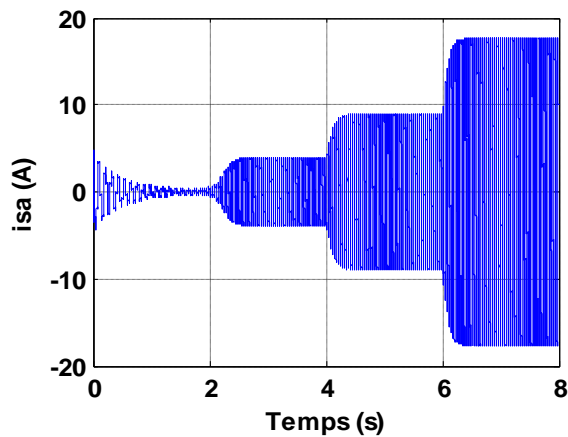


Fig. IV-8 : Courant d'une phase statorique

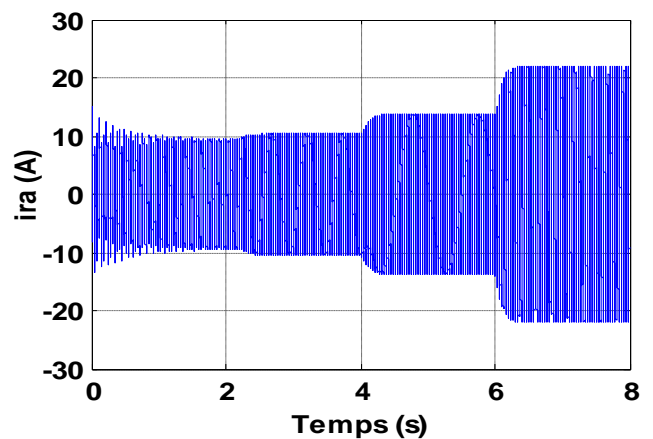


Fig. IV-9 : Courant d'une phase rotorique

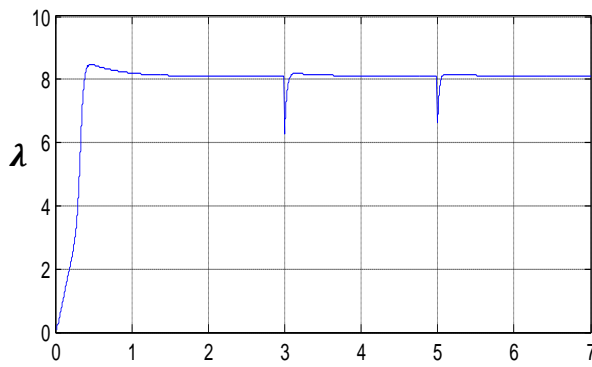


Fig. IV-10 : Coefficient de puissance de la turbine

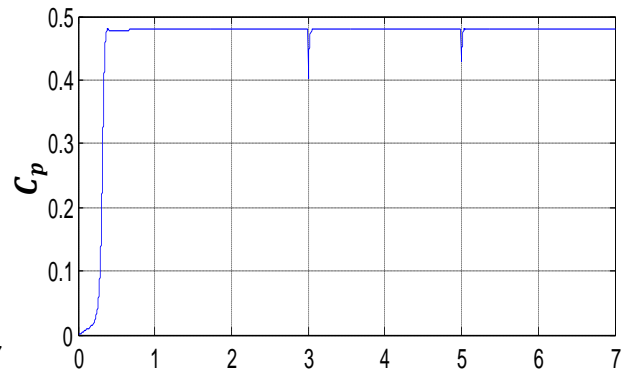


Fig. IV-11 : Vitesse relative de l'éolienne

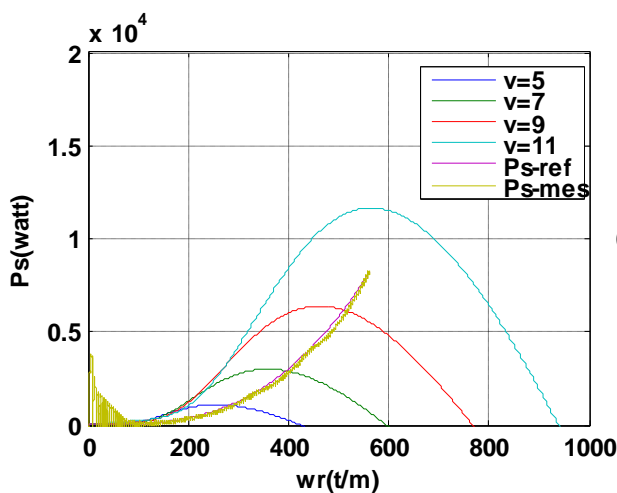
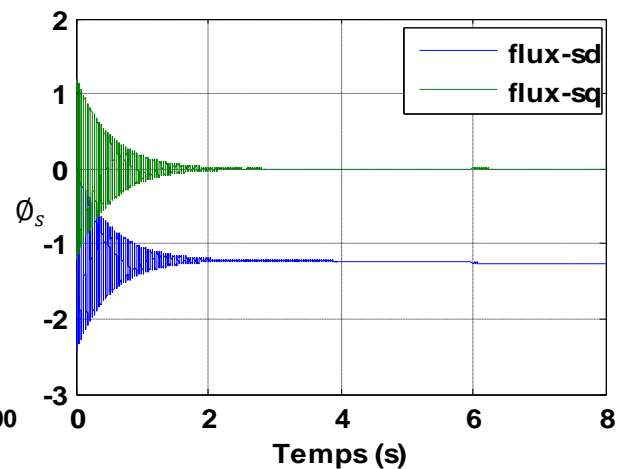
Fig. IV-12 : Caractéristique de l'éolienne dans
Le plan de puissance, vitesse
rotation

