République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Fares de Médéa

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique



Mémoire de Master

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Électrique

Option : **Énergie Renouvelable en Électrotechnique**

Thème

Deux charges électriques alimentées par un système de conversion d'énergie éolienne

---

Réalisé par :

CHERAIR Mahfoud

BOUCHENAF Nasreddine

Encadré par :

Dr. Medjber Ahmed

Dr. Skender Mohamed Redha

Année :2025

Remerciements

Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Électrique pour la qualité de l'enseignement dispensé durant notre cursus.

Nous remercions également nos familles pour leur soutien moral constant, leur patience et leur encouragement sans faille.

Enfin, nous adressons nos pensées à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs,* ***Dr. Medjber Ahmed*** *et* ***Dr. Skender Mohamed Reyadh****, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés, ainsi que leur accompagnement tout au long de ce travail.*

Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Électrique pour la qualité de l'enseignement dispensé durant notre cursus.

Nous remercions également nos familles pour leur soutien moral constant, leur patience et leur encouragement sans faille.

Enfin, nous adressons nos pensées à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

MCHERAIR Mahfoud et MBOUCHENAF Nasreddine.

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos chers parents,
en témoignage de notre reconnaissance profonde et de notre gratitude infinie.

À nos frères, sœurs, grands-parents et à toute notre famille
pour leur amour inconditionnel et leur soutien permanent.

À tous ceux qui, de près ou de loin,
nous ont apporté leur aide, leurs encouragements et leur bienveillance
tout au long de ce parcours.

À nos amis sincères, pour leur présence, leur écoute et leurs mots d'encouragement,
nous souhaitons réussite et épanouissement.

Merci à toutes les personnes qui ont partagé avec nous cette belle aventure.

MCHERAIR Mahfoud et MBOUCHENAF Nasreddine

ملخص

تعد الطاقة الريحية من أبرز مصادر الطاقة المتجددة الواعدة على مستوى العالم، ويركز هذا العمل على نمذجة وتغذية الآلة الكهربائية في طاقة ريحية ترتكز على آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة. يتمحور هذا العمل على تحسين إنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام إستراتيجية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (ش‌ص‌ص‌ة)، وعلى دراسة تأثير تغيرات الحمولات في استغلال الطاقة القصوى، كما تهدف هذه الدراسة إلى تعزيز مرونة الأنظمة ذات السرعة المتغيرة، والمساهمة في تطوير وسائل تحكم مستدامة ومتقدمة. تم تنفيذ الدراسة من خلال نمذجة رياضية مفصلة وتحاليل محاكاة، تبرز أهمية استخدام إستراتيجيات التحكم المتجه والتحكم المباشر في العزم من أجل تعزيز أداء النظام. كما تقترح الدراسة إمكانيات تحسين أداء الأنظمة المرتكزة على المولدات ذات السرعة المتغيرة و مساهمة التغذية الثنائية في تطوير نظم طاقوية مستدامة.

الكلمات المفتاحية: **الطاقة الريحية ـ آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية ـ التحكم المتجه ـ التحكم المباشر في العزم ـ ش‌ص‌ص‌ة ـ المحاكاة.**

Résumé

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses dans le monde. Ce travail porte sur la modélisation, l'alimentation et la commande d'un système éolien d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation. L'accent est mis sur l'optimisation de la production électrique via une stratégie de suivi du point de puissance maximale (MPPT), et sur l'impact de la variation de la charge sur les stratégies d'exploitation optimale. Cette recherche vise à améliorer la flexibilité des systèmes éoliens à vitesse variable et à contribuer au développement de techniques de commande avancées et durables. L'étude repose sur une modélisation mathématique rigoureuse et des simulations permettant d'analyser la performance du système. L'utilisation de la commande vectorielle et de la commande directe du couple est mise en valeur pour l'amélioration des performances du système. Enfin, des pistes d'amélioration des systèmes à vitesse variable et de la production d'énergie durable sont proposées.

Mots clés : Énergie éolienne – Machine asynchrone à double alimentation – Commande vectorielle – Contrôle direct du couple – MPPT – Simulation.

Abstract

Wind energy is one of the most promising renewable energy sources worldwide. This work focuses on the modeling, feeding, and control of a wind turbine based on a doubly-fed induction machine. Emphasis is placed on improving electrical energy production through a maximum power point tracking strategy (MPPT) and studying the influence of variable loads with performance simulations. This study also includes improving the flexibility of variable-speed wind systems and promoting the development of advanced and sustainable control methods. The use of vector control and direct torque control strategies is highlighted to enhance system performance. Finally, improvement perspectives of variable-speed systems and the promotion of doubly-fed induction machines for sustainable energy development are presented.

Keywords: Wind energy – Doubly-Fed Induction Machine – Vector Control – Direct Torque Control – MPPT – Simulation.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

I Généralités sur l'énergie éolienne ***3***

I.1 Introduction . . . 3

I.2 Généralités sur l'énergie éolienne . . . 4

I.3 Principe de fonctionnement d'une chaîne éolienne . . . 4

I.3.1 L'aérogénérateur . . . 5

I.3.2 Types d'aérogénérateurs . . . 5

I.3.3 Éolienne à axe horizontal . . . 5

I.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne . . . 8

I.3.5 Principales composantes d'éolienne . . . 9

I.4 La machine à double alimentation . . . 10

I.4.1 Classification des machines à double alimentation . . . 11

I.5 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens . . . 11

I.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS) . . . 11

I.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone : . . . 12

I.5.3 Machines asynchrones à double stator : . . . 13

I.5.4 Machine asynchrone à double alimentation : . . . 14

I.5.5 Modes de fonctionnement de la MADA . . . 15

I.6 Conclusion . . . 16

II Modélisation de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation ***17***

II.1 Introduction . . . 17

II.2 l'énergie éolienne . . . 18

II.3 Intérêt de l'éolienne à vitesse variable . . . 18

II.4 Puissance aérodynamique captée par l'éolienne et coefficient de puissance . . . 19
II.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne . . . 21
II.5.1 La vitesse du vent continument variable . . . 23
II.6 Modélisation de la turbine éolienne . . . 25
II.6.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique . . . 25
II.6.2 Modélisation de la vitesse du vent . . . 26
II.6.3 Profil de vent et modélisation de la turbine éolienne . . . 27
II.6.4 Présentation de la machine asynchrone triphasée . . . 30
II.6.5 Modélisation de la MADA . . . 31
II.7 Résultats de simulation . . . 37
II.7.1 Fonctionnement moteur à vide . . . 37
II.7.2 Fonctionnement moteur en charge . . . 38
II.7.3 Fonctionnement génératrice . . . 41
II.8 Interprétations des résultats de simulation . . . 42
II.9 Conclusion . . . 42

III Alimentation et commande vectorielle du générateur éolien 43
III.1 Introduction . . . 43
III.1.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique . . . 43
III.1.2 Commande vectorielle de la machine . . . 44
III.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance . . . 51
III.2.1 Contrôle de la vitesse . . . 51
III.2.2 Optimisation électronique de la conversion énergétique . . . 53
III.2.3 Résultats de la simulation . . . 53
III.2.4 Interprétation des résultats . . . 55
III.2.5 Contrôle direct et indirect de puissance . . . 55
III.2.6 Contrôle direct de puissance . . . 57
III.2.7 Contrôle indirect de puissance . . . 59
III.3 Conclusion . . . 63

IV Alimentation de deux charges électriques de 4 kW et 8 kW par une chaîne de production d'énergie éolienne. 65
IV.1 Introduction . . . 65
IV.2 Présentation du système global avec gestion . . . 66
IV.2.1 Principe de fonctionnement . . . 66

IV.3 Algorithme de gestion d'énergie appliqué à notre système 67
IV.4 Techniques d'extraction du point de puissance maximale 67
IV.4.1 Stratégie de maximisation de puissance sans asservissement de la vitesse 68
IV.4.2 Stratégie de maximisation de puissance avec asservissement de vitesse (BO) 69
IV.4.3 Résultats de la simulation pour la poursuite du point de la puissance à l'aide des trois contrôleurs 69
IV.4.4 Système de stockage d'énergie 71
IV.4.5 Commande de puissance et de la vitesse mécanique de la MADA par régulateur flou 72
IV.4.6 Simulation et interprétation des résultats 74
IV.4.7 Conclusion 79

Conclusion générale ***80***

Bibliographie ***81***

Table des figures

I.1 *Schéma simplifié de la chaîne de conversion d'une turbine éolienne.* 4
I.2 *Eolienne à axe horizontal* 6
I.3 *Éolienne à axe vertical de type Darrieus.* 7
I.4 *Éolienne à axe vertical de type Savonius.* 8
I.5 *Illustration des composants des éoliennes [1].* 9
I.6 *Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage avec vitesse de rotation fixe [2].* 12
I.7 *Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage avec fréquence variable [2].* 12
I.8 *Machine synchrone reliée au réseau par une interface d'électronique de puissance [3].* 13
I.9 *Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [1].* 14
I.10 *Chaîne de conversion à base d'une GADA [1].* 15
I.11 *Fonctionnement de la MADA en mode moteur* 16
I.12 *Fonctionnement de la MADA en mode générateur* 16

II.1 *Caractéristique (puissance - vitesse mécanique).* 19
II.2 *Démonstration de la loi de Betz* 20
II.3 *Coefficient de puissance C_p en fonction de (a) la vitesse mécanique et (b) du temps* 21
II.4 *Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.* 22
II.5 *Variation de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent.* 25
II.6 *Modèle mécanique simplifié de la turbine.* 26
II.7 *Profils de vent appliqués au système* 27
II.8 *Variation du coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β pour une éolienne de 1,5 MW* 28
II.9 *Schéma bloc du modèle de la turbine.* 30

II.10 Rotor à cage d'écureuil . . . 31
II.11 Constitution du rotor bobiné . . . 31
II.12 Fonctionnement moteur à vide (Cr= 0). . . . 32
II.13 Fonctionnement moteur à vide (Cr= 0). . . . 39
II.14 Fonctionnement moteur en charge (Cr= 75 Nm). . . . 40
II.15 Fonctionnement génératrice. . . . 41

III.1 Principe du pilotage découplé du couple d'une MCC [4]. . . . 44
III.2 Représentation de la MADA et de son système d'alimentation au rotor. . . . 47
III.3 Convertisseur AC–DC triphasé à commutation forcée. . . . 48
III.4 Schéma de principe de l'onduleur triphasé. . . . 50
III.5 La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1,5 MW [5]. 52
III.6 Schéma bloc simplifié de la boucle de vitesse munie d'un correcteur PI. . . . 52
III.7 Représentation schématique de la commande par le rotor de la MADA d'un système éolien. . . . 54
III.8 Résultats de la commande vectorielle de la MADA. . . . 55
III.9 Schéma bloc de la MADA. . . . 57
III.10 Schéma bloc de la commande directe . . . 58
III.11 Résultats de la commande directe . . . 59
III.12 Schéma bloc de la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas) . . . 60
III.13 Résultats de la commande indirecte sans boucle de puissance . . . 61
III.14 Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance . . . 62
III.15 Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance . . . 63

IV.1 Architecture d'un système proposé à bus AC . . . 66
IV.2 Algorithme de la gestion d'énergie étudié. . . . 67
IV.3 Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse. . . . 68
IV.4 Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse. . . . 69
IV.5 Comparaison des stratégies en boucle ouverte et boucle fermée. . . . 70
IV.7 Schéma bloc d'une batterie. . . . 71
IV.8 Comportement de la batterie lors de la charge. . . . 72
IV.9 Comportement de la batterie lors de la décharge. . . . 72
IV.10 Schéma global du régulateur flou. . . . 73

IV.11Fonctions d'appartenance d'entrée pour le régulateur flou. 73
IV.12Fonction d'appartenance de la commande de P et Ω_{mec}. 74
IV.14Résultats de simulation pour une charge de 8 kW 76
IV.16Résultats de simulation pour une charge de 4 kW 78

Liste des tableaux

IV.1 Règles floues du régulateur Mamdani. 74

Liste des abréviations

$\vec{V_S}$	*Tension statorique (vecteur)*
$\vec{V_r}$	*Tension rotorique (vecteur)*
$\vec{I_S}$	*Courant statorique (vecteur)*
$\vec{I_r}$	*Courant rotorique (vecteur)*
R_s	*Résistance statorique*
R_r	*Résistance rotorique*
L_s	*Inductance propre statorique*
L_r	*Inductance propre rotorique*
M_s	*Inductance mutuelle entre phases statoriques*
M_r	*Inductance mutuelle entre phases rotoriques*
M_{sr}	*Inductance mutuelle entre stator et rotor*
$\vec{\Phi}_S$	*Flux statorique (vecteur)*
$\vec{\Phi}_r$	*Flux rotorique (vecteur)*
C_{em}	*Couple électromagnétique*
C_r	*Couple résistant*
J	*Moment d'inertie*
f_r	*Coefficient de frottement visqueux*
ω	*Vitesse de rotation mécanique*
ω_s	*Vitesse angulaire de référence statorique*
ω_r	*Vitesse angulaire du rotor*
θ	*Angle électrique entre le stator et le rotor*
P_s	*Puissance active statorique*
P_r	*Puissance active rotorique*
Q_s	*Puissance réactive statorique*
Q_r	*Puissance réactive rotorique*
$\mathbf{P}(\theta)$	*Matrice de transformation de Park*
HAWT	*Horizontal Axis Wind Turbine : Éolienne à axe horizontal*

MADA	*Machine Asynchrone à Double Alimentation*
MPPT	*Maximum Power Point Tracking (Suivi du Point de Puissance Maximale)*
SCEE	*Système de Conversion d'Énergie Éolienne*
PMSG	*Permanent Magnet Synchronous Generator*
MSAP	*Machine Synchrone à Aimants Permanents*
PI	*Proportionnel-Intégral (correcteur)*
PWM	*Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)*
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée)*
RCC	*Régulation du Courant de Commande*
TSR	*Tip Speed Ratio (Rapport de vitesse des pointes de pales)*
DC	*Courant continu (Direct Current)*
AC	*Courant alternatif (Alternating Current)*
HIL	*Hardware-In-the-Loop*
MAS	*Machine Asynchrone*
MPPT	*Maximum Power Point Tracking (Suivi du Point de Puissance Maximale)*
GTO	*Gate Turn-Off Thyristor (Thyristor à extinction commandée)*
MOSFET	*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*
MCC	*Machine à Courant Continu*

Introduction générale

L'énergie éolienne représente aujourd'hui l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses et les plus exploitées dans le monde. Face aux enjeux environnementaux, économiques et énergétiques, le recours à des énergies propres et durables s'avère indispensable pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et diversifier le mix énergétique. L'énergie éolienne, qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique grâce à des aérogénérateurs, s'inscrit pleinement dans cette dynamique de transition énergétique.

Depuis plusieurs décennies, les technologies éoliennes ont connu un développement significatif, tant au niveau des machines électriques que des systèmes de commande et de conversion d'énergie. La maîtrise des performances des aérogénérateurs et l'amélioration de leur rendement énergétique passent par la modélisation précise des machines, ainsi que par l'optimisation des stratégies de commande.

Parmi les différentes technologies de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) occupe une place privilégiée grâce à ses avantages en termes de souplesse de fonctionnement, de contrôle de puissance et de robustesse. Cette machine permet notamment d'exploiter efficacement les variations de la vitesse du vent tout en assurant une qualité de l'énergie produite.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la modélisation, l'alimentation et la commande vectorielle d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Nous nous intéressons particulièrement à l'optimisation de la production électrique à travers le contrôle direct du couple et des stratégies de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Par ailleurs, une attention particulière sera portée à l'alimentation de charges électriques variées par la chaîne éolienne, ainsi qu'à la gestion énergétique associée.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente les généralités sur l'énergie éolienne, son historique, les différents types d'éoliennes ainsi que les machines électriques couramment utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation détaillée de la machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un aérogénérateur.

Le troisième chapitre abordé de l'alimentation et de la commande vectorielle du générateur éolien, en mettant l'accent sur les méthodes de commande avancées et la gestion optimale de la puissance.

Enfin, le quatrième chapitre présente une étude appliquée de l'alimentation de charges électriques par une chaîne de production éolienne, illustrée par des simulations numériques et une analyse des performances.

En conclusion, ce travail contribue ainsi à l'amélioration des systèmes éoliens à vitesse variable et à la valorisation des machines asynchrones à double alimentation, dans un contexte où la production d'énergie renouvelable joue un rôle majeur pour un développement énergétique durable.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction

L'objectif fondamental des systèmes éoliens est de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Source d'énergie propre, renouvelable et économiquement compétitive, l'éolien suscite un intérêt croissant et pousse les industriels à développer des solutions toujours plus robustes, efficaces et flexibles.

Dans cette optique, ce premier chapitre débute par un état de l'art sur l'exploitation de l'énergie éolienne dans le domaine du génie électrique, en retraçant son évolution historique et en mettant en lumière la croissance rapide de son utilisation dans le mix énergétique mondial. Les différentes typologies d'éoliennes, classées selon l'orientation de l'axe de rotation et leur position par rapport au vent, seront présentées.

Par la suite, nous introduirons la loi aérodynamique de Betz, qui fixe la limite théorique de l'énergie pouvant être extraite du vent, ainsi que les notions de coefficient de puissance et de rapport de vitesse. Les principales stratégies de régulation de puissance, telles que le Pitch Control et le Stall Control, seront également abordées. L'intérêt du fonctionnement à vitesse variable y sera justifié.

Enfin, ce chapitre se poursuivra par la modélisation des principaux composants de la chaîne de conversion étudiée : la turbine éolienne, l'arbre de transmission, le multiplicateur, ainsi que la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Nous conclurons par une présentation des principes de fonctionnement de la MADA, aussi bien en mode moteur qu'en mode génératrice.

I.2 Généralités sur l'énergie éolienne

Le vent est une force naturelle utilisée par l'humanité depuis l'Antiquité, bien avant que ses mécanismes physiques soient formalisés. Les voiliers, moulins à vent, girouettes ou encore cerfs-volants témoignent d'une exploitation ancienne de cette énergie, antérieure à toute formalisation scientifique moderne comme les équations de Navier-Stokes ou la simulation numérique.

Le vent constitue une source d'énergie propre, renouvelable quasi-instantanément et inépuisable à l'échelle humaine. Il trouve son origine dans le rayonnement solaire : celui-ci chauffe inégalement la surface terrestre, créant des différences de température entre régions. Ces écarts provoquent des mouvements de masse d'air : l'air chaud s'élève, l'air froid descend, générant ainsi des flux d'air que nous appelons vent [6].

I.3 Principe de fonctionnement d'une chaîne éolienne

Un aérogénérateur, communément appelé éolienne, est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'intermédiaire de pales fixées à un rotor. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique par une génératrice, généralement via un arbre de transmission et un système multiplicateur. La Figure I.1 illustre le principe général de fonctionnement d'une chaîne éolienne.

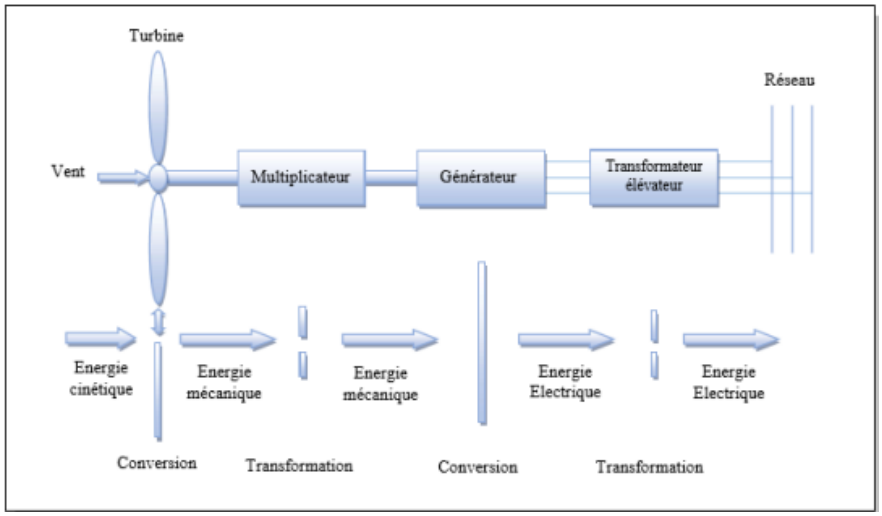


FIGURE I.1 – Schéma simplifié de la chaîne de conversion d'une turbine éolienne.

I.3.1 L'aérogénérateur

*Un **aérogénérateur**, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif permettant de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau d'un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice.*

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont classées en trois catégories [7] :

- ***Éoliennes de petite puissance** : inférieure à 40 kW .*
- ***Éoliennes de moyenne puissance** : comprises entre 40 kW et quelques centaines de kW .*
- ***Éoliennes de forte puissance** : supérieures à 1 MW.*

I.3.2 Types d'aérogénérateurs

En fonction de leur usage et de la technologie employée, certaines parties des aérogénérateurs peuvent être plus ou moins développées. On distingue généralement deux grandes familles d'éoliennes [7] :

- ***Éoliennes autonomes** .*
- ***Éoliennes raccordées au réseau**.*

Cette classification influe directement sur la configuration de la chaîne de conversion, notamment sur l'intégration éventuelle d'un dispositif de stockage de l'énergie. Ce stockage peut se faire à l'aide de batteries, de volants d'inertie ou d'autres moyens.