Fig. IV-13 : Flux statorique de la MADA

IV.7. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation permettent d'observer l'évolution de différentes grandeurs qui interviennent dans cet algorithme, où on distingue les remarques suivantes. - il est clair que la vitesse estimée suit fidèlement celles de la vitesse réelle dans différentes valeurs de vent. -Le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs et le coefficient de puissance est obtenu pour différents angles de calage qui nous donne leurs valeurs de références optimales ($\lambda = 8.1$), les coefficients de puissance C_p restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales. - les variations du coefficient de puissance (C_p) correspondent aux changements de la réponse de l'angle de calage qui varie la vitesse de la turbine à la valeur optimale.

L'allure des composantes du flux statorique montre une bonne orientation du flux garantissant une commande vectorielle bien découplée de la DFIG. La puissance éolienne capturée suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil de vent appliqué,

cette allure est conforme aussi par la trajectoire de puissance maximale. Cette méthode de contrôle permet de se rapprocher rapidement de la MPPT à l'aide de l'estimation de la vitesse de rotation w , c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse et réduit considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale.

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la méthode d'estimation de la vitesse par MRAS. Ensuite, les principes des observateurs d'états ont été traités, d'abord avec l'observateur de type MRAS.

Ces techniques sont exploitées dans une commande vectorielle sans capteur de vitesse. Les résultats de la simulation obtenus pour l'estimation de la vitesse sont satisfaisants de point de vue erreur d'estimation, robustesse et stabilité du système d'entraînement global. Concernant le fonctionnement à bases vitesses, ces résultats ont montré que la caractéristique de la vitesse estimée par la MRAS est satisfaisante et montre une bonne réponse dynamique.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne de petite puissance. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande avec et son capteur qui devait assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne. A travers cette étude, nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

Le travail effectué et les performances et robustesse de la commande son capteur avec la commande vectorielle indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation permet d'avoir un découplage et un contrôle indépendant de la puissance active et réactive. Premièrement, la régulation est faite avec des régulateurs PI. Deuxièmement, la commande est à base de MRAS. L'architecture du command son capteur. Elle nous a permis d'une part, d'améliorer les performances dynamiques et statiques de la MADA et d'autre part, d'assurer une robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables en utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.

Annexe

Annexe(A)

machine à induction double alimentée :

| Paramètre | Valeur numérique |
|---------------------------|---------------------|
| Puissance nominale | 7.5KW |
| Résistance statorique | 0.474 (Ω) |
| Résistance rotorique | 0.7614 (Ω) |
| Inductance mutuelle | 0.107 (H) |
| Inductance statorique | 0.12 (H) |
| Inductance rotorique | 0.122 (H) |
| Nombre de paires de pôles | 2 |
| Tension du réseau utilisé | 220 V |
| Fréquence du réseau | 50 Hz |

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

| Paramètre | Valeur numérique |
|---------------------------|-------------------------|
| Nombre de pale | 3 |
| Diamètre d'une pale | 3 m |
| Gain du multiplicateur | 2 |
| Inertie de l'arbre | 0,5 Kg.m ² |
| Coefficient de frottement | 0.0024 <i>N.m.s/rad</i> |

Paramètres de la redresseur :

$r= 0.3 \Omega$, $l= 14e-3$ H , $c=2e-3$ F.