Sur le plan de la conception mécanique, on distingue également deux grandes architectures :

- ***Éoliennes à axe horizontal**.*
- ***Éoliennes à axe vertical**.*

I.3.3 Éolienne à axe horizontal

*Les éoliennes à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) sont les descendantes directes des moulins à vent. Deux principales configurations sont recensées : les éoliennes **« amont »** (rotor placé face au vent) et les éoliennes **« aval »** (rotor situé à l'arrière de la tour, dans le sillage).*

Chaque configuration présente ses avantages et ses inconvénients :

- ***Éolienne aval** : son principal intérêt réside dans sa capacité à s'orienter naturellement en lacet, grâce à l'effet gouvernail créé par les pales inclinées vers l'arrière qui forment un cône en rotation. Toutefois, la tour perturbe l'écoulement de l'air (effet*

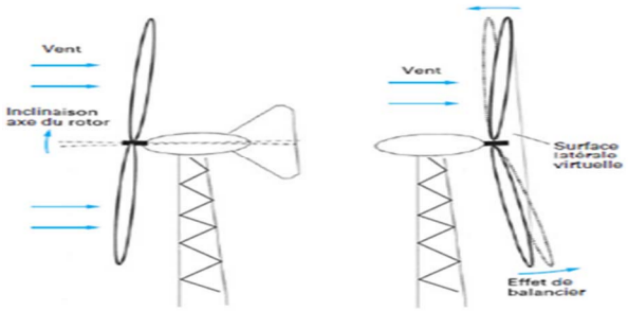


FIGURE I.2 – Eolienne à axe horizontal

de masque), ce qui engendre des efforts cycliques sur les pales lors de leur passage dans le sillage. Ces efforts sont sources de vibrations et de fatigue mécanique. Pour y remédier, il est nécessaire d'adapter l'attache des pales afin que le rotor puisse se comporter comme un balancier et amortir ces perturbations.

— ***Éolienne amont*** *: cette configuration permet d'éviter les perturbations de l'écoulement dues à la tour, assurant ainsi une meilleure régularité du flux d'air sur les pales. Toutefois, les pales sont soumises à une poussée axiale importante, pouvant provoquer des mouvements de battement. Il est alors indispensable d'utiliser des pales très rigides, voire pré-courbées dès la conception, afin de limiter leur flexion et d'éviter tout risque de collision avec la tour. Par ailleurs, cette configuration n'est pas stable naturellement et nécessite un système d'orientation : un simple gouvernail pour les petites puissances, et un système piloté pour les grandes puissances.*

En pratique, la quasi-totalité des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration ***« amont »****, en raison de ses performances aérodynamiques plus favorables et de sa meilleure adaptation aux systèmes de contrôle avancés [8].*

I.3.3.1 Éoliennes à axe vertical

Bien que rarement utilisées aujourd'hui en raison de performances moindres comparées aux modèles à axe horizontal, les éoliennes à axe vertical présentent certains avantages, notamment la possibilité d'installer le multiplicateur et la génératrice au sol, ce qui facilite les opérations de maintenance.

Cependant, ce type d'éolienne capte le vent proche du sol, souvent moins intense en raison des effets du relief, ce qui réduit son rendement. Par ailleurs, leur démarrage n'est pas autonome : elles doivent être lancées manuellement dès l'apparition d'un vent suffisant.

L'un des avantages de cette architecture réside dans sa symétrie de révolution : le rotor

peut capter le vent quelle que soit sa direction, sans nécessiter de système d'orientation.

Les éoliennes à axe vertical se divisent en deux grandes catégories selon leur principe aérodynamique [7, 3] :

- ***Éoliennes à rotor de Darrieus**, basées sur la portance .*
- ***Éoliennes à rotor de Savonius**, basées sur la traînée.*

Éoliennes à rotor de Darrieus *Conçue par l'ingénieur français Georges Darrieus, cette éolienne utilise des profils aérodynamiques incurvés disposés de façon à exploiter les variations de direction et d'intensité des forces dues à l'écoulement de l'air. La résultante de ces forces génère un couple moteur permettant la rotation du rotor (voir Figure I.3) [7].*



FIGURE I.3 – Éolienne à axe vertical de type Darrieus.

Éoliennes à rotor de Savonius : *Les éoliennes à rotor de **Savonius** reposent sur le principe de la traînée différentielle. Ce principe stipule qu'un couple moteur peut être généré par la différence de pression exercée par le vent sur les surfaces concave et convexe du rotor.*

Ce type de rotor est généralement constitué de deux demi-cylindres disposés de manière opposée, formant une structure en forme de "S" vue de dessus (voir Figure I.4). Lorsque le vent souffle, la surface concave capte davantage le flux d'air que la surface convexe, créant une différence de force suffisante pour provoquer la rotation du rotor [7, 3].

Bien que leur rendement soit relativement faible comparé aux éoliennes à axe horizontal ou aux rotors de Darrieus, les éoliennes de Savonius présentent l'avantage de démarrer seules même par vent faible, et ce, indépendamment de la direction du vent. Elles sont donc particulièrement adaptées aux applications à petite échelle ou dans des environnements urbains.

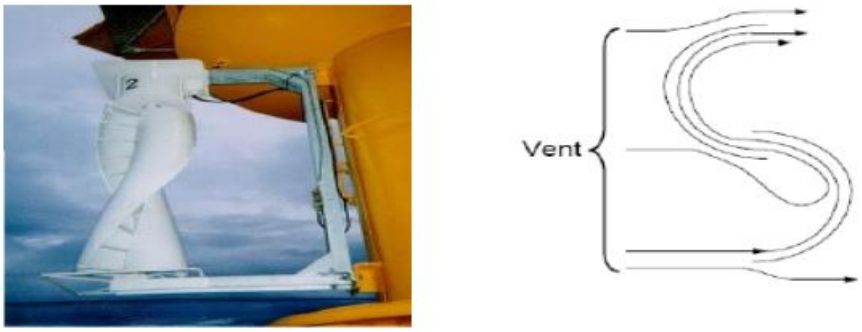


FIGURE I.4 – Éolienne à axe vertical de type Savonius.

I.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.3.4.1 Avantages

- Énergie renouvelable : l'énergie éolienne repose sur une ressource naturelle inépuisable, le vent.

- Respectueuse de l'environnement : elle ne génère pas d'émissions directes de CO_2, contribuantainsiàlalutte contre le changement climatique.

– Productionaccrueenhiver : leséoliennesoffrentunbonrendementdurantl'hiver, périodedefortedemandeénergétique [3].

– Coûtdécroissant : grâceauxavancéestechnologiquesetàl'industrialisationdusecteur, lecoûtdeproductiondiminueprogressivement, rendantcetteénergiecompétitivefacee à d'autressourcesrenouvelables[3].

– Longévité : laduréedeviemoyenned'uneéolienneestestiméeentre ***20 et 25 ans****.*

– Souplessed'exploitation : leséoliennespeuventêtrearrêtéesouredémarréesrapidement, cequifacilitelagestionduréseau [9].

I.3.4.2 Inconvénients

— ***Intermittence de la ressource*** *: la production d'énergie dépend fortement des conditions météorologiques, ce qui la rend aléatoire.*

— ***Impacts écologiques*** *: les parcs éoliens peuvent entraîner une* ***mortalité aviaire****, en particulier durant les périodes de migration.*

— ***Nuisances sonores*** *: bien que le* ***bruit*** *des éoliennes ait été atténué grâce aux progrès techniques, il demeure une source de gêne pour certaines populations [3].*

I.3.5 Principales composantes d'éolienne

Les principaux composants d'une éolienne sont illustrés à la Figure I.5.

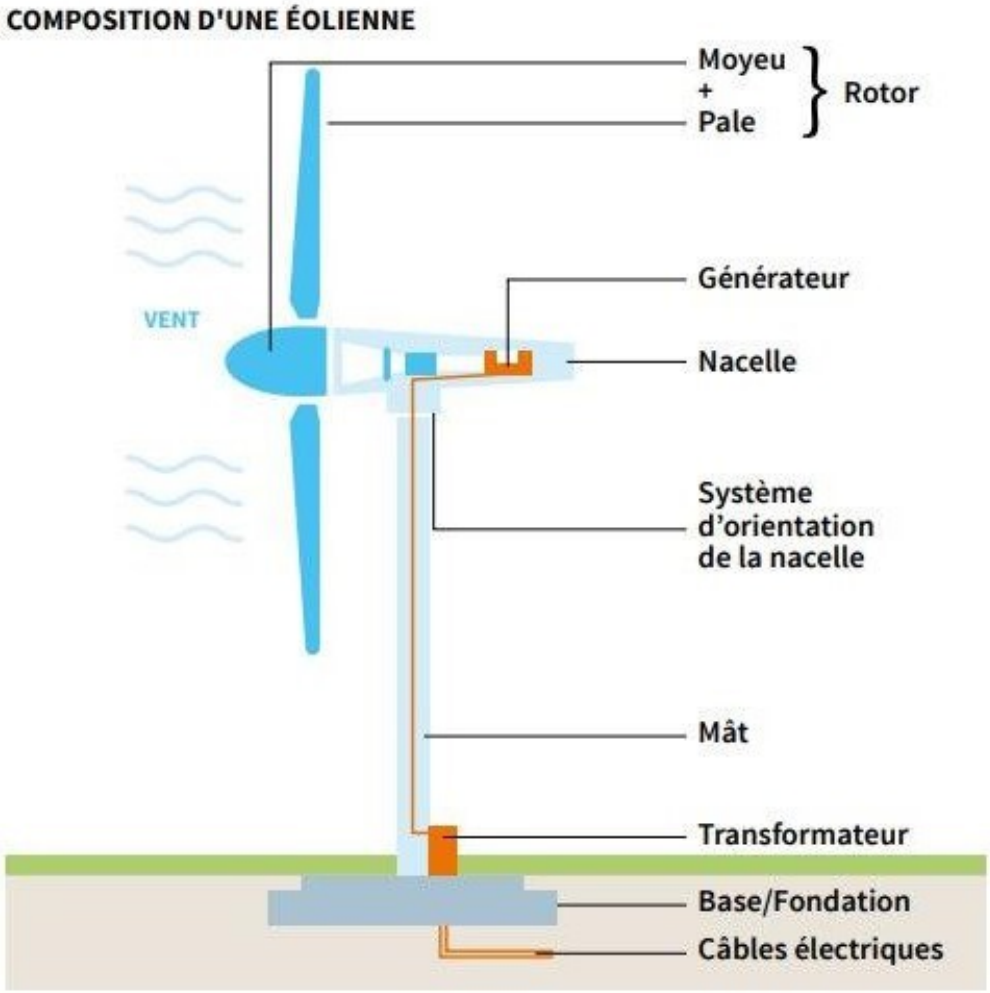


FIGURE I.5 – Illustration des composants des éoliennes [1].

Le mât

Les tours d'éoliennes peuvent prendre plusieurs formes, telles que des pylônes en treillis métallique, des mâts haubanés, etc. Toutefois, la plupart des éoliennes de forte puissance sont conçues avec une tour en acier, solidement fixée à une fondation en béton ferraillé [9].

La nacelle

La nacelle regroupe toutes les pièces nécessaires au fonctionnement des éoliennes. Elle est située en haut du mât et est automatiquement orientée vers le vent. Elle comprend notamment :

- *L'arbre de transmission .*
- *Le multiplicateur .*
- *Les roulements .*
- *Le générateur .*
- *Les freins mécaniques à disque .*
- *Le système d'orientation de la nacelle, permettant de maintenir les pales face au vent [9].*

Le rotor

Les pales du rotor d'une éolienne fonctionnent selon le même principe que les ailes d'un avion. Un côté de la pale est arrondi, tandis que l'autre est plat. Le vent circule plus rapidement le long du bord arrondi, créant une différence de pression de chaque côté de la pale. Les pales sont ainsi « poussées » par l'air pour égaliser cette différence de pression, ce qui les fait tourner [9].

I.4 La machine à double alimentation

La machine à double alimentation, ou doubly fed induction machine (DFIM) en anglais, est une machine triphasée à courant alternatif disposant de deux enroulements triphasés accessibles, permettant ainsi d'injecter ou de prélever de la puissance à travers ces enroulements [5].

Ce type de machine ne nécessite qu'une seule source d'alimentation alternative, capable d'alimenter simultanément les deux côtés (stator et rotor) de la machine. Ceci constitue un avantage majeur, particulièrement dans les applications d'entraînement ou de génération à vitesse variable, où le glissement peut être contrôlé par des convertisseurs de puissance situés côté statorique, côté rotorique, ou des deux à la fois. Le choix dépend essentiellement de critères technico-économiques liés à la conception [10].

I.4.1 Classification des machines à double alimentation

La classification des machines asynchrones à rotor bobiné s'appuie sur une revue bibliographique approfondie développée dans la littérature spécialisée sur les machines à double alimentation [11].

Les variantes les plus courantes et les plus développées sont organisées selon un organigramme (cf. figure précédente). Le schéma de principe ainsi que la description détaillée de chaque variante seront présentés ci-dessous.

I.5 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Les structures des chaînes de conversion dans les systèmes éoliens dépendent principalement du type de génératrice employée. Différents types de machines électriques sont utilisés pour la production d'énergie éolienne, et leur choix est déterminé par des critères techniques et économiques.

Les critères principaux pour le choix du type d'aérogénérateur sont [11] :

- *Le niveau de puissance produite.*
- *La localisation : éolienne terrestre (onshore) ou en mer (offshore).*
- *Le mode de connexion : éolienne isolée ou raccordée au réseau.*

I.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)

Les machines asynchrones à cage d'écureuil se distinguent par leur simplicité de fabrication et leur faible coût. Elles sont largement standardisées, produites en grande quantité, reconnues pour leur fiabilité et nécessitent peu d'entretien.

Dans le cas des aérogénérateurs de moyenne à grande puissance, la vitesse de rotation des pales est généralement faible. Concevoir une génératrice asynchrone à faible vitesse avec un rendement élevé est complexe. Pour cette raison, un multiplicateur de vitesse à rapport variable est souvent utilisé entre l'arbre lent, connecté à la turbine, et l'arbre rapide, relié à la génératrice, afin de maintenir une tension et une fréquence de sortie constantes (voir figure I.6).

Néanmoins, l'emploi d'un convertisseur électronique de puissance permet de supprimer ce multiplicateur, en adaptant électroniquement la fréquence et la tension de sortie au réseau, et en autorisant ainsi un fonctionnement à vitesse variable (voir figure I.7).

Par ailleurs, ces machines sont particulièrement adaptées au petit éolien, où la vitesse plus élevée des pales permet un entraînement direct sans multiplicateur [3].

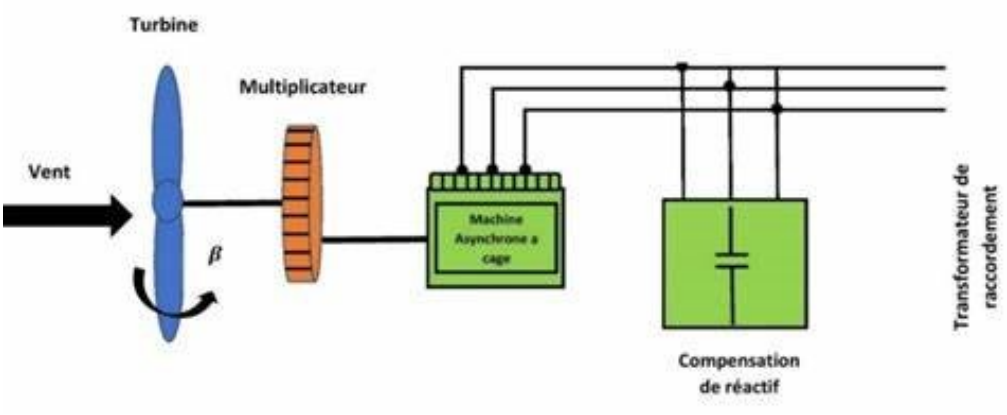


FIGURE I.6 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage avec vitesse de rotation fixe [2].

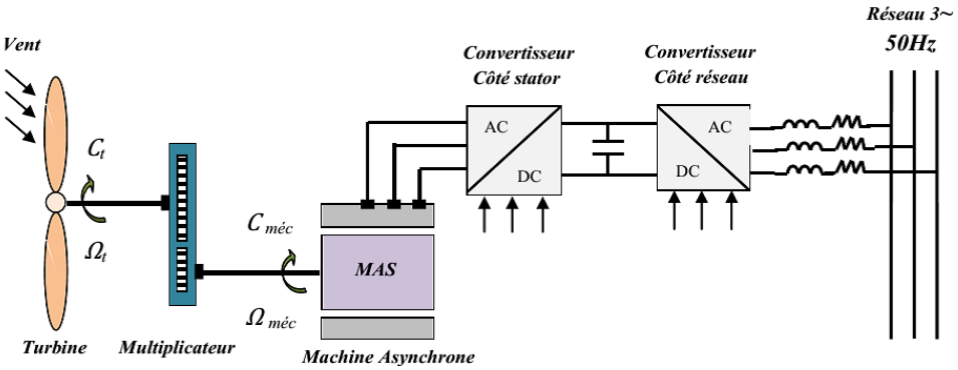


FIGURE I.7 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage avec fréquence variable [2].

I.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Cette machine, appelée généralement alternateur, est pratiquement la seule solution utilisée dans les procédés traditionnels de production d'électricité (centrales thermiques, hydro-électriques ou nucléaires).

Cependant, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation impose l'utilisation d'une interface d'électronique de puissance entre le stator et le réseau. En effet, il est difficile de maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement constante afin d'assurer sa synchronisation avec le réseau lors de la connexion (voir figure I.8).

Cette interface permet ainsi un fonctionnement à vitesse variable sur une large plage de variation [3].

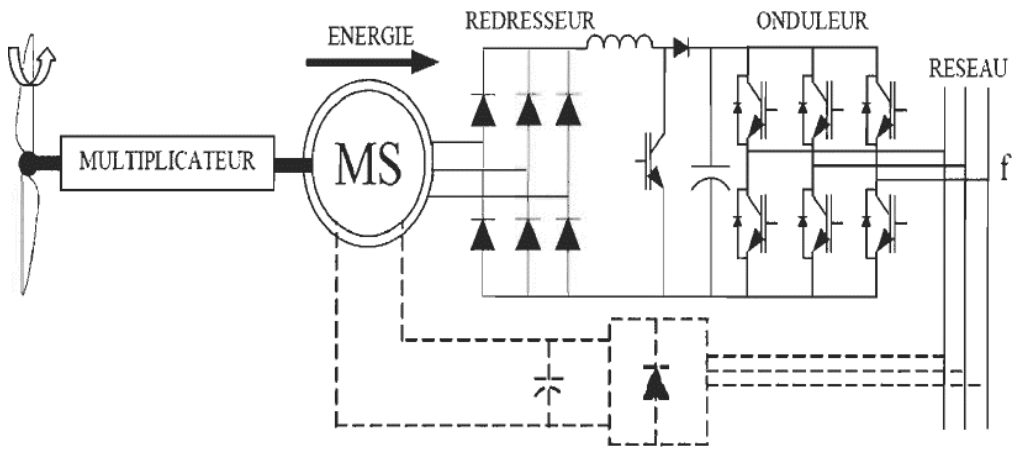


FIGURE I.8 – Machine synchrone reliée au réseau par une interface d'électronique de puissance [3].

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la Machine sont découplées. Cela permet d'avoir une tension et une fréquence constante à la sortie du convertisseur quelle que soit la vitesse de l'éolienne. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation en raison de leurs nombres de pôle très élevé, et donc elles peuvent être directement couplées à la turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur mécanique de vitesse.

I.5.3 Machines asynchrones à double stator :

Une nouvelle génération d'éoliennes est proposée par certains constructeurs. Elle utilise un système basé sur une machine asynchrone à double stator (voir figure I.9).

Ce système comporte :

- *un stator de faible puissance avec un grand nombre de paires de pôles, destiné au fonctionnement à faibles vitesses de vent ;*
- *un stator de forte puissance avec un faible nombre de paires de pôles, permettant de fonctionner à des vitesses de vent élevées [1].*

Le fonctionnement global du système reste à vitesse fixe, mais il permet deux points de fonctionnement distincts selon les conditions de vent.

Cependant, la présence d'un deuxième stator rend la conception de cette machine plus complexe, tout en augmentant considérablement son coût, son diamètre, ainsi que le poids et l'encombrement de l'ensemble.

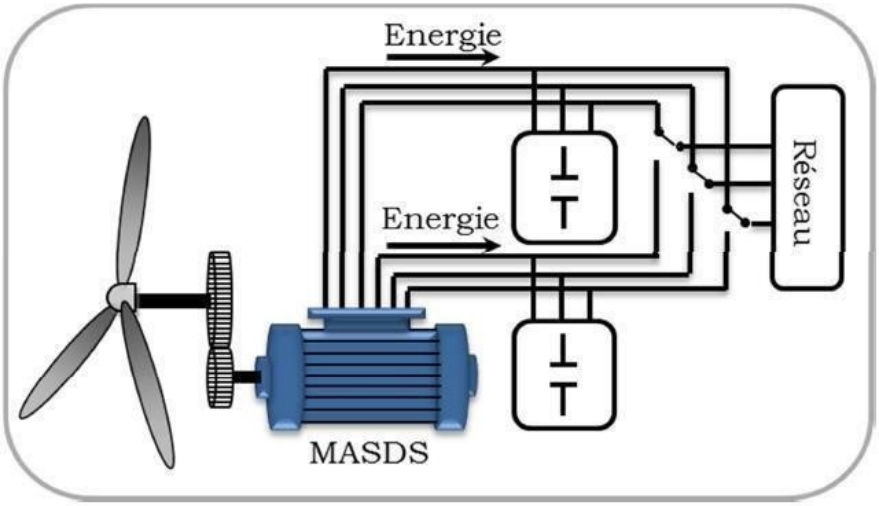


FIGURE I.9 – Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [1].

I.5.4 Machine asynchrone à double alimentation :

Avec les générateurs synchrones à aimants permanents, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est actuellement l'une des solutions adoptées par les fabricants d'éoliennes à travers le monde.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau sans aucune interface électronique. Cependant, le rotor bobiné est relié à un convertisseur de puissance pour assurer le réglage de la puissance fournie par le stator. Ce convertisseur de puissance est dimensionné pour une faible puissance, qui ne dépasse pas habituellement 30 % de la puissance nominale de la GADA.

En raison de cette configuration, le coût du convertisseur et du système diminue significativement en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est couramment utilisée 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 [3].

I.5.4.1 Structure de la Machine :

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

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

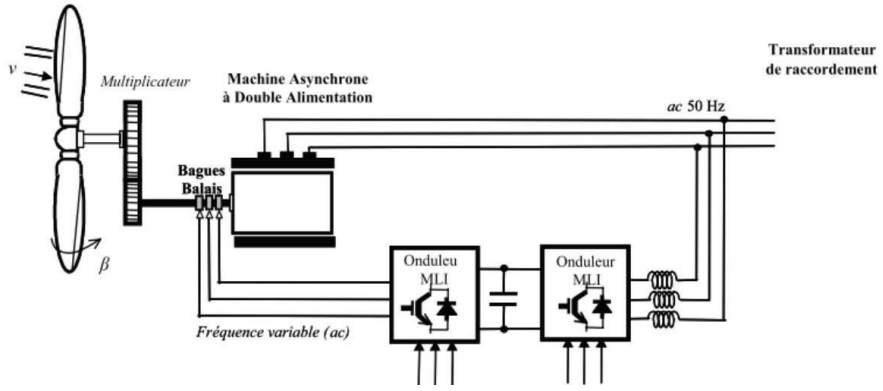


FIGURE I.10 – Chaîne de conversion à base d'une GADA [1].

I.5.5 Modes de fonctionnement de la MADA

I.5.5.1 Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

Dans ce mode, le stator reçoit l'énergie directement du réseau, tandis que la puissance de glissement transite par le rotor avant d'être réinjectée vers le réseau. La machine fonctionne alors comme un moteur, mais à une vitesse inférieure à celle de synchronisme (voir Fig. I.11). Bien qu'une machine asynchrone à cage d'écureuil puisse aussi opérer dans ce régime, la puissance de glissement y est dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor, contrairement à la MADA qui permet sa valorisation.

I.5.5.2 Fonctionnement en moteur hyper-synchrone

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme (Fig. I.11). La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

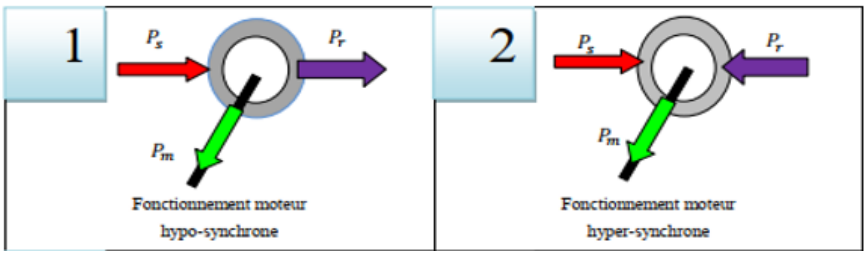


FIGURE I.11 – Fonctionnement de la MADA en mode moteur

I.5.5.3 Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone

Dans ce régime, illustré par la figure I.12, la puissance active est injectée dans le réseau via le stator, tandis que la puissance de glissement est absorbée par le rotor. La machine fonctionne alors comme une génératrice, mais à une vitesse inférieure à celle de synchronisme.

I.5.5.4 Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, représenté par la figure I.12, la puissance est injectée dans le réseau par le stator, tandis que la puissance de glissement, récupérée via le rotor, est également réinjectée dans le réseau. La machine opère ainsi en mode générateur à une vitesse supérieure à celle de synchronisme.

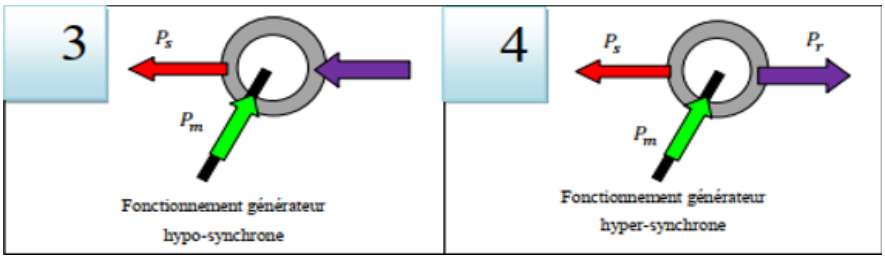


FIGURE I.12 – Fonctionnement de la MADA en mode générateur

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation des éoliennes, leurs types et leurs méthodes de fonctionnement. Ensuite, nous avons essayé de faire une présentation non exhaustive des différentes chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes. L'accent a été mis sur les éoliennes utilisant la machine asynchrone à double alimentation qui sera utilisée dans les chapitres qui suivant.

Chapitre II

Modélisation de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction

L'objectif fondamental des systèmes éoliens est de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Énergie propre et économique, l'éolien suscite un intérêt croissant et pousse les constructeurs à développer des solutions toujours plus robustes pour maximiser l'énergie récupérée, tout en explorant les diverses configurations possibles. Par la suite, nous exposerons la loi aérodynamique de Betz, qui détermine la puissance pouvant être extraite du vent, ainsi que le coefficient de puissance et les principales méthodes de régulation de la puissance, telles que le Pitch Control et le Stall Control. L'intérêt du fonctionnement à vitesse variable sera également abordé.

Nous poursuivrons avec la modélisation des composants du système éolien étudié, à commencer par la machine asynchrone à double alimentation (MADA), à travers ses représentations en triphasé et biphasé. Viendront ensuite la turbine éolienne et le dispositif de conversion mécanique assurant le couplage avec la génératrice, ce qui permettra de déduire l'équation dynamique de l'arbre.

Enfin, nous conclurons ce chapitre par le principe de fonctionnement de la MADA, aussi bien en mode moteur qu'en mode génératrice.

II.2 l'énergie éolienne

Depuis l'Antiquité, l'homme exploite la force du vent, bien avant d'en comprendre les mécanismes physiques. Les voiliers, cerfs-volants, girouettes ou moulins à vent témoignent d'un usage ancien, intuitif, antérieur aux théories scientifiques modernes telles que les équations de Navier-Stokes ou la modélisation informatique.

Le vent est une source d'énergie propre, disponible localement, renouvelable à court terme et pratiquement inépuisable à l'échelle planétaire. Son origine réside principalement dans l'énergie solaire : le rayonnement du soleil chauffe la surface terrestre de manière inégale selon la latitude, l'altitude, la nature du sol, ou encore l'heure de la journée. Ces disparités thermiques provoquent des variations de pression atmosphérique qui engendrent des mouvements d'air. L'air chaud, plus léger, monte, tandis que l'air froid descend et prend sa place. Ce phénomène dynamique génère un écoulement de l'air que l'on désigne sous le nom de ***vent****.*

Grâce à sa nature renouvelable et sa faible empreinte écologique, le vent s'impose comme une ressource énergétique stratégique dans le cadre de la transition vers un mix énergétique durable. [6].

II.3 Intérêt de l'éolienne à vitesse variable

La Figure II.1 illustre les caractéristiques non linéaires entre la puissance mécanique et la vitesse mécanique. Pour chaque vitesse du vent, une courbe correspondante existe. L'éolienne, à laquelle ces caractéristiques appartiennent, fonctionne sans commande lorsque la vitesse du vent est comprise entre une valeur minimale ($v_{min} = 7{,}1\ m/s$) et une valeur maximale ($v_n = 12\ m/s$).

Lorsque la vitesse du vent varie entre v_{min} et v_n, la vitesse mécanique du générateur fluctue entre la vitesse de synchronisme (Ω_s) et la vitesse mécanique nominale ($\Omega_{mec\ nom}$), ce qui correspond aux points 1, 2 et 3.

Comme le montre la Figure II.1, l'éolienne produit effectivement de la puissance aux points 2 et 3, mais celle-ci n'est pas maximale. Cependant, sur les courbes de puissance, il existe des points correspondant à la puissance maximale (points 4, 5 et 6), associés à des vitesses différentes.

Il est donc évident que faire fonctionner l'éolienne à ces points permet de maximiser la puissance extraite du vent, même lorsque la vitesse du vent varie. Pour cette raison, et afin de ne pas dépasser la puissance nominale du générateur éolien, deux politiques de contrôle

basées sur la vitesse du vent sont mises en œuvre afin d'optimiser l'exploitation de l'éolienne [5].

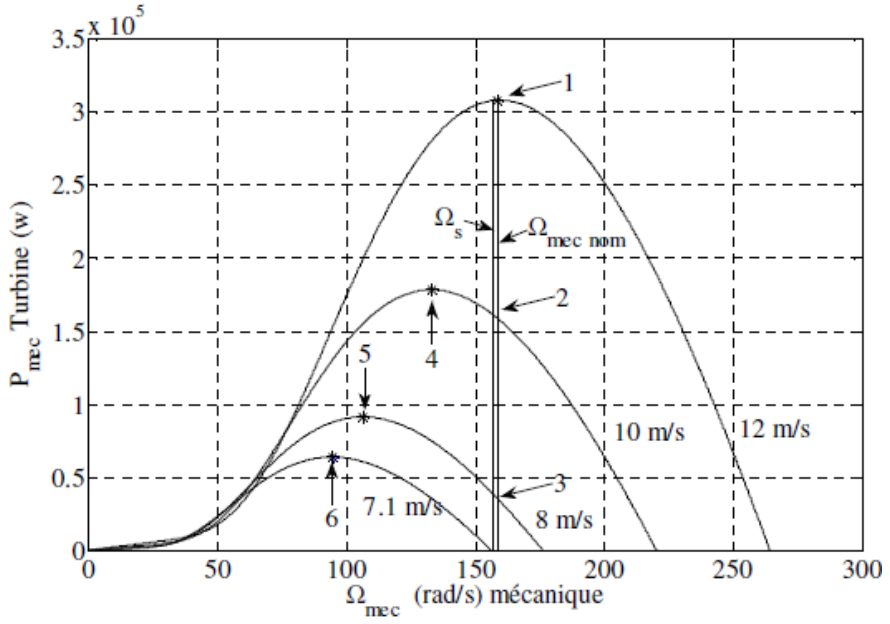


FIGURE II.1 – Caractéristique (puissance - vitesse mécanique).

— *Pour maximiser la puissance produite lorsque la vitesse du vent est inférieure à sa valeur nominale, la vitesse mécanique de l'éolienne est régulée. Cela correspond, par exemple, aux points 4, 5 et 6 de la courbe de fonctionnement. Ce mode de régulation permet également à l'éolienne de commencer à produire de l'énergie à des vitesses de vent inférieures à la vitesse minimale conventionnelle (V_{min}). Ainsi, une éolienne à vitesse variable peut commencer à produire dès que le vent atteint 4 m/s.*

— *Lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, l'angle d'inclinaison des pales est ajusté pour maintenir la puissance produite proche de sa valeur nominale, tout en protégeant l'éolienne. Ce système de commande permet à l'éolienne de continuer à fonctionner au-delà de la vitesse nominale, à condition qu'elle puisse supporter les contraintes mécaniques associées.*

II.4 Puissance aérodynamique captée par l'éolienne et coefficient de puissance

La théorie de Betz décrit le flux d'air autour des pales de l'éolienne en utilisant un modèle de tube de courant. Elle suppose que la vitesse V du vent traversant le rotor correspond à la

moyenne des vitesses en amont V_1 et en aval V_2, soit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Ce modèle permet d'évaluer la puissance aérodynamique captée par l'éolienne à partir de la différence de vitesse du vent avant et après passage dans le rotor.

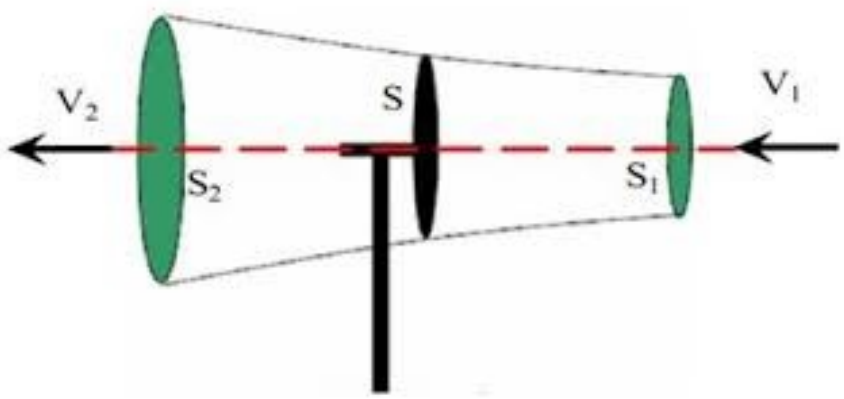


FIGURE II.2 – Démonstration de la loi de Betz

$$V = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{II.1}$$

L'énergie éolienne est dérivée de l'énergie cinétique du vent. En considérant une masse d'air m (en kg) se déplaçant à une vitesse v (en m/s), l'énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \tag{II.2}$$

La masse d'air en mouvement, de densité ρ, traversant la surface S balayée par les pales en une seconde est :

$$m = \rho S \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{II.3}$$

La puissance mécanique P_m extraite de l'éolienne s'écrit alors :

$$P_m = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2) \tag{II.4}$$

En remplaçant m à partir de l'équation (II.3) dans l'équation (II.4), on obtient :

$$P_m = \frac{1}{4}\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \tag{II.5}$$

Dans le cas d'un vent non perturbé traversant la même surface S à la vitesse v_1, la puissance totale disponible dans le vent, notée P_{mt}, est :

$$P_{mt} = \frac{1}{2}\rho S v_1^3 \tag{II.6}$$

Le coefficient de puissance C_p est défini comme le rapport entre la puissance mécanique extraite et la puissance totale disponible :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1+\frac{v_2}{v_1})(1-(\frac{v_2}{v_1})^2)}{4} \tag{II.7}$$

Le coefficient C_p atteint sa valeur maximale de $\frac{16}{27} \approx 0{,}593$ pour un rapport optimal entre v_2 et v_1. C'est la limite théorique imposée par la loi de Betz.

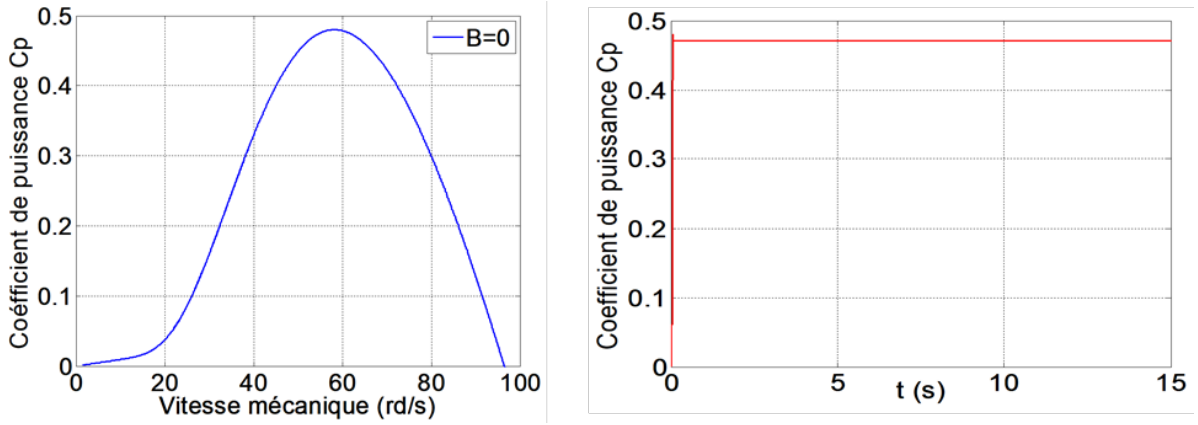


FIGURE II.3 – Coefficient de puissance C_p en fonction de (a) la vitesse mécanique et (b) du temps

II.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

*La relation (II.6) montre que la puissance éolienne captée est proportionnelle au **cube de la vitesse du vent**. Par conséquent, pour une puissance nominale donnée, il existe une **vitesse du vent nominale** v_{nom} à laquelle la turbine est optimisée en termes de conception et de performance.*

*Afin d'éviter tout risque de **dommages mécaniques**, la turbine doit adapter certains paramètres (comme l'angle des pales ou la vitesse de rotation) pour maintenir la puissance à une valeur sûre dès que le vent dépasse cette valeur nominale.*

Outre cette vitesse nominale v_{nom}, on distingue également :

— *la **vitesse de démarrage** v_{dv}, à partir de laquelle l'éolienne commence à fonctionner,*

— *la **vitesse maximale** v_{max}, au-delà de laquelle la production d'énergie est interrompue pour des raisons de sécurité.*

Ces trois vitesses permettent de définir quatre zones de fonctionnement, illustrées dans la figure II.4 :

1. ***Zone 1** : pour $v < v_{dv}$, le vent est trop faible, la turbine reste à l'arrêt.*
2. ***Zone 2** : pour $v_{dv} \leq v < v_{nom}$, la puissance produite augmente avec le cube de la vitesse du vent.*
3. ***Zone 3** : pour $v_{nom} \leq v < v_{max}$, la puissance produite est maintenue constante à sa valeur nominale P_{t_n}.*
4. ***Zone 4** : pour $v \geq v_{max}$, la turbine est arrêtée pour éviter tout dommage.*

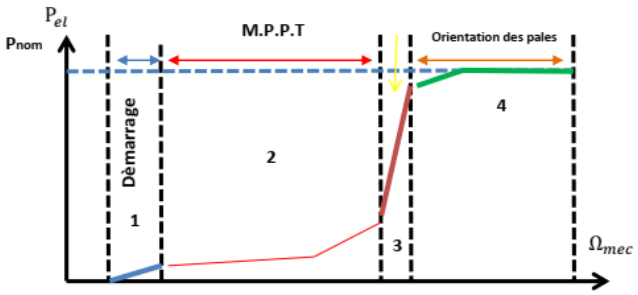


FIGURE II.4 – Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

*Pour limiter la puissance aérodynamique captée lorsque la vitesse du vent devient excessive, deux principales techniques de régulation sont utilisées, notamment sur les grandes éoliennes : le **Pitch Control** et le **Stall Control**.*

II.5.0.1 Le Pitch Control

*Cette méthode consiste à ajuster l'angle d'incidence des pales (appelé aussi pas des pales) autour de leur axe longitudinal, en fonction de la vitesse du vent et de la puissance à extraire. Grâce au **Pitch Control**, le coefficient de puissance C_p ne dépend plus uniquement du rapport de vitesse λ, comme dans les régimes précédents, mais directement de la vitesse du vent, à vitesse de rotation constante. Cela permet de maintenir une puissance stable et maximale dans la zone 3 de fonctionnement [9].*

Pour modifier l'angle d'incidence dans un système automatisé de régulation de la vitesse de rotation, on utilise un régulateur électronique associé soit à des masselottes centrifuges, soit à des servomoteurs. Ce dispositif permet :

— *un démarrage de l'éolienne à une vitesse de vent réduite v_d,*
— *une régulation efficace de la vitesse angulaire lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale v_n,*
— *une optimisation de la conversion d'énergie lorsque le vent varie entre v_d et v_n,*
— *une protection de l'éolienne contre les vents très forts ($> v_{max}$), en orientant les pales en drapeau, ce qui évite l'usage d'un système de freinage puissant pour les arrêts d'urgence.*

II.5.0.2 Le Stall Control

*Le **Stall Control** est une méthode de régulation par décrochage aérodynamique. Elle repose sur l'évolution géométrique des pales en fonction du rapport entre la vitesse du vent et celle de rotation de la turbine. Lorsque ce rapport dépasse un certain seuil, un décrochage aérodynamique se produit, limitant ainsi la puissance captée.*

Ce phénomène dépend notamment de l'angle de calage des pales, qui peuvent être conçues avec un pas variable selon leur position le long de la pale. Elles sont également équipées d'un dispositif de freinage en bout.