Annexe (B)

Calcul des paramètres du régulateur PI [37]

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (B.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

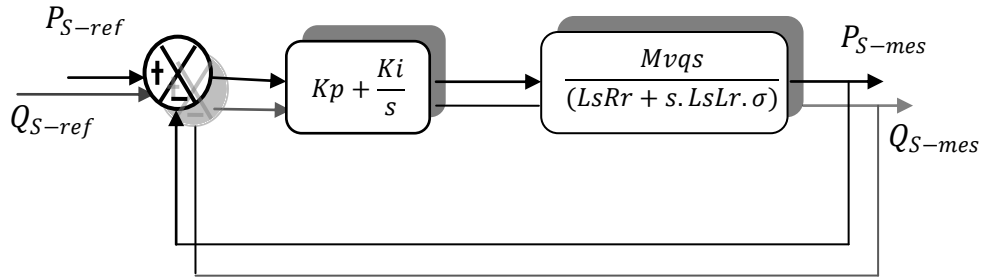


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

$$\text{Avec} \quad \sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}\right)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (B.1) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction F_{BO} suivante :

$$F_{BO} = \frac{K_P M v_{qs}}{L_s L_r \sigma \cdot s}$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_p M v_{qs}}$$

τ est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_p = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M v_{qs}}$$

$$K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M v_{qs}}$$

On applique la même méthode sur :

↳ Boucle des courants

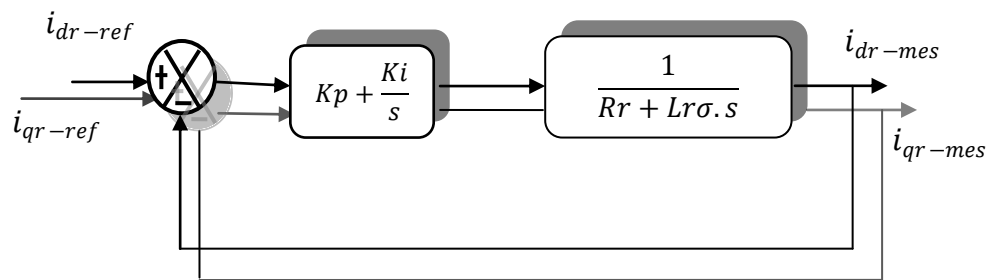


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique .

↳ Boucle de vitesse

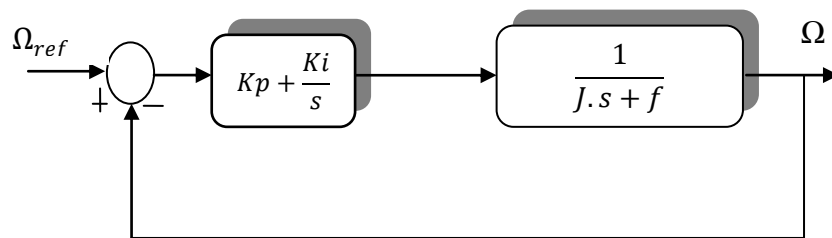


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

- Paramètres du régulateurs PI classique :

| <i>Régulateurs des puissances</i> | <i>Régulateurs des courants</i> |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| $K_p=710.64$ | $K_p=200$ |
| $K_i=8894.5$ | $K_i=50$ |

Référence Bibliographie

- [01]. Frédéric POITIERS, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [02]. N.Cherfia,"conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [03]. Bouaraki Mouloud, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamed bougara-boumerdes, 2012.
- [04]. M.A.HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012
- [05]. S.Metatla , " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada", thèse de Magister,Ecole nationale polytechnique d'alger 2009
- [06]. N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » . Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [07]. N. abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [08]. I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", thèse de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [09]. L.khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.

- [10]. F.poitier, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003
- [11]. 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: théorie et expérimentation," Thèse de doctorat en electrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [12]. Y. Elbia, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [13]. Paul-Etienne V, "Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation," Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut NationalPolytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [14]. A.Boyette., "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat del'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [15]. B.toual"Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à DoubleAlimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable" thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [16]. F.merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)"thèse de magister de l'Ecole Nationale polytechnique,2007
- [17]. B. Beltran, "contribution à la commande robuste des éolienne à base de génératrice Asynchrone Double alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode glissent D'ordre supérieur "thèse de Doctorat Université de bretagne Occidentale,2010
- [18]. A.S.Belfodhal, "modélisation et commande d'une chaine éolienne avec intégration des stockage Inertiel ",thèse de magister ,Ecole militaire polytechnique

- [19]. M.Bouaraki "Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF", thèse de magister de l'université M'hamedbougara, boumardas, 2011
- [20]. L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005
- [21]. CHERIF, "Modélisation de Générateur Asynchrone Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [22]. A.bouhedda, "contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "thème de magister d'université Mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2011
- [23]. F.Merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)", Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007
- [24]. A GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", thèse de doctorat de l'Ecole Henri Poincaré, 2010
- [25]. A BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", thèse de magister, université de constantine, 2009
- [26]. Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani "Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer" World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug 2011, Vol. 80, p 920
- [27]. J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [28]. S. EL AIMANI, "Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [29]. Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002