Les avantages du Stall Control incluent :
— *l'absence de système d'ajustement de l'angle de calage.*
— *une conception du rotor plus simple et moins coûteuse.*
— *une maintenance facilitée et une fiabilité accrue.*

Pour améliorer l'efficacité énergétique de cette méthode, il est possible de l'associer à une machine à deux vitesses de rotation, ce qui permet d'élargir la plage de fonctionnement de la turbine, la rendant comparable à celle obtenue avec un système à orientation des pales (Pitch Control).

*Certains aérogénérateurs adoptent une solution intermédiaire, appelée **Stall Actif**. Ce système hybride combine les avantages des deux approches : le décrochage est obtenu de manière progressive grâce à une légère variation de l'orientation des pales. Cela permet d'utiliser des mécanismes de réglage plus simples, plus économiques et plus robustes que ceux du Pitch Control.*

II.5.1 La vitesse du vent continument variable

*La configuration électrique d'un aérogénérateur joue un rôle déterminant dans son mode de fonctionnement. C'est cette configuration qui conditionne le fonctionnement à **vitesse***

***fixe** ou à **vitesse variable** de l'éolienne.*

Le fonctionnement à vitesse fixe présente plusieurs avantages :

- *Simplicité du système électrique .*
- *Fiabilité accrue .*
- *Faible risque d'excitation des fréquences de résonance des composants de l'éolienne .*
- *Absence de système électronique de commande .*
- *Coût réduit.*

En revanche, le fonctionnement à vitesse variable offre des bénéfices significatifs :

- *Meilleur rendement énergétique .*
- *Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance .*
- *Diminution des contraintes mécaniques subies par les composants .*
- *Production d'une énergie de meilleure qualité.*

Il ressort clairement que le fonctionnement à vitesse variable est essentiel pour optimiser les performances d'une éolienne. Le réglage continu de la vitesse de rotation permet de maintenir le coefficient de puissance C_p à son niveau optimal, en particulier lorsque la génératrice utilisée est synchrone ou asynchrone directement connectée au réseau. Dans ces cas-là, la vitesse reste quasi constante, ce qui limite le rendement aérodynamique à une seule valeur de vitesse de vent (λ_{opt}).

Bien qu'un système à deux vitesses soit envisageable, l'adoption d'une vitesse de rotation variable contrôlée électroniquement s'avère nettement plus efficace sur le plan énergétique. La figure II.5 illustre comment la position du maximum de la courbe de puissance varie selon la vitesse du vent. Pour une optimisation efficace du transfert énergétique, un ajustement direct ou indirect de la vitesse de rotation est généralement nécessaire [12].

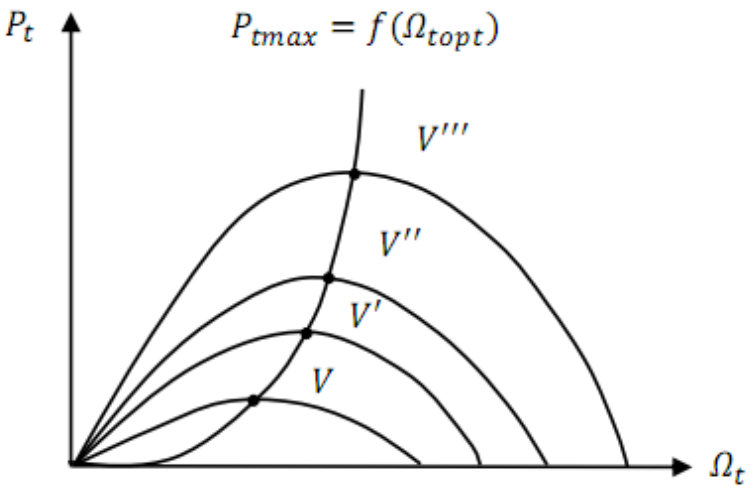


FIGURE II.5 – Variation de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent.

II.6 Modélisation de la turbine éolienne

Le rôle du système éolien est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique via un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice. Dans notre étude, ce système comprend mécaniquement quatre éléments principaux :

- *Trois pales orientables, chacune caractérisée par ses propres coefficients d'inertie .*
- *Un comportement élastique et des frottements vis-à-vis de l'air ainsi que du support de la turbine .*
- *Un arbre d'entraînement des pales, possédant lui aussi son inertie, son élasticité et un coefficient de frottement relatif au multiplicateur .*
- *Un multiplicateur de vitesse permettant d'augmenter la vitesse de rotation .*
- *Un rotor de génératrice doté d'une certaine inertie et d'un coefficient de frottement.*

II.6.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique

Dans les études électromécaniques, on utilise généralement des modèles simplifiés basés sur les hypothèses suivantes :

- *Les trois pales sont identiques et présentent les mêmes propriétés d'inertie, d'élasticité et de frottement .*
- *Les frottements entre les pales et l'air ainsi qu'entre les pales et le support sont considérés comme négligeables .*

— *Le vent est supposé souffler de manière uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de modéliser l'ensemble des pales comme un unique système mécanique équivalent, résultant de la somme des effets mécaniques individuels.*

Cette approche conduit à un modèle mécanique simplifié de la turbine, représenté à la figure II.6 [5].

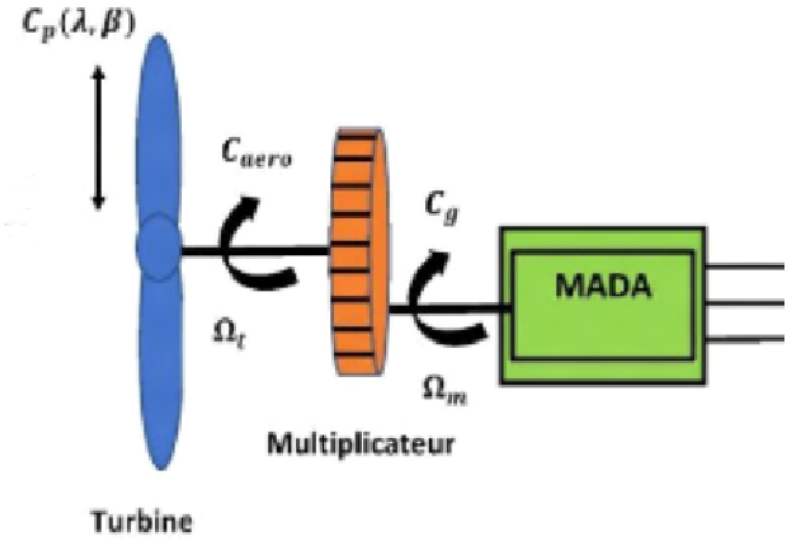


FIGURE II.6 – Modèle mécanique simplifié de la turbine.

II.6.2 Modélisation de la vitesse du vent

Le vent constitue la source d'énergie principale des aérogénérateurs. Il représente l'entrée du système étudié. L'énergie cinétique du vent est partiellement récupérée, convertie en énergie mécanique par la turbine, puis transformée en électricité par le générateur.

Les caractéristiques dynamiques du vent jouent un rôle crucial dans l'analyse du système global de conversion d'énergie. En effet, dans des conditions idéales, la puissance éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cette dernière est représentée par un vecteur tridimensionnel.

Cependant, dans ce modèle, seule la composante horizontale du vecteur de vitesse du vent est prise en compte, ce qui permet une simplification notable. La vitesse du vent peut alors être décrite par une fonction scalaire dépendant du temps :

$$V = f(t) \tag{II.8}$$

Cette fonction peut être décomposée en deux parties : une composante moyenne à variation

lente, et des composantes fluctuantes [5] :

$$V(t) = V_0 + \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \tag{II.9}$$

avec :

— V_0 *: la composante moyenne de la vitesse du vent ;*

— A_i *: l'amplitude de la* $i^{ème}$ *composante spectrale fluctuante ;*

— ω_i *: la pulsation de la* $i^{ème}$ *composante ;*

— ϕ_i *: la phase initiale de la* $i^{ème}$ *composante.*

II.6.3 Profil de vent et modélisation de la turbine éolienne

La figure II.7 illustre deux profils de vitesse du vent : l'un représentant la variabilité aléatoire typique d'un site éolien, et l'autre étant un profil filtré, ajusté aux caractéristiques dynamiques lentes du système étudié.

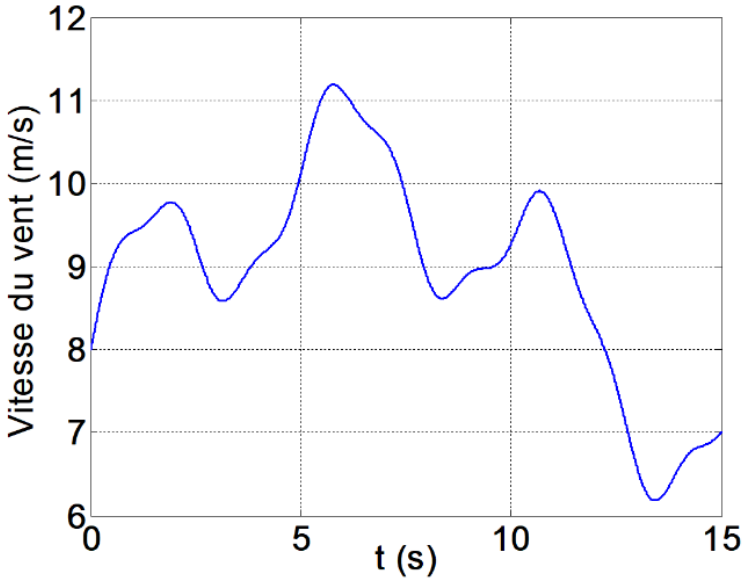


FIGURE II.7 – Profils de vent appliqués au système

II.6.3.1 Modèle de la turbine

La puissance disponible dans le vent peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S v^3 \tag{II.10}$$

où :

— P_v : *puissance du vent (W).*
— ρ : *densité de l'air* (kg/m^3).
— S : *surface balayée par les pales* (m^2).
— v : *vitesse du vent (m/s).*

La puissance aérodynamique extraite par le rotor de la turbine est alors donnée par :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \tag{II.11}$$

où :

— P_t : *puissance développée par la turbine (W),*
— $C_p(\lambda, \beta)$: *coefficient de puissance, fonction du ratio de vitesse* λ *et de l'angle de calage des pales* β.

Le coefficient C_p *reflète le rendement aérodynamique de la turbine et dépend fortement de sa conception. La figure II.8 illustre la variation de* C_p *en fonction du ratio de vitesse et de l'angle d'inclinaison des pales* β*, pour une turbine éolienne de 1.5 MW utilisée à titre d'exemple dans cette étude [5].*

Le ratio de vitesse λ *est défini comme le rapport entre la vitesse tangente des pales et la vitesse du vent :*

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \tag{II.12}$$

où :

— Ω_t : *vitesse angulaire du rotor (rad/s),*
— R : *rayon des pales (m),*
— v : *vitesse du vent (m/s).*

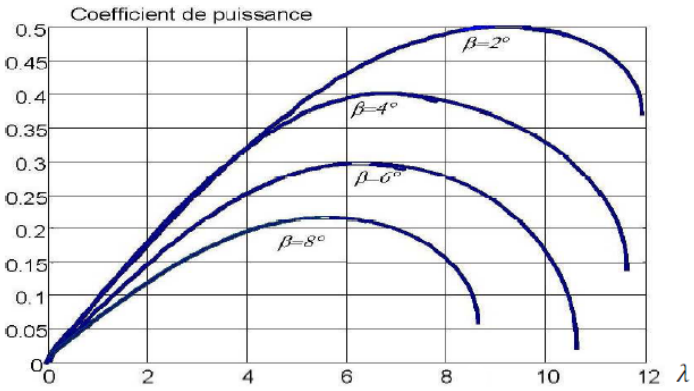


FIGURE II.8 – Variation du coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β pour une éolienne de 1,5 MW

À partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1,5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [5] :

$$C_p(\lambda,\beta) = (0.5 - 0.00167(\beta-2))\sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right) - 0.00184(\lambda-3)(\beta-2) \quad \text{(II.13)}$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est directement déterminé par :

$$T_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} c_p \rho S V^3 \quad \text{(II.14)}$$

On peut également définir un autre coefficient dit de couple c_t qui dépend de la vitesse du vent et du rapport de vitesse spécifique λ :

$$c_t = \frac{c_p}{\lambda} = \frac{c_p V}{R\Omega_t} \quad \text{(II.15)}$$

Ainsi, le couple aérodynamique peut également s'écrire sous la forme :

$$T_{aer} = \frac{1}{2} c_t \rho S R V^3 \quad \text{(II.16)}$$

II.6.3.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse permet d'adapter les grandeurs mécaniques (vitesses et couples) de la turbine à celles de la génératrice. Les relations mathématiques qui régissent cet élément sont :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_e}{G} \quad \text{(II.17)}$$

$$T_g = \frac{T_{aer}}{G} \quad \text{(II.18)}$$

où T_g représente le couple transmis à l'arbre de la génératrice.

II.6.3.3 Équation mécanique de la génératrice

En ramenant les paramètres mécaniques de la turbine à l'arbre de la génératrice, l'équation dynamique devient :

$$J\frac{d\Omega_e}{dt} + D\Omega_e = T_g - T_{em} \quad \text{(II.19)}$$

avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \tag{II.20}$$

$$D = \frac{D_t}{G^2} + D_e \tag{II.21}$$

où J_t, D_t, J_e, D_e désignent respectivement l'inertie et le coefficient de frottement de la turbine (t), de la génératrice (e), ainsi que ceux ramenés sur l'arbre de la génératrice. Basée sur les équations présentées, la figure suivante illustre un modèle physique de la turbine, ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent, et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

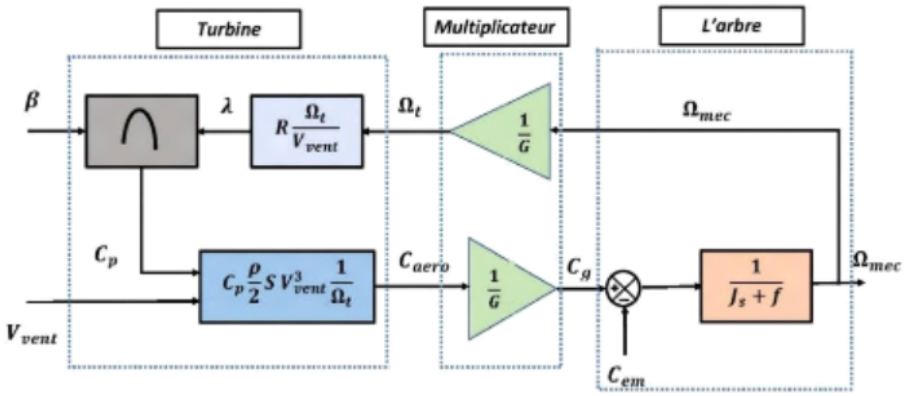


FIGURE II.9 – Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.6.4 Présentation de la machine asynchrone triphasée

Le stator d'une machine asynchrone triphasée comporte trois enroulements, généralement connectés en étoile ou en triangle. On suppose que le rotor est équipé d'un bobinage triphasé similaire à celui du stator, possédant le même nombre de pôles. Ces enroulements rotor sont également couplés en étoile. Selon la nature du rotor, on distingue principalement deux types de machines.

Dans le premier cas, les enroulements du rotor sont court-circuités entre eux. En pratique industrielle, le rotor est généralement formé de barres conductrices en cuivre ou en aluminium, reliées aux extrémités par des anneaux conducteurs, formant une structure en forme de cage. Cette configuration, appelée couramment machine à cage d'écureuil, tire son nom de cette apparence caractéristique (voir Fig. II.10).

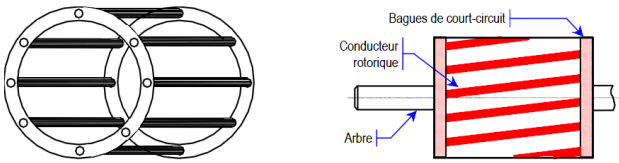


FIGURE II.10 – Rotor à cage d'écureuil

Dans la seconde technologie, le rotor est bobiné et comporte un enroulement triphasé similaire à celui du stator, connecté en étoile. Chaque extrémité libre des enroulements est reliée à une bague tournante solidaire de l'arbre du rotor. Trois balais assurent le contact avec ces bagues, permettant ainsi une connexion externe aux enroulements du rotor. Cette connexion externe peut servir à alimenter le rotor, ce qui permet de contrôler ses grandeurs électromagnétiques. Cette configuration est également connue sous le nom de machine à double alimentation.

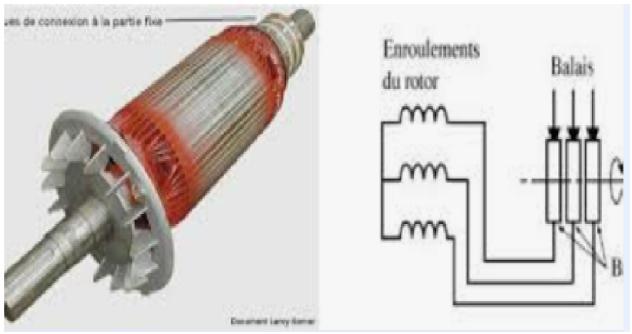


FIGURE II.11 – Constitution du rotor bobiné

II.6.5 Modélisation de la MADA

La modélisation de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) repose sur une analogie avec celle d'une machine asynchrone à cage. En effet, la cage de cette dernière est remplacée, dans le cas de la MADA, par un enroulement triphasé. Toutefois, contrairement à la machine à cage dont le rotor est en court-circuit, le rotor de la MADA est alimenté et les tensions rotoriques y sont donc non nulles.

La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas, la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

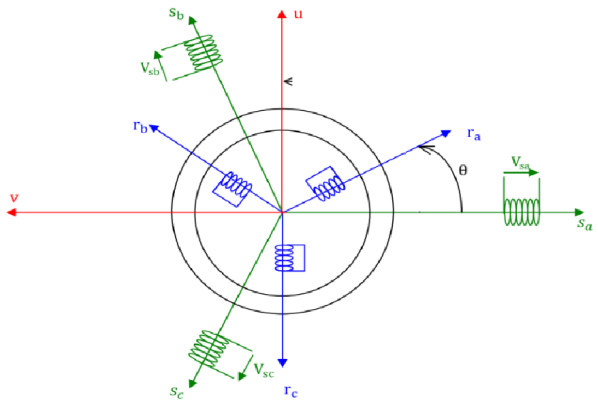


FIGURE II.12 – Fonctionnement moteur à vide (Cr= 0).

II.6.5.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple [10] :

- *La machine est de constitution symétrique et possède un entrefer constant.*
- *Le circuit magnétique n'est pas saturé et est parfaitement feuilleté, ce qui implique :*
  - *des pertes fer négligeables .*
  - *des pertes par hystérésis négligeables .*
  - *seuls les enroulements sont parcourus par les courants.*
- *La force magnétomotrice (f.m.m) créée dans une phase au stator comme au rotor est supposée répartie sinusoïdalement le long de l'entrefer.*
- *L'influence de la température sur les résistances n'est pas prise en compte : les résistances des enroulements sont supposées constantes.*
- *L'effet de la saturation magnétique sur les inductances est négligé :*
  - *les inductances propres sont constantes .*
  - *les inductances mutuelles varient uniquement en fonction de la position relative des axes magnétiques du stator et du rotor.*

II.6.5.2 Équations électriques de la machine

Les équations des tensions statoriques et rotoriques s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \vec{V_S} = \mathbf{R}_S \vec{I_S} + \dfrac{d}{dt}\vec{\Phi}_S \\ \vec{V_r} = \mathbf{R}_r \vec{I_r} + \dfrac{d}{dt}\vec{\Phi}_r \end{cases} \tag{II.22}$$

Les flux statoriques et rotoriques sont exprimés en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles :

$$\begin{cases} \vec{\Phi}_S = \mathbf{L}_S \vec{I_S} + \mathbf{M}_{Sr} \vec{I_r} \\ \vec{\Phi}_r = \mathbf{L}_r \vec{I_r} + \mathbf{M}_{rs} \vec{I_S} \end{cases} \tag{II.23}$$

Les matrices utilisées sont définies comme suit :

$$\vec{V_S} = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad \vec{I_S} = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, \quad \vec{V_r} = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad \vec{I_r} = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_S = R_s \cdot \mathbf{I}_3, \quad \mathbf{R}_r = R_r \cdot \mathbf{I}_3$$

$$\mathbf{L}_S = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

La matrice d'inductance mutuelle est :

$$\mathbf{M}_{Sr} = \begin{bmatrix} M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr}\cos(\theta) \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

En remplaçant les expressions des flux dans les équations de tension, on obtient :

$$\begin{cases} \vec{V_S} = \mathbf{R}_S \vec{I_S} + \dfrac{d}{dt}\left(\mathbf{L}_S \vec{I_S}\right) + \dfrac{d}{dt}\left(\mathbf{M}_{Sr} \vec{I_r}\right) \\ \vec{V_r} = \mathbf{R}_r \vec{I_r} + \dfrac{d}{dt}\left(\mathbf{L}_r \vec{I_r}\right) + \dfrac{d}{dt}\left(\mathbf{M}_{Sr}^T \vec{I_S}\right) \end{cases} \tag{II.25}$$

Les puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$P_S = \frac{3}{2}\vec{V_S} \cdot \vec{I_S} \tag{II.26}$$

$$Q_S = -\frac{3}{2}\vec{V_S} \cdot \vec{I_S} \tag{II.27}$$

II.6.5.3 Équation mécanique de la machine

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \tag{II.28}$$

L'équation dynamique de la machine est alors :

$$J\frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r\omega \tag{II.29}$$

II.6.5.4 Transformation de Park

Le passage du système triphasé au système biphasé (transformation de Park), illustré à la Fig. **??***, s'effectue à l'aide de la matrice suivante :*

$$\mathbf{P}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.30}$$

Cette matrice permet de convertir les composantes du système triphasé en composantes du système biphasé, comme illustré à la figure 2.19. Ainsi, les grandeurs statoriques et rotoriques sont transformées de la manière suivante :

Tension :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{S,dq} = [P(\theta_s)] \cdot \mathbf{V}_{S,abc} \\ \mathbf{V}_{r,dq} = [P(\theta_s - \theta)] \cdot \mathbf{V}_{r,abc} \end{cases}$$

Courant :

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{S,dq} = [P(\theta_s)] \cdot \mathbf{I}_{S,abc} \\ \mathbf{I}_{r,dq} = [P(\theta_s - \theta)] \cdot \mathbf{I}_{r,abc} \end{cases}$$

Flux :

$$\begin{cases} \mathbf{\Phi}_{S,dq} = [P(\theta_s)] \cdot \mathbf{\Phi}_{S,abc} \\ \mathbf{\Phi}_{r,dq} = [P(\theta_s - \theta)] \cdot \mathbf{\Phi}_{r,abc} \end{cases}$$

Relations entre les flux et les courants :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \qquad \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases}$$

Avec :

$$L_r = l_r - M_r \quad : \textit{Inductance cyclique rotorique.}$$
$$L_s = l_s - M_s \quad : \textit{Inductance cyclique statorique.}$$
$$M = \frac{3}{2}M_{sr} = \frac{3}{2}M_{rs} \quad : \textit{Mutuelle cyclique entre rotor et stator.}$$

Équations des tensions dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \end{cases} \qquad \begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases}$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \theta_s = \theta_r + \theta \tag{2.41}$$

II.6.5.5 Puissances actives et réactives de la MADA

Les puissances actives et réactives côté stator sont données par :

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs})$$
$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs})$$

Les puissances actives et réactives côté rotor sont :

$$P_r = \frac{3}{2}(V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr})$$
$$Q_r = \frac{3}{2}(V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr})$$

II.6.5.6 Choix du référentiel

Référentiel lié au stator : *Lorsque l'on fixe $\theta_s = 0$, alors $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ et donc $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$. Les équations deviennent :*

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot I_{\alpha s} + \dfrac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot I_{\beta s} + \dfrac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot I_{\alpha r} - \omega_r \cdot \Phi_{\beta r} + \dfrac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot I_{\beta r} + \omega_r \cdot \Phi_{\alpha r} + \dfrac{d\Phi_{\beta r}}{dt} \end{cases}$$

Référentiel lié au rotor : *Dans ce cas,* $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$, *donc* $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$. *Les équations deviennent :*

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot I_{xs} - \omega \cdot \Phi_{ys} + \dfrac{d\Phi_{xs}}{dt} \\ V_{ys} = R_s \cdot I_{ys} + \omega \cdot \Phi_{xs} + \dfrac{d\Phi_{ys}}{dt} \\ V_{xr} = R_r \cdot I_{xr} + \dfrac{d\Phi_{xr}}{dt} \\ V_{yr} = R_r \cdot I_{yr} + \dfrac{d\Phi_{yr}}{dt} \end{cases}$$

Référentiel lié au champ tournant : *Ce référentiel est défini par une vitesse angulaire* $\omega = \omega_s$. *Dans cette configuration, les grandeurs statoriques et rotoriques deviennent constantes en régime permanent. Cela en fait un choix privilégié pour l'analyse et la commande des machines. Le modèle de la MADA s'exprime alors dans le repère de Park associé au champ tournant, selon l'équation suivante [13] :*

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases}$$

II.6.5.7 Mise sous forme d'équations d'état

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équations d'état, nous choisissons dans ce qui suit le vecteur d'état suivant :

$x = \begin{bmatrix} \Phi_{ds} & \Phi_{qs} & i_{dr} & i_{qr} & \omega \end{bmatrix}^T$ *et les grandeurs* V_{dr}, V_{qr} *comme variables de commande [7].*

Le système dynamique s'écrit alors :

$$\begin{cases} \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + V_{ds} \\ \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + V_{qs} \\ \dfrac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta p \omega \Phi_{qs} - \beta V_{ds} + \dfrac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \dfrac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \Phi_{qs} + \beta p \omega \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \dfrac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{p\mu}{J}(\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) - \dfrac{1}{J} C_r - \dfrac{f_r}{J}\omega \end{cases}$$

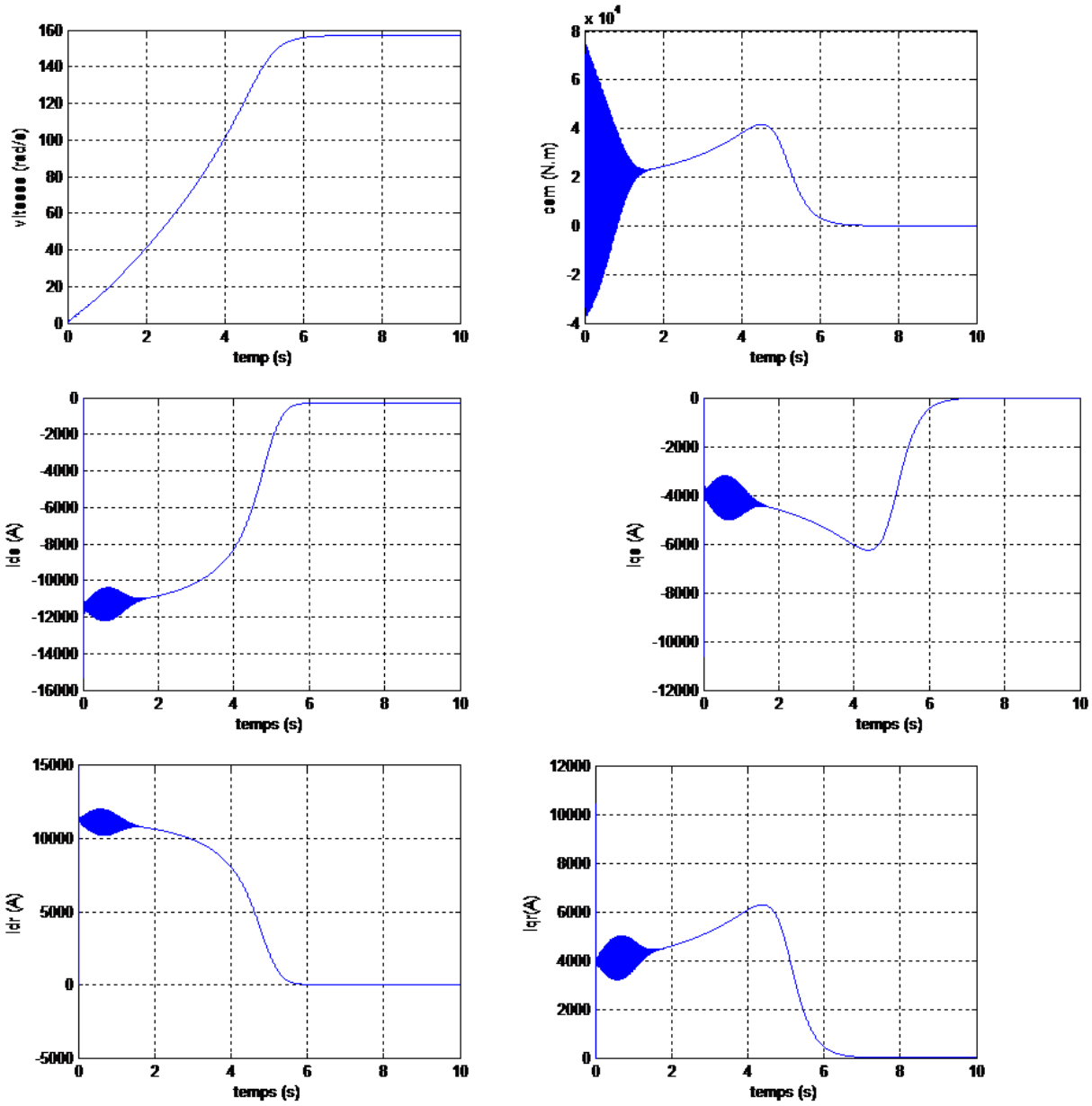
avec les constantes définies comme suit :

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r &= L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r &= \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \\ \beta &= \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu &= \frac{3M}{I L_s} \end{aligned}$$

II.7 Résultats de simulation

II.7.1 Fonctionnement moteur à vide

Dans ce mode de fonctionnement, on applique un couple résistant nul : $C_r = 0$ N.m. La machine fonctionne en moteur sans charge, ce qui permet d'observer son comportement dynamique sans sollicitation mécanique.



II.7.2 Fonctionnement moteur en charge

Dans ce fonctionnement on applique une couple résistant positive (Cr=9550N.m) à l'instant (t=7.5s).

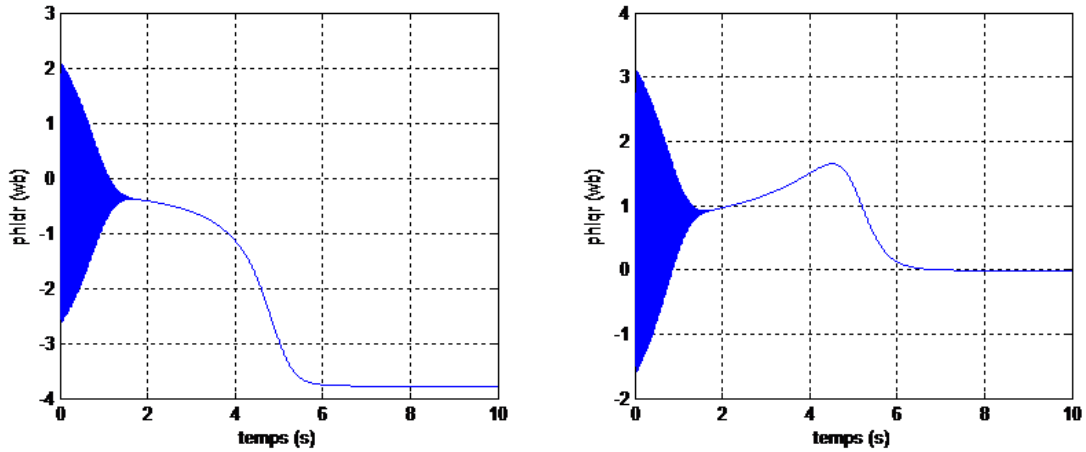
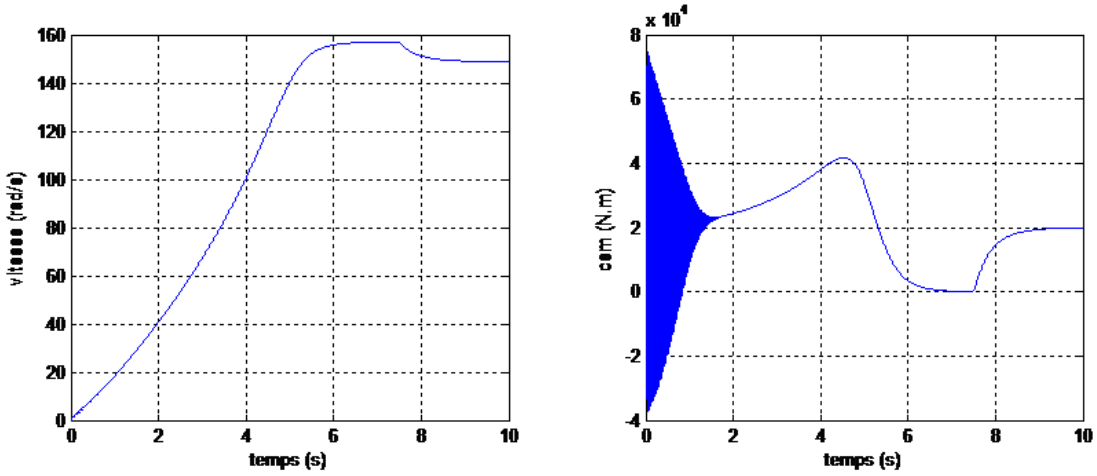


FIGURE II.13 – Fonctionnement moteur à vide (Cr= 0).



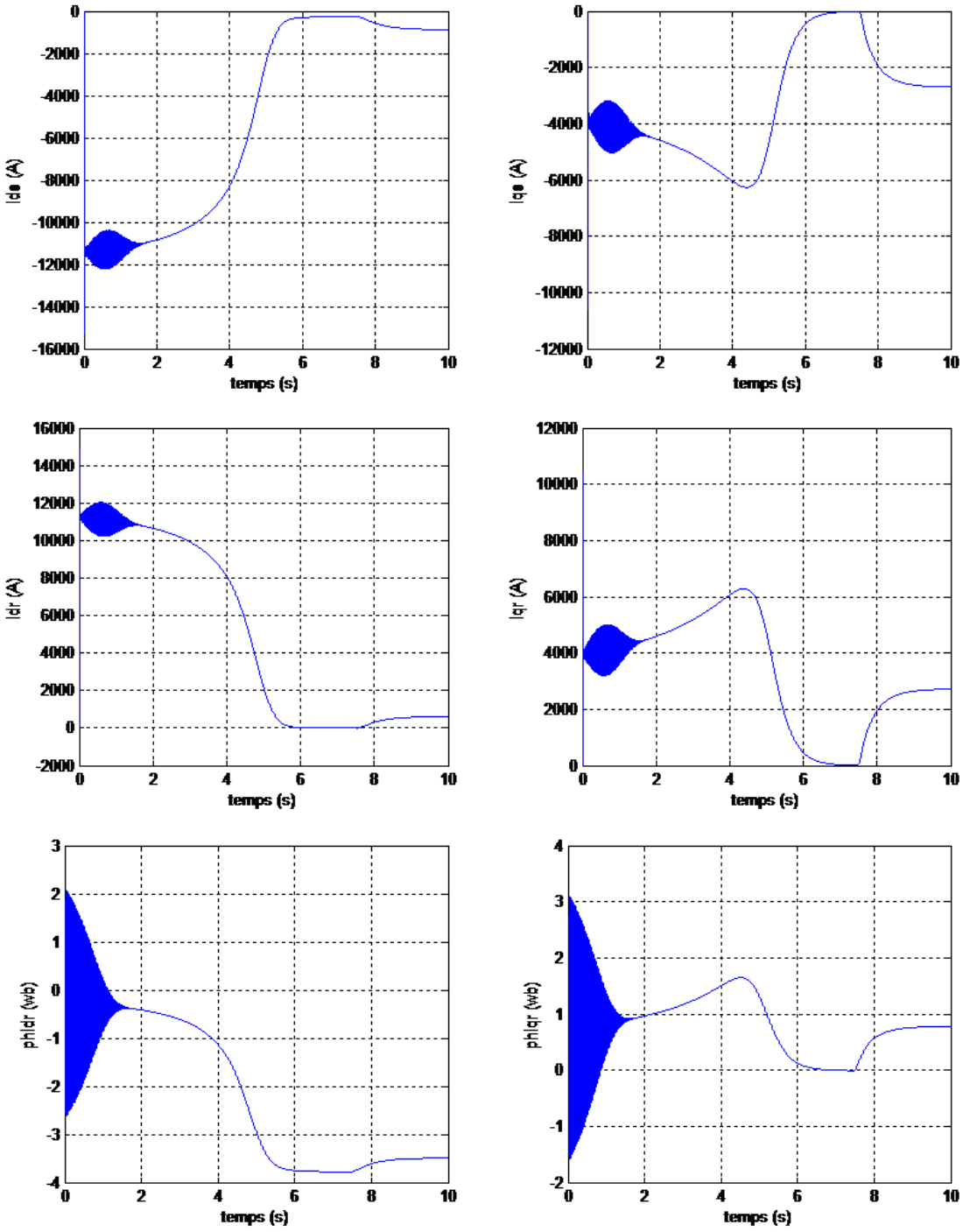


FIGURE II.14 – Fonctionnement moteur en charge (Cr= 75 Nm).

II.7.3 Fonctionnement génératrice

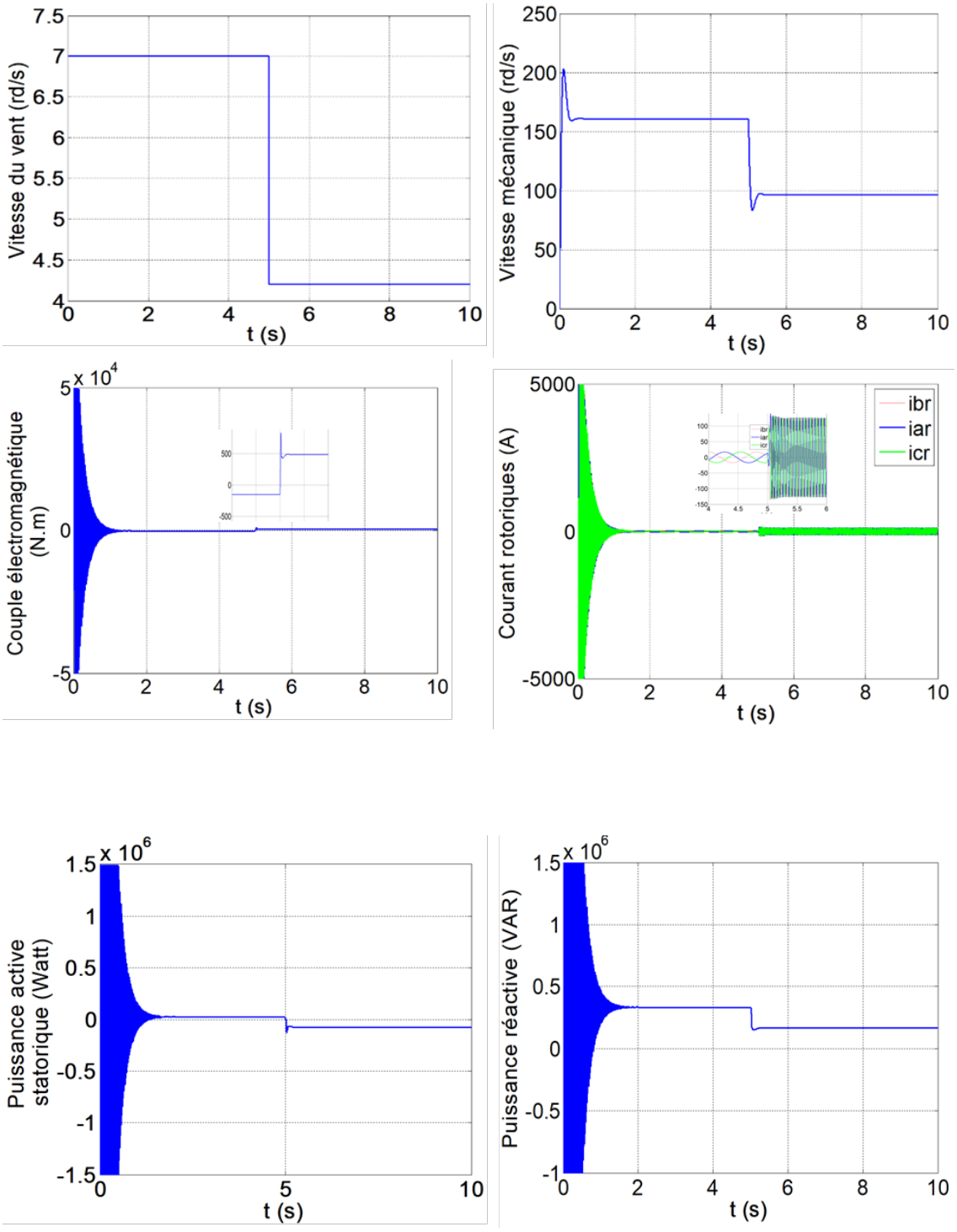


FIGURE II.15 – Fonctionnement génératrice.

II.8 Interprétations des résultats de simulation

Les figures II.8 à II.15 illustrent respectivement le fonctionnement de la machine en mode moteur à vide, en charge, puis en mode génératrice. Les observations suivantes peuvent être faites :

- *Au démarrage, le régime transitoire présente un comportement oscillatoire pour l'ensemble des grandeurs électriques de la machine, ce qui est caractéristique du fonctionnement d'une machine asynchrone classique.*
- *Lors de l'introduction de la charge à l'instant $t = 7{,}5$ s, on observe une augmentation du couple électromagnétique pour compenser le couple de charge C_r. Cette compensation entraîne une chute temporaire de la vitesse, ce qui induit une augmentation des courants et des flux rotoriques, illustrant ainsi le couplage naturel entre le flux et le couple.*
- *La figure II.14, quant à elle, montre le fonctionnement en mode génératrice, avec les remarques suivantes :*
  - *La vitesse du vent est représentative de la vitesse de rotation de la génératrice.*
  - *Les courants rotoriques varient en fonction de la variation de cette vitesse.*
  - *La puissance active statorique devient négative, ce qui confirme le fonctionnement en mode génératrice.*

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la turbine éolienne ainsi que la machine asynchrone à double alimentation (MADA), tout en réduisant la complexité du système grâce à plusieurs hypothèses simplificatrices et à un changement de repère basé sur la transformation de Park.

L'introduction d'une charge provoque une variation de la vitesse (diminution en mode moteur), ce qui met en évidence le fort couplage entre les axes direct (d) et quadrature (q), rendant difficile un contrôle indépendant. Pour pallier cette difficulté, le chapitre suivant introduira la technique de commande vectorielle.

Par ailleurs, on en déduit que le vent constitue un élément essentiel, influençant directement les grandeurs clés caractérisant le fonctionnement de la machine en mode génératrice.

Chapitre III

Alimentation et commande vectorielle du générateur éolien

III.1 Introduction

Après avoir présenté l'état de l'art ainsi que le principe de conversion de l'énergie éolienne en modélisant les éléments clés — la turbine, le multiplicateur mécanique et la génératrice — ce chapitre se concentre dans un premier temps sur la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en s'appuyant sur l'orientation du flux statorique. Ensuite, nous modéliserons l'alimentation électronique du rotor, constituée de deux convertisseurs commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Leur rôle et leur importance seront détaillés, notamment en ce qui concerne la bidirectionnalité de l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau électrique, ainsi que la réduction des distorsions des courants rotoriques, qui peuvent ainsi être synchronisés en phase avec les tensions.

III.1.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour orienter le flux statorique, on utilise le modèle de la machine exprimé dans le repère de Park selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \tag{3.1}$$

III.1.2 Commande vectorielle de la machine

La commande vectorielle est une technique avancée de pilotage des machines électriques, permettant un découplage entre flux et couple grâce à l'orientation optimale des vecteurs correspondants. Ainsi, la machine se comporte dynamiquement comme une machine à courant continu, où le couple est directement lié au courant d'induit.

III.1.2.1 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle est inspiré du fonctionnement des machines à courant continu, historiquement privilégiées pour le contrôle à vitesse variable. Dans ce cas, le flux est commandé via le courant d'excitation et le couple via le courant d'induit (voir Figure III.1).

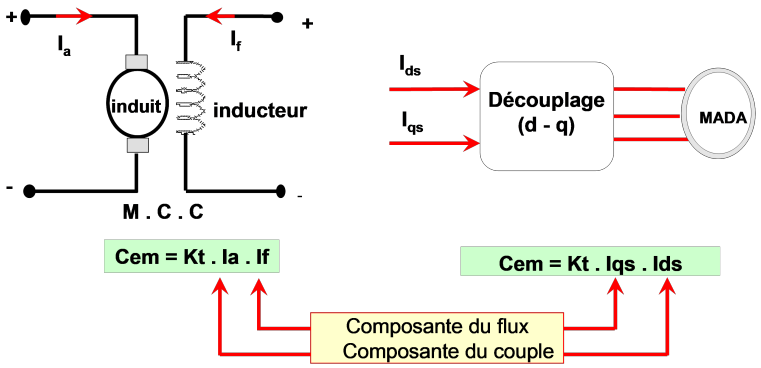


FIGURE III.1 – Principe du pilotage découplé du couple d'une MCC [4].

L'évolution des technologies des semi-conducteurs et des convertisseurs électroniques a permis la mise en œuvre de nouveaux algorithmes de commande inspirés du modèle des machines à courant alternatif, formulés dans le repère de Park. En orientant le flux statorique ou rotorique selon l'un des deux axes de ce repère, il devient possible de découpler certaines grandeurs internes de la machine, tant en régime transitoire qu'en régime permanent. Cela confère à la machine une meilleure performance dans la conversion d'énergie :

- *En mode moteur, grâce au contrôle indépendant du flux et du couple .*
- *En mode générateur, via le contrôle séparé des puissances active et réactive.*

On oriente le flux statorique selon l'axe d, ce qui impose que la composante suivant l'axe q soit nulle ($\Phi_{qs} = 0$ et $\Phi_{ds} = \Phi_s$). Le modèle de la machine se simplifie alors comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \tag{3.2}$$

Les expressions des flux statoriques deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \tag{3.3}$$

D'où, les courants statoriques en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\dfrac{M}{L_s} i_{dr} + \dfrac{\Phi_{ds}}{L_s} \\ i_{qs} = -\dfrac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \tag{3.4}$$

En remplaçant dans les équations des flux rotoriques, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \sigma i_{dr} + \dfrac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \sigma i_{qr} \end{cases} \tag{3.5}$$

En intégrant les équations des courants statoriques et des flux rotoriques dans le système (**??**)*, le modèle devient :*

$$\begin{cases} v_{ds} = \dfrac{R_s}{L_s} \Phi_{ds} - \dfrac{R_s}{L_s} M i_{dr} - \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = -\dfrac{R_s}{L_s} M i_{qr} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \dfrac{di_{dr}}{dt} + e_d \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \dfrac{di_{qr}}{dt} + e_\Phi + e_q \end{cases} \tag{3.6}$$

avec :

$$\begin{cases} e_d = -L_r \omega_{gl} \sigma i_{qr} + \dfrac{M}{L_s} \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ e_\Phi = \dfrac{M}{L_r} \omega_{gl} \Phi_{ds} \\ e_q = L_r \omega_{gl} \sigma i_{dr} \end{cases} \tag{3.7}$$

Les équations des courants rotoriques deviennent alors :

$$\begin{cases} \dfrac{di_{dr}}{dt} = \dfrac{1}{L_r\sigma}(v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \dfrac{di_{qr}}{dt} = \dfrac{1}{L_r\sigma}(v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q - e_\Phi) \end{cases} \tag{3.8}$$

Le couple électromagnétique s'exprime par :

$$T_{em} = -\frac{3}{2}p\frac{M}{L_s}\Phi_{ds} i_{qr} \tag{3.9}$$

D'où, on peut isoler la composante i_{qr} :

$$i_{qr} = -\frac{2}{3}\cdot\frac{L_s}{pM\Phi_{ds}}T_{em} \tag{3.10}$$

En général, dans les génératrices éoliennes de forte puissance, les enroulements statoriques ont une faible résistance. Ainsi, on peut négliger R_s et simplifier les équations des tensions statoriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \tag{3.11}$$

Si l'on suppose que le réseau électrique est stable, avec une tension simple v_s et une pulsation ω_s supposée constante, cela conduit à un flux statorique constant ϕ_{ds}, avec une variation nulle en régime établi. Ceci permet d'écrire :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \tag{3.12}$$

Comme l'indique la figure III.2, le stator de la génératrice est directement connecté au réseau, tandis que son rotor est alimenté par le réseau via un convertisseur statique permettant le redressement et l'ondulation de la tension.

Afin de garantir une tension continue stable à l'onduleur, un bus continu intermédiaire est mis en place. Ce dernier est alimenté par un redresseur connecté à un transformateur, lui-même raccordé à un réseau triphasé supposé symétrique, avec des tensions d'amplitude et de fréquence constantes et imposées. Après le redressement, un étage de filtrage est indispensable pour lisser et stabiliser la tension continue. Le redressement peut être assuré par deux types de convertisseurs statiques, en fonction du mode de commutation des interrupteurs, qu'elle soit naturelle ou forcée.

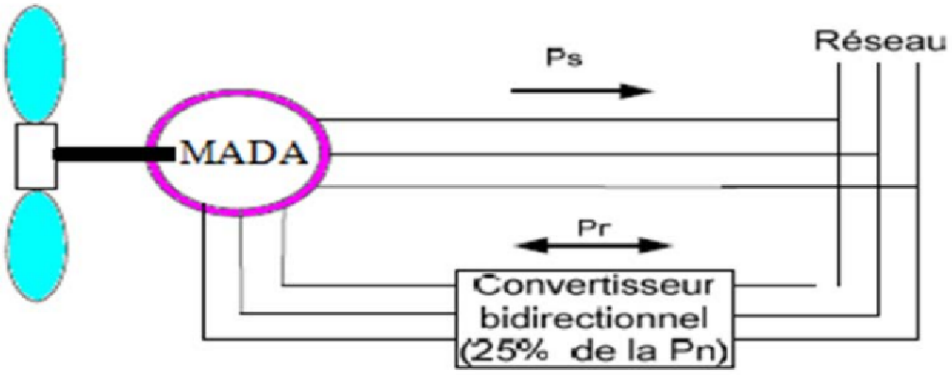


FIGURE III.2 – Représentation de la MADA et de son système d'alimentation au rotor.

III.1.2.2 Convertisseurs à commutation forcée

Il s'agit d'une autre catégorie de convertisseurs (voir figure II.10), construits à partir de transistors de puissance tels que les bipolaires, les MOSFET ou les IGBT. Ces dispositifs sont adaptés à des puissances pouvant atteindre plusieurs centaines de kilowatts, avec des fréquences de commutation généralement supérieures ou égales à 10 kHz.

Pour des puissances plus élevées — de l'ordre de plusieurs centaines de kW —, on utilise fréquemment des GTO (thyristors à gâchette désactivable), mais à des fréquences de commutation plus faibles, typiquement comprises entre 500 Hz et 1000 Hz [14].

Ces convertisseurs sont pilotés par une commande en modulation de largeur d'impulsions (MLI), qui permet une circulation bidirectionnelle de la puissance. Cette capacité est essentielle pour permettre à la machine de fonctionner aussi bien en régime hypo-synchrone qu'en régime hyper-synchrone. De plus, la MLI offre une alimentation en mode haché, ce qui simplifie le filtrage et permet de réduire la taille des composants du filtre associé.

Le convertisseur est structuré en trois bras, chacun constitué de deux paires d'interrupteurs supposés idéaux, c'est-à-dire à commutation instantanée et sans chute de tension. Les commandes de ces interrupteurs sont complémentaires. Chaque interrupteur est formé d'un transistor associé à une diode de récupération, et est représenté par deux états de fonctionnement complémentaires.

À partir de ce schéma, on peut déduire les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_1 - v_{1n} + v_{2n} - v_2 = 0 \\ v_1 - v_{1n} + v_{3n} - v_3 = 0 \end{cases} \tag{3.13}$$

En additionnant ces équations, on obtient :

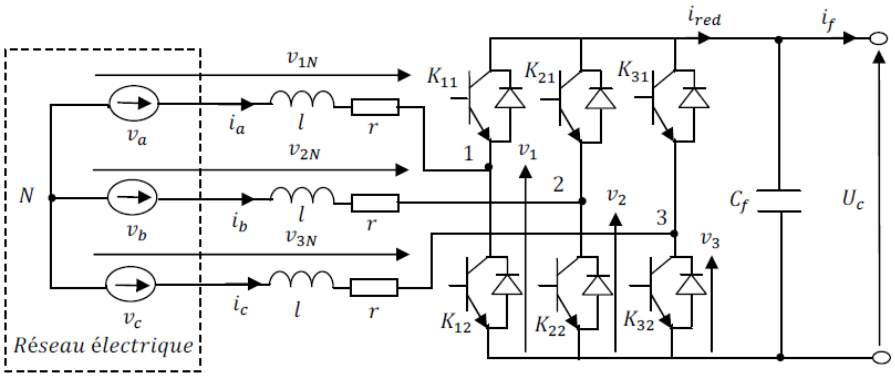


FIGURE III.3 – Convertisseur AC–DC triphasé à commutation forcée.

$$2v_1 - 2v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} - v_2 - v_3 = 0 \tag{3.14}$$

Pour un réseau triphasé équilibré, on a :

$$v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} = 0 \tag{3.15}$$

Dans la relation précédente, on peut remplacer $v_{2n}+v_{3n}$ *par* $-v_{1n}$*, ce qui permet d'exprimer les tensions de phase par rapport au point neutre global* N *comme suit :*

$$\begin{cases} v_{1N} = \dfrac{1}{3}(2v_1 - v_2 - v_3) \\ v_{2N} = \dfrac{1}{3}(-v_1 + 2v_2 - v_3) \\ v_{3N} = \dfrac{1}{3}(-v_1 - v_2 + 2v_3) \end{cases} \tag{3.16}$$

Selon la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs K_{ij}*, les tensions de branche peuvent être égales à* U_c *ou à* 0*. On introduit les variables* S_{11}*,* S_{21} *et* S_{31} *qui valent 1 si l'interrupteur* K_{i1} *est fermé, sinon 0. L'équation* (3.16) *devient :*

$$\begin{bmatrix} v_{1N} \\ v_{2N} \\ v_{3N} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Le courant redressé peut alors s'écrire :

$$i_{red} = S_{11}i_a + S_{21}i_b + S_{31}i_c \tag{3.18}$$

Les variables de commande f_{i1} *sont issues d'une commande en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), qui permet de définir les intervalles de conduction des interrupteurs*

tout en assurant un réglage indépendant des valeurs moyennes des tensions par période de commutation. Les instants de commutation sont déterminés par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie i_{abc} et leurs références i_{abc}^{ref}.

Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

— *Si $i_a^{ref} - i_a \geq \Delta i$ alors $S_{11} = 0$; si $i_a^{ref} - i_a \leq -\Delta i$ alors $S_{11} = 1$.*

— *Si $i_b^{ref} - i_b \geq \Delta i$ alors $S_{21} = 0$; si $i_b^{ref} - i_b \leq -\Delta i$ alors $S_{21} = 1$.*

— *Si $i_c^{ref} - i_c \geq \Delta i$ alors $S_{31} = 0$; si $i_c^{ref} - i_c \leq -\Delta i$ alors $S_{31} = 1$.*

Les courants absorbés du réseau i_{abc} s'expriment alors par :

$$\begin{cases} L\dfrac{di_a}{dt} = v_a - v_{1N} - Ri_a = v_a - U_c \cdot \dfrac{2S_{11} - S_{21} - S_{31}}{3} - Ri_a \\ L\dfrac{di_b}{dt} = v_b - v_{2N} - Ri_b = v_b - U_c \cdot \dfrac{-S_{11} + 2S_{21} - S_{31}}{3} - Ri_b \\ L\dfrac{di_c}{dt} = v_c - v_{3N} - Ri_c = v_c - U_c \cdot \dfrac{-S_{11} - S_{21} + 2S_{31}}{3} - Ri_c \end{cases} \tag{3.19}$$

La tension aux bornes du condensateur de filtrage s'écrit :

$$C_f \frac{dU_c}{dt} = S_{11}i_a + S_{21}i_b + S_{31}i_c - i_f \tag{3.20}$$

III.1.2.3 Commande vectorielle du convertisseur à commutation forcée

La commande de ce convertisseur repose sur un asservissement de la tension de sortie U_c et des courants d'entrée i_{abc}. Ces courants sont transformés dans un repère tournant (d, q) synchronisé avec la tension du réseau. Ce changement de repère permet de découpler les composantes de puissance active et réactive échangées entre le réseau et le rotor.

Ainsi :

— *La composante i_q est fixée à zéro pour garantir un facteur de puissance unitaire (puissance réactive nulle, faibles harmoniques).*

— *La composante i_d est régulée selon l'écart entre la tension U_c mesurée sur le bus continu et sa valeur de référence.*

Un régulateur PI reçoit cette erreur en entrée pour ajuster dynamiquement i_d. Ce convertisseur, commandé en MLI, constitue avec l'onduleur côté rotor une structure en double pont MLI, capable d'échanges bidirectionnels de puissance avec des perturbations harmoniques réduites.

III.1.2.4 Modélisation du convertisseur MLI côté rotor

Un onduleur autonome, qu'il soit à commande adjacente ou à MLI, est un convertisseur permettant de transformer une source continue en une source alternative, à fréquence variable ou fixe. Dans les applications de forte puissance, ce type de convertisseur est constitué de transistors ou de thyristors GTO, notamment dans les entraînements à vitesse variable. Pour des puissances plus modestes, on privilégie des transistors à commutation rapide [15, 16].

L'onduleur utilisé ici est composé de trois branches, de structure identique à celle du redresseur commandé (voir figure III.4).

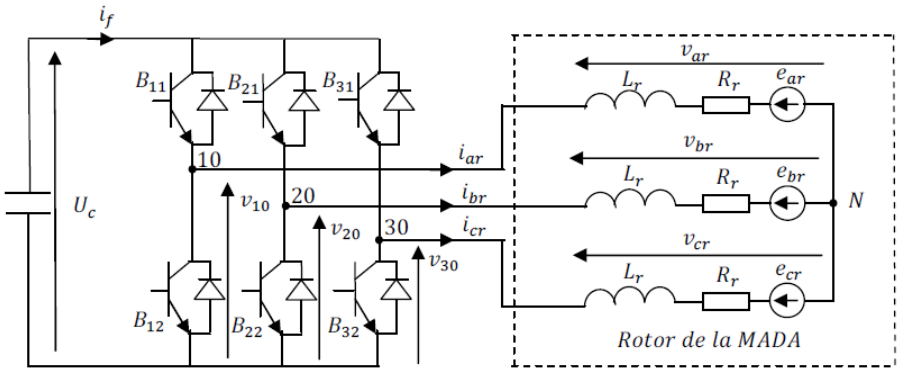


FIGURE III.4 – Schéma de principe de l'onduleur triphasé.

Comme pour le redresseur à commutation forcée, on introduit des variables supplémentaires représentant l'état des interrupteurs, valant 1 lorsqu'ils sont fermés et 0 lorsqu'ils sont bloqués. On en déduit alors l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Le courant filtré peut s'écrire :

$$i_f = f_{11} i_{ar} + f_{21} i_{br} + f_{31} i_{cr} \tag{3.22}$$

Les variables de commande f_{i1} correspondent également à des signaux logiques obtenus par l'application de la technique de commande à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Dans ce cas, les instants de commutation sont définis de manière similaire à ceux du redresseur commandé en courant, en effectuant une comparaison par hystérésis entre les courants de sortie i_{abcr} et les courants de référence $i_{abcrref}$.

Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

— *Si* $i_{arref} - i_{ar} \geq \Delta i$ *alors* $f_{11} = 1$ *; si* $i_{arref} - i_{ar} \leq -\Delta i$ *alors* $f_{11} = 0$.
— *Si* $i_{brref} - i_{br} \geq \Delta i$ *alors* $f_{21} = 1$ *; si* $i_{brref} - i_{br} \leq -\Delta i$ *alors* $f_{21} = 0$.
— *Si* $i_{crref} - i_{cr} \geq \Delta i$ *alors* $f_{31} = 1$ *; si* $i_{crref} - i_{cr} \leq -\Delta i$ *alors* $f_{31} = 0$.

III.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre (voir Figure 3.5), le fonctionnement des turbines à vitesse variable se divise en quatre zones, illustrées dans le cas d'une éolienne de 1,5 MW :

1. *La première zone correspond à la phase de démarrage.*
2. *La deuxième concerne l'extraction maximale de puissance, également appelée MPPT.*
3. *La troisième zone vise à limiter la vitesse autour de la valeur nominale.*
4. *Enfin, la quatrième est dédiée à la limitation de la puissance générée.*

Dans notre étude, nous nous concentrons sur la deuxième zone, celle de l'extraction maximale de puissance en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant constant, l'ajustement se fait en contrôlant le couple électromagnétique de la génératrice. Cela permet de réguler la vitesse de rotation du rotor de manière à rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne λ de sa valeur optimale, et ainsi maximiser le coefficient de puissance C_p.

III.2.1 Contrôle de la vitesse

Dans cette partie, on cherche à maintenir la vitesse spécifique à son optimum notée λ_{opt}. Une boucle de vitesse est alors mise en œuvre, et sa vitesse de référence Ω_{eref} est déduite de la relation :

$$\Omega_{eref} = \Omega_{tref} \cdot G \tag{3.23}$$

avec :

$$\Omega_{tref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \tag{3.24}$$

Cette boucle est équipée d'un régulateur de vitesse, permettant de l'asservir en permanence à sa valeur de référence et de réduire l'influence du couple éolien, qui agit comme

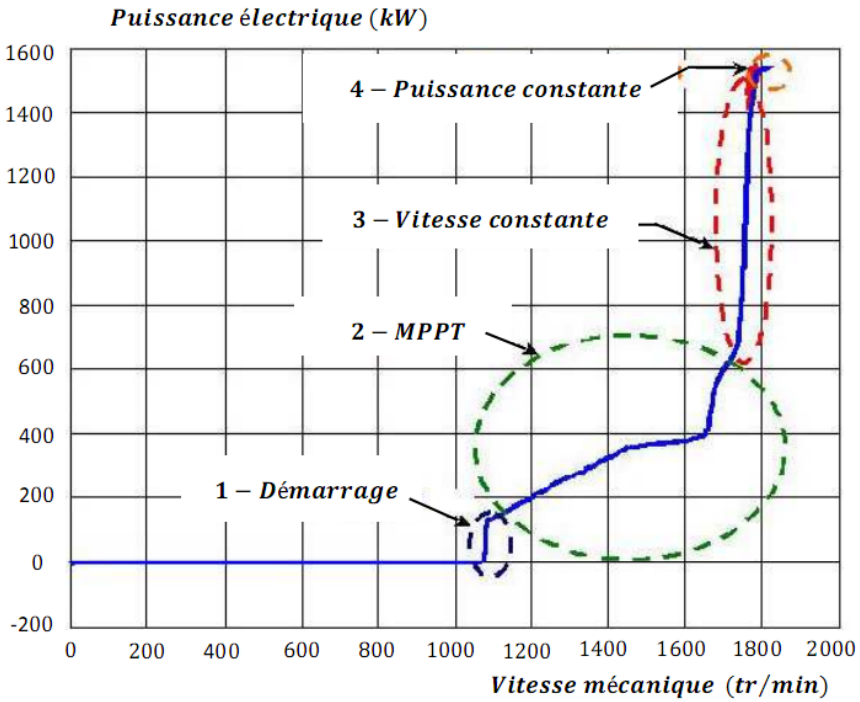


FIGURE III.5 – La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1,5 MW [5].

une perturbation. Divers correcteurs de vitesse peuvent être envisagés à cet effet, mais nous nous concentrons ici sur un correcteur proportionnel-intégral (PI), comme illustré dans la Figure III.6.

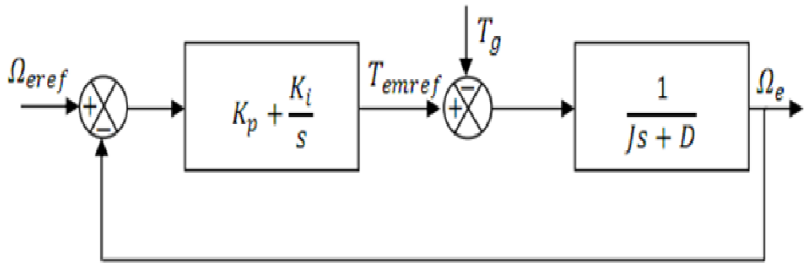


FIGURE III.6 – Schéma bloc simplifié de la boucle de vitesse munie d'un correcteur PI.

Étant donné que l'action intégrale du régulateur PI permet de compenser en régime permanent la perturbation induite par la variation du couple éolien, il est alors possible d'en déduire une relation pour la fonction de transfert en boucle ouverte, comme suit :

$$T(s) = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + Ds} \tag{3.25}$$

D'où, en boucle fermée, la fonction de transfert devient :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s)} = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + (D + K_p)s + K_i} \tag{3.26}$$

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

$$G_s(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{3.27}$$

il suffit d'identifier l'équation (3.26) à (3.27), ce qui donne l'égalité :

$$\frac{K_p s + K_i}{Js^2 + (D + K_p)s + K_i} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{3.28}$$

Ce qui permet d'en déduire :

$$K_p \tau s^2 (K_i \tau + K_p)s + K_i = Js^2 + (D + K_p)s + K_i \tag{3.29}$$

D'où :

$$\begin{cases} K_p = \dfrac{J}{\tau} \\ K_i = \dfrac{D}{\tau} \end{cases} \tag{3.30}$$

III.2.2 Optimisation électronique de la conversion énergétique

À partir de la boucle de la vitesse illustrée dans la Figure III.6, il est observé que la machine asynchrone à double alimentation (MADA) n'intervient dans le système que sous forme de couple d'inertie et de couple de frottement, sans présenter de dynamique propre.

Cependant, comme toutes les machines électriques, la MADA nécessite un temps de réponse suffisant pour permettre à son système de commande électronique de l'ajuster à la vitesse souhaitée par l'éolienne. C'est pourquoi il est nécessaire de présenter la boucle de commande différemment, en mettant en évidence l'alimentation dans la boucle, comme illustré dans la Figure III.7.

III.2.3 Résultats de la simulation

Les résultats de la commande vectorielle appliquée à la MADA sont présentés dans la Figure III.8. Ces résultats permettent de valider l'efficacité de la stratégie de commande adoptée et de vérifier la conformité du comportement du système avec les objectifs de suivi de puissance optimale et de stabilité dynamique.

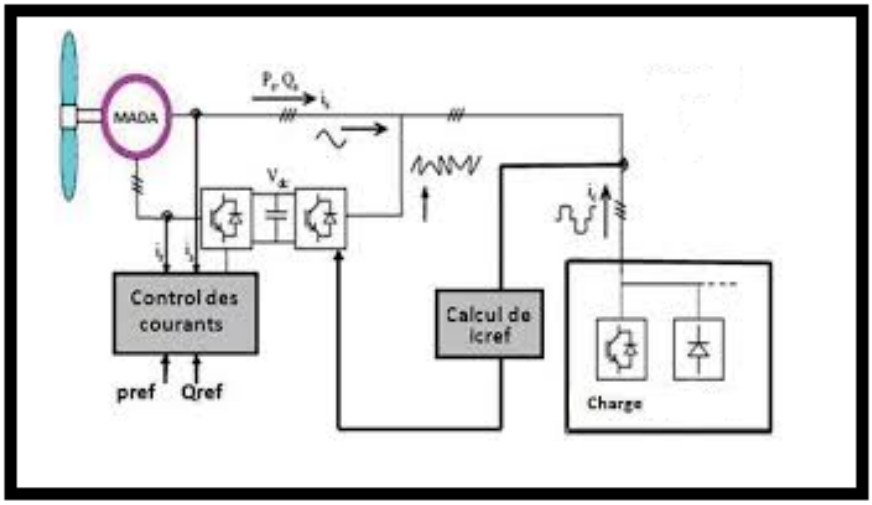
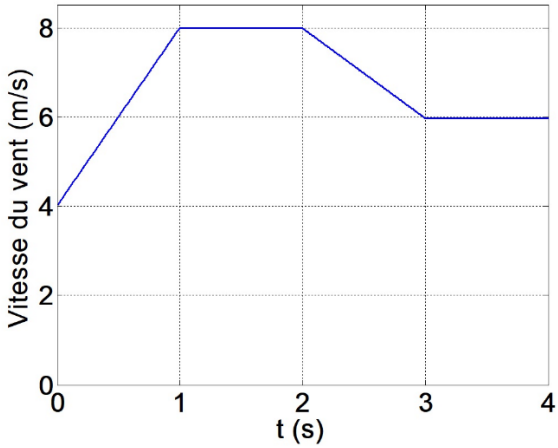
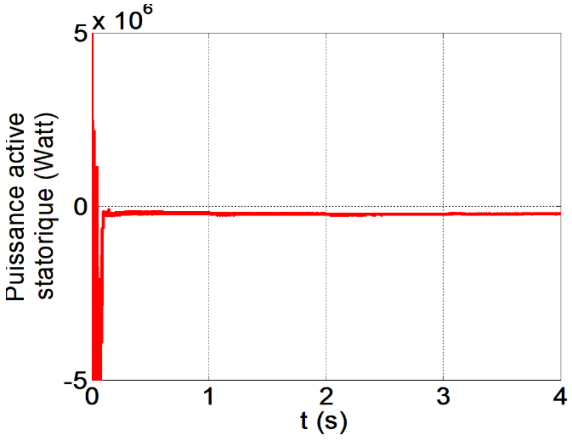
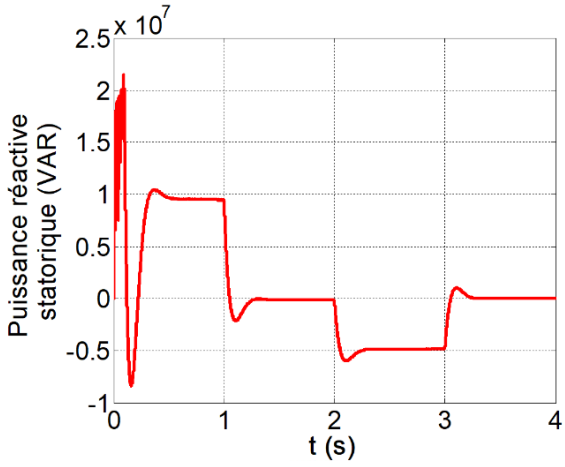


FIGURE III.7 – Représentation schématique de la commande par le rotor de la MADA d'un système éolien.







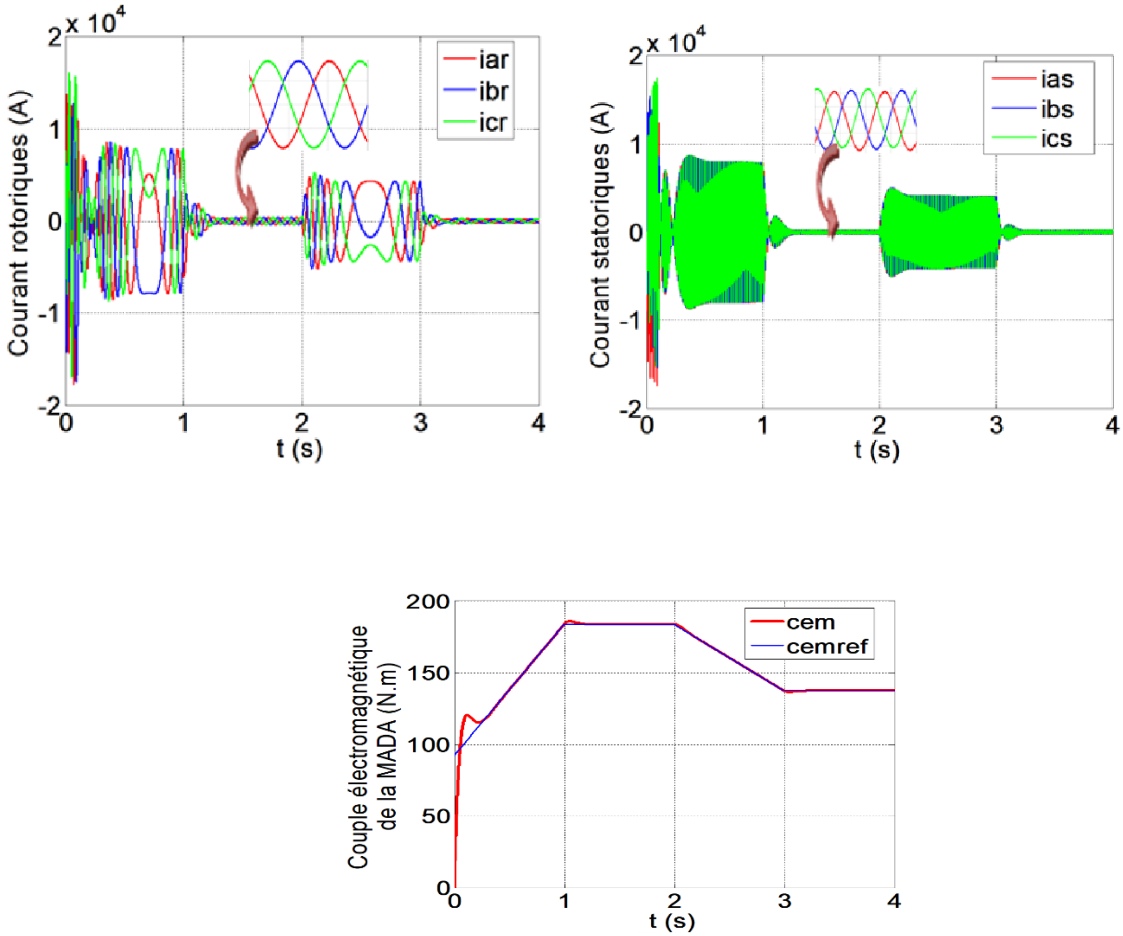


FIGURE III.8 – Résultats de la commande vectorielle de la MADA.

III.2.4 Interprétation des résultats

La Figure III.8 illustre les résultats de la simulation de la commande vectorielle appliquée à la MADA. On peut en tirer les observations suivantes :

- *La vitesse de la MADA suit fidèlement celle du vent, reflétant ainsi son comportement.*
- *Une augmentation de la vitesse du vent entraîne une hausse de la puissance active statorique, accompagnée d'une augmentation des courants I^s_{abc}, I^r_{abc} et I_{ar}.*
- *Les courants I^s_{abc} et I^r_{abc} conservent une forme sinusoïdale, avec un déphasage de* 120°.

III.2.5 Contrôle direct et indirect de puissance

Dans le repère biphasé de Park, les puissances active et réactive statoriques de la machine s'expriment par les équations suivantes :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \tag{3.31}$$

Avec $V_{ds} = 0$*, et en remplaçant* I_{ds} *et* I_{qs} *par leurs expressions, on obtient :*

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \tag{3.32}$$

Pour exprimer les puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par leurs équivalents :

$$\begin{cases} P = -\dfrac{V_s M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -\dfrac{V_s M}{L_s} I_{dr} + \dfrac{V_s \phi_s}{L_s} \end{cases} \tag{3.33}$$

À partir des équations de flux, on a :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \tag{3.34}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M *constante, l'équation* (3.33) *montre que la puissance active* P *statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature* I_{qr}*, tandis que la puissance réactive* Q *dépend de* I_{dr} *à une constante près.*

Pour établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques, on obtient les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \dfrac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \tag{3.35}$$

En remplaçant ces expressions dans l'équation des flux, on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) \dfrac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) \dfrac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g\dfrac{M V_s}{L_s} \end{cases} \tag{3.36}$$

où g *désigne le glissement de la machine asynchrone.*

À partir de ces équations, il est possible de représenter la MADA sous forme d'un schéma bloc, comme illustré dans la Figure III.9, où les tensions rotoriques sont les entrées et les puissances statoriques, les sorties. On observe que les relations établies suivent une dynamique de premier ordre.

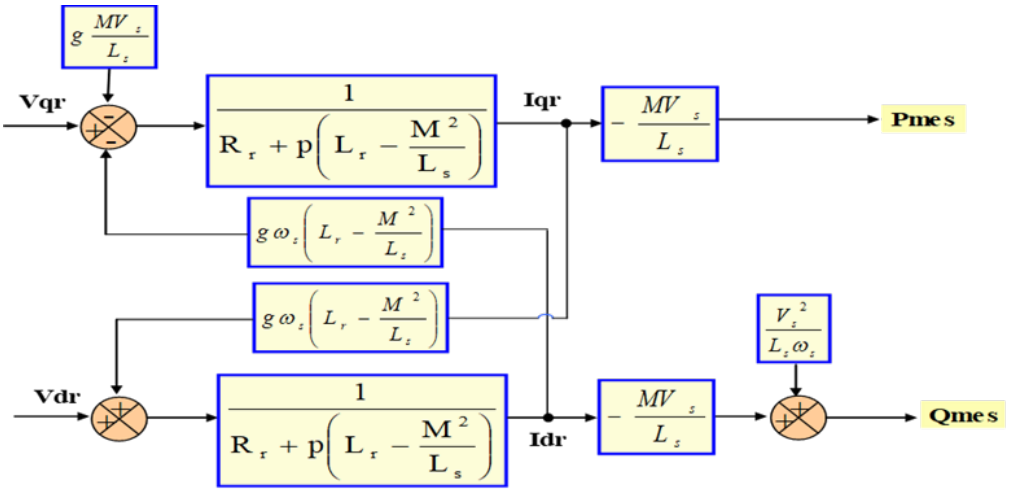


FIGURE III.9 – Schéma bloc de la MADA.

En raison de la faible valeur du glissement g, une commande vectorielle peut être mise en œuvre sans difficulté majeure, permettant de piloter indépendamment les axes d et q via leurs propres régulateurs.

Deux stratégies de commande peuvent être envisagées [13] :

- ***Méthode directe** : consiste à négliger les termes de couplage et à concevoir un régulateur indépendant pour chaque axe. Les régulateurs de puissance agissent directement sur les tensions rotoriques.*
- ***Méthode indirecte** : prend en compte les termes de couplage et les compense à l'aide d'un système à deux boucles. Elle permet de contrôler à la fois les puissances et les courants rotoriques, améliorant la protection de la machine et autorisant l'introduction de références harmoniques pour filtrage actif.*

III.2.6 Contrôle direct de puissance

Dans cette section, nous exposons la stratégie de régulation indépendante des puissances active et réactive de la machine, en nous appuyant sur les équations précédentes. On a établi un lien entre la puissance active P et la composante de tension V_{qr}, ainsi qu'entre la puissance réactive Q et la composante V_{dr}.

III.2.6.1 Mise en place de la régulation

Afin de déterminer les éléments nécessaires à la boucle de régulation, nous nous appuyons sur le schéma bloc du système à réguler présenté en figure III.10. En examinant la relation

entre les courants rotoriques et les puissances statoriques, on observe l'apparition du terme $\frac{MV_s}{L_s}$.

Dans notre analyse, l'éolienne est supposée connectée à un réseau de forte puissance et suffisamment stable, ce qui rend ce terme constant. Par conséquent, aucun régulateur ne sera introduit entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour assurer la régulation de la machine, nous mettons en place une boucle de régulation pour chaque puissance, chacune associée à un régulateur indépendant. Par ailleurs, les termes de perturbation identifiés dans le schéma bloc de la figure III.10 seront compensés.

Compte tenu de la faible valeur du glissement, les effets de couplage entre les deux axes de commande seront négligés. On obtient ainsi une stratégie de commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, illustrée en figure III.10 [17, 18, 11].

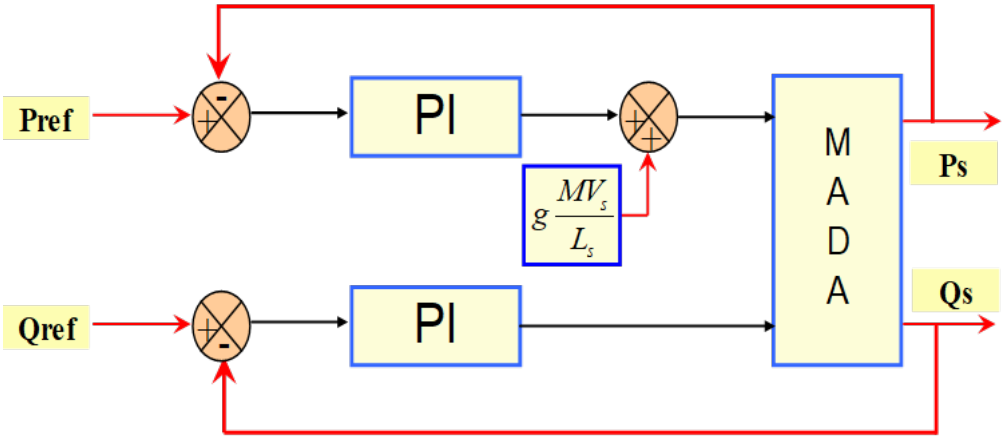
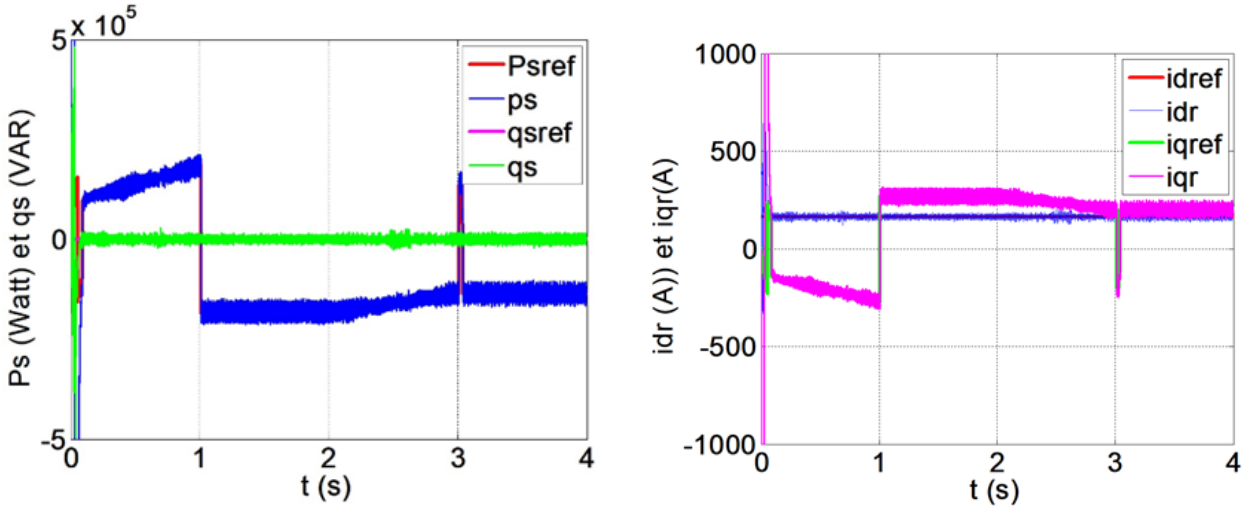


FIGURE III.10 – Schéma bloc de la commande directe

III.2.6.2 Simulation et interprétation des résultats



(a) Puissance active et réactive statorique

(b) Courant *dq* rotorique

FIGURE III.11 – Résultats de la commande directe

On observe que la génératrice suit efficacement les variations de puissance, tant pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, un phénomène notable est l'interruption du couplage entre les axes de commande direct (d) et quadrature (q). En effet, une variation imposée sur l'une des puissances (active ou réactive) peut induire de faibles oscillations sur l'autre, perturbant ainsi l'équilibre du système.

III.2.7 Contrôle indirect de puissance

La méthode de commande indirecte repose sur la reconstitution, en sens inverse, du schéma bloc du système à réguler [18, 19, 11, 20, 21]. Cette approche permet d'élaborer un schéma bloc exprimant les tensions en fonction des puissances, aboutissant à un modèle équivalent à celui de la machine, mais inversé. Ainsi, la commande indirecte intègre tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA.

On commence donc par exprimer la puissance statorique en fonction des courants rotoriques, puis on établit les expressions des tensions rotoriques en fonction de ces mêmes courants.

III.2.7.1 Commande sans boucle de puissance

En conservant les mêmes hypothèses concernant la stabilité du réseau, on met en place le système de régulation illustré à la figure III.12. Ce schéma introduit une boucle de régulation des courants rotoriques, dont les consignes sont directement déterminées à partir des puissances que l'on souhaite imposer à la machine.

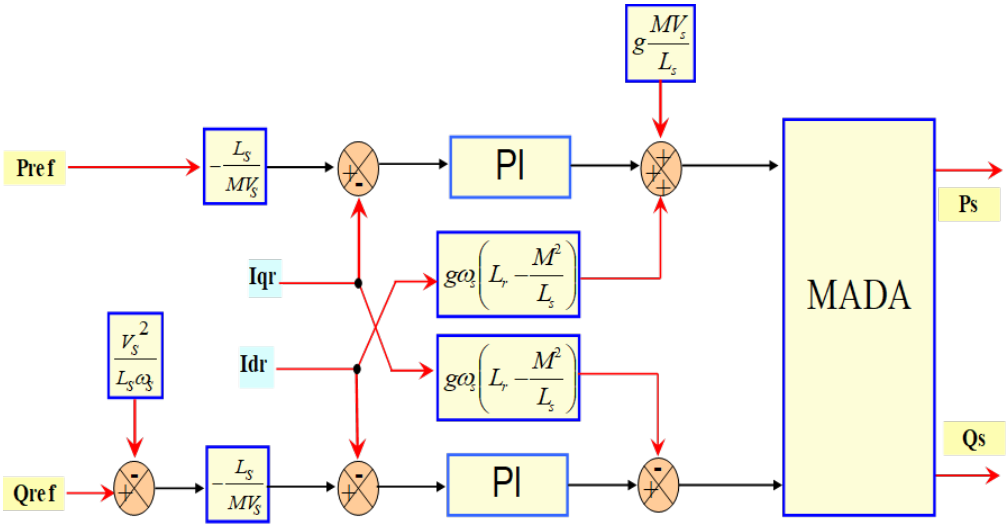
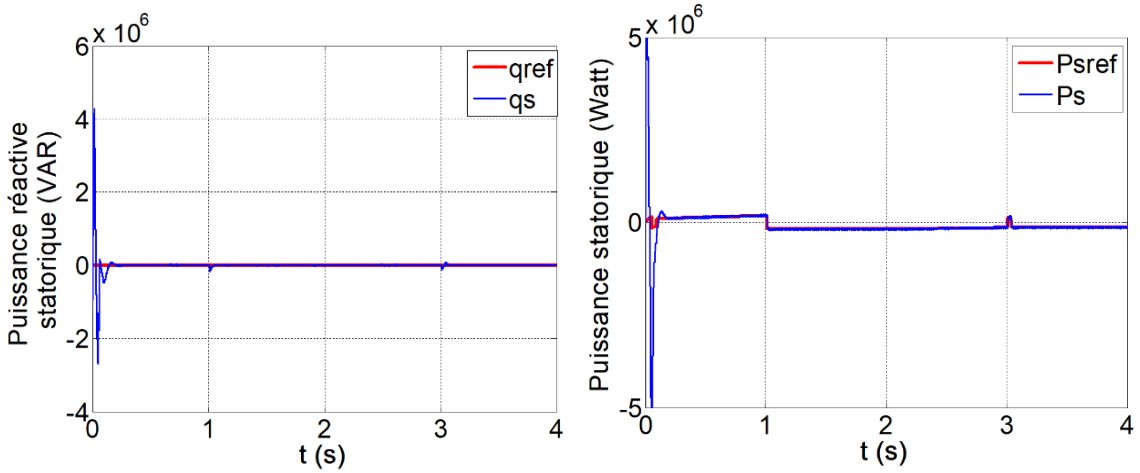


FIGURE III.12 – Schéma bloc de la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas)



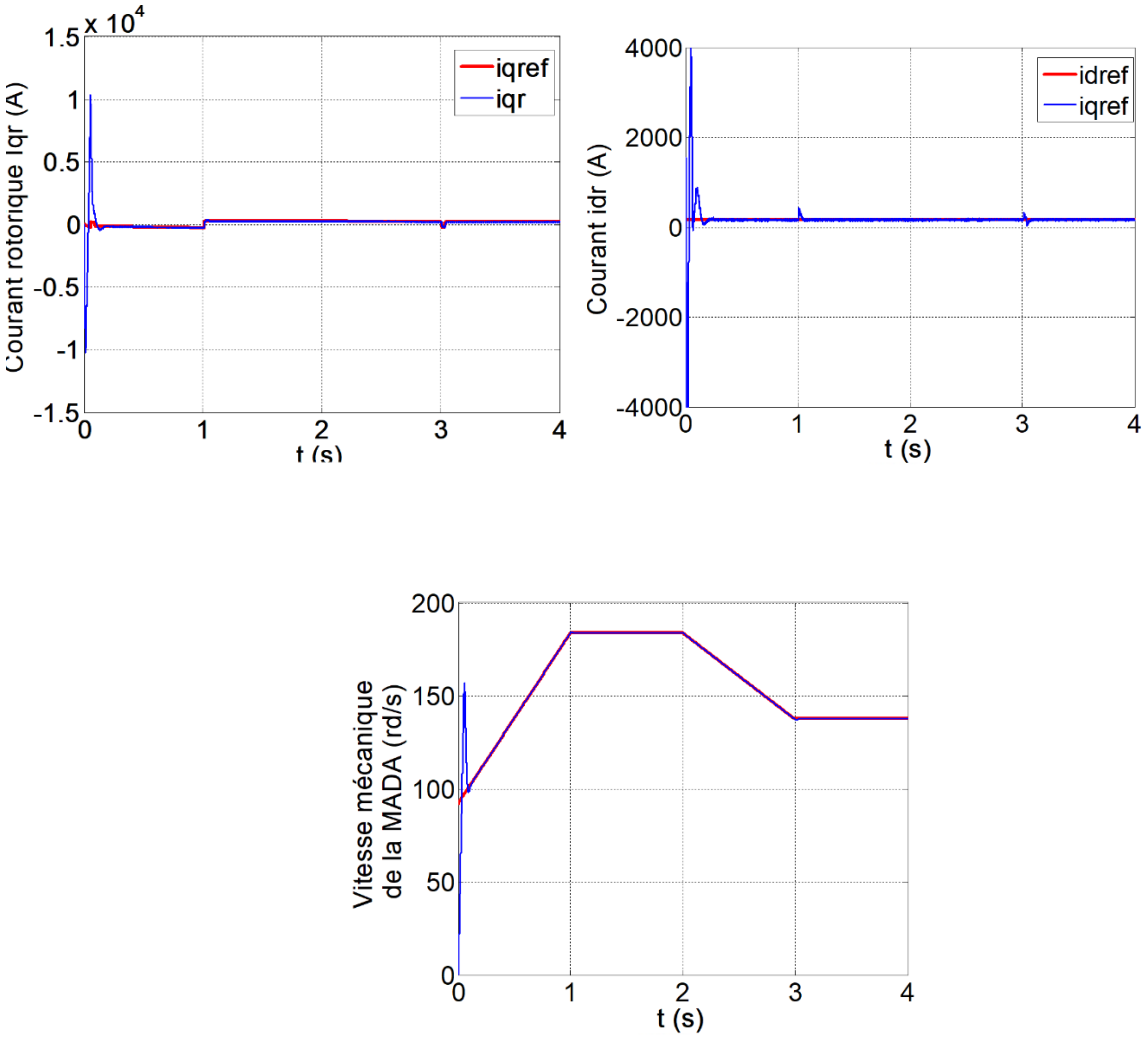


FIGURE III.13 – Résultats de la commande indirecte sans boucle de puissance

Interprétation :

On observe une erreur statique sur la puissance active, principalement due au fait que la régulation ne comporte qu'une seule boucle agissant sur les courants, tandis que les puissances restent en boucle ouverte.

L'un des postulats de notre modèle supposait une tension V_s constante. Or, une variation de la puissance active injectée entraîne inévitablement une légère fluctuation de V_s, en raison des impédances de couplage entre le réseau et l'éolienne. Cette variation, bien que faible, contribue à l'écart observé sur les puissances.

Par ailleurs, la résistance statorique — négligée dans notre modélisation — influe également sur les puissances, l'erreur étant nettement plus marquée sur la puissance réactive que sur la puissance active.

Enfin, on note la présence d'un couplage entre les axes, dont l'effet reste toutefois moins prononcé que dans le cas de la commande directe.

III.2.7.2 Commande avec boucles de puissance

Pour améliorer la stratégie de commande précédente, une boucle de régulation supplémentaire est introduite au niveau de la puissance. Cette approche permet de supprimer l'erreur statique tout en maintenant les performances dynamiques du système.

Le schéma bloc de la figure III.14 illustre cette architecture, où l'on distingue clairement, pour chaque axe, deux boucles de régulation : l'une dédiée au courant, l'autre à la puissance.

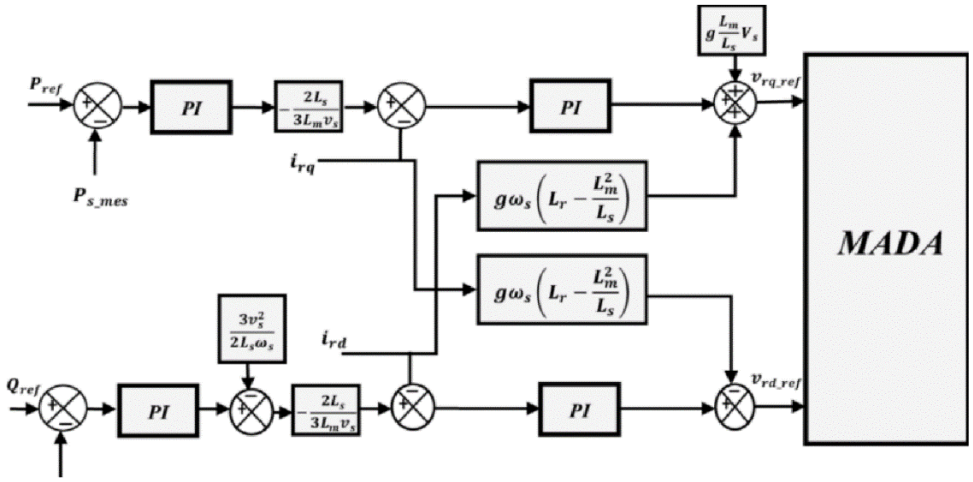
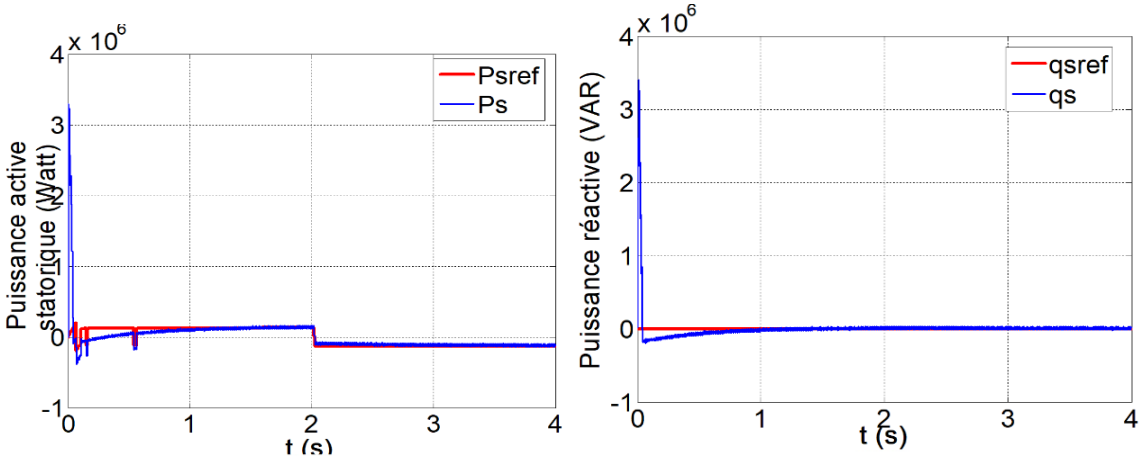


FIGURE III.14 – Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance

Simulation et interprétation des résultats :



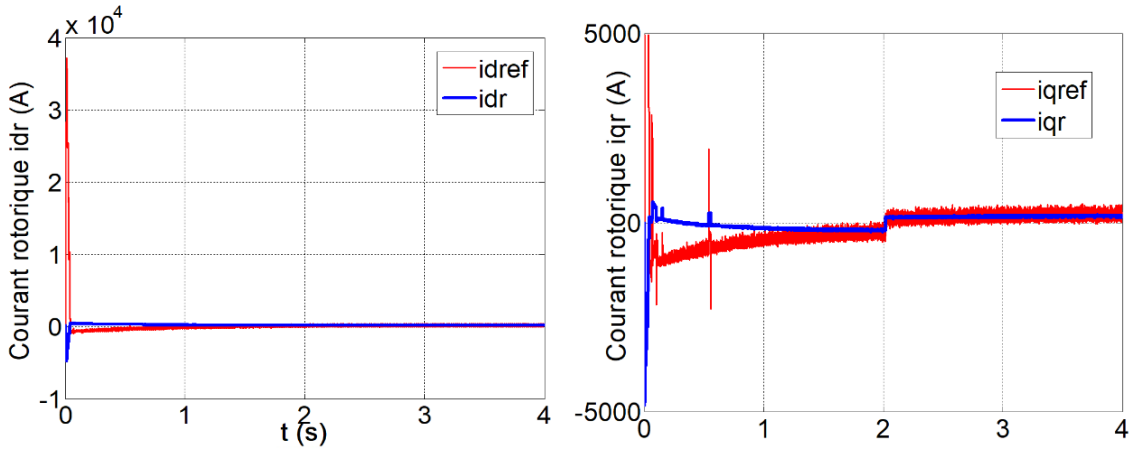


FIGURE III.15 – Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance

Interprétation :

On observe que le système présente une dynamique significative avec une erreur statique nulle. Que ce soit pour la puissance active ou réactive, la réponse dynamique est lente mais sans dépassement, et les références sont suivies avec précision.

Les erreurs sur les puissances sont inexistantes, et le couplage entre la puissance active et réactive est très faible, voire négligeable, ce qui ne devrait poser aucun problème pour l'exploitation future du modèle de la machine.

Cette stratégie de commande se révèle donc plus performante que la commande directe, qui présentait davantage de perturbations entre les deux puissances. Nous retenons ainsi la commande indirecte avec régulation des puissances pour la suite de l'étude. Elle offre également l'avantage de permettre une limitation simple des courants rotoriques en définissant une valeur maximale dans la boucle de courant.

Par ailleurs, ces puissances seront utilisées dans le contrôle global de l'éolienne afin de déterminer les consignes de puissance à transmettre à l'unité de stockage.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone double alimentée, dont le rotor est piloté à l'aide de deux convertisseurs électroniques commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'un de ces convertisseurs fonctionne comme un redresseur à transistors à commutation forcée, tandis que l'autre agit en tant qu'onduleur. Cette configuration permet de mettre en œuvre une stratégie de commande adaptée au système éolien étudié, visant l'extraction de la puissance maximale (MPPT) par

asservissement de la vitesse, régulée à l'aide d'un correcteur PI dont les gains ont été ajustés par une méthode de tâtonnement. Nous avons constaté que la commande directe, bien que simple à mettre en œuvre, offre des performances satisfaisantes avec une complexité de réalisation réduite. En revanche, la commande indirecte, combinée à une régulation des puissances, permet d'obtenir un système plus performant et plus robuste. Bien que plus complexe, cette méthode assure un fonctionnement optimal du système de génération électrique. De plus, la boucle de régulation du courant rotorique introduite dans cette approche permet d'intégrer des limitations de courant, assurant ainsi une meilleure protection de la machine — une fonctionnalité absente dans la commande directe. Grâce à cette régulation, il devient facile de limiter la valeur maximale des courants de référence.

Chapitre IV

Alimentation de deux charges électriques de 4 kW et 8 kW par une chaîne de production d'énergie éolienne.

IV.1 Introduction

Les systèmes de production d'électricité à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie éolienne, suscitent un intérêt croissant. Ce travail s'inscrit dans cette dynamique et porte sur l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie intégrant une turbine éolienne couplée à une génératrice à double alimentation (MADA). Ce type de génératrice est largement utilisé en raison de sa capacité à fonctionner à vitesse variable tout en maintenant une fréquence de sortie stable, ce qui améliore l'efficacité de la conversion énergétique. La production électrique est optimisée grâce à une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur la logique floue, permettant de suivre en temps réel le point de puissance maximale, même sous des conditions de vent variables. Pour assurer l'interface entre la génératrice et la charge, deux types de convertisseurs sont utilisés : un convertisseur redresseur du côté du rotor et un onduleur bidirectionnel côté charge, garantissant une conversion efficace et une régulation de la tension de sortie. L'ensemble de cette chaîne énergétique est destiné à alimenter une charge fixe de 4 kW et 8 kW, représentant un cas d'étude réaliste pour l'évaluation des performances du système proposé. Ce travail vise ainsi à modéliser, simuler et analyser le comportement de cette architecture dans différentes conditions de fonctionnement.

IV.2 Présentation du système global avec gestion

La finalité de ce travail est d'évaluer les performances du système proposé. Nous avons donc étudié un système global composé :

- *D'un générateur éolien comme source d'énergie renouvelable .*
- *D'un bus alternatif .*
- *De convertisseurs permettant d'ajuster les tensions à celles du bus alternatif .*
- *D'une unité de stockage d'énergie constituée de packs batteries .*
- *De deux charges de 4 kW et 8 kW.*

Tous les composants du système, excepté la charge, sont connectés à un bus alternatif via des convertisseurs CC/CA. La gestion énergétique s'appuie sur un algorithme appliqué sur le bus AC, qui calcule les puissances de chaque composant.

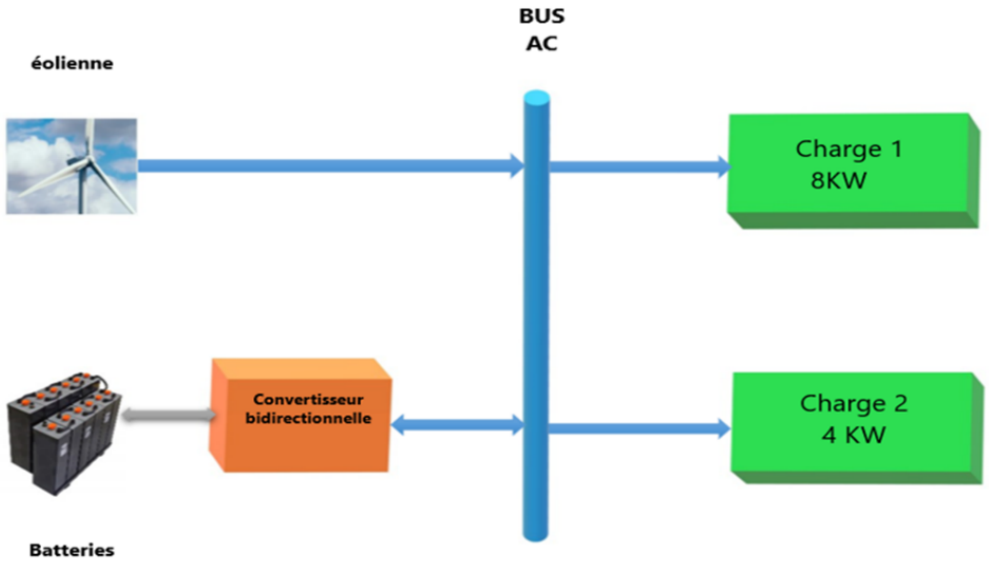


FIGURE IV.1 – Architecture d'un système proposé à bus AC

IV.2.1 Principe de fonctionnement

La priorité est la fourniture de l'énergie demandée par l'utilisateur à partir de l'énergie produite par l'éolienne. Lorsque la vitesse du vent est élevée, l'énergie fournie par l'éolienne alimente la charge via l'onduleur ; l'excès est stocké dans les batteries. En cas de déficit, la charge est compensée par le stockage. Si la somme des énergies éolienne et stockée est insuffisante, il est alors nécessaire d'optimiser le dimensionnement ou envisager une source supplémentaire.

IV.3 Algorithme de gestion d'énergie appliqué à notre système

Nous allons présenter sur la figure IV.2 l'organigramme relatif au programme MATLAB du système proposé :

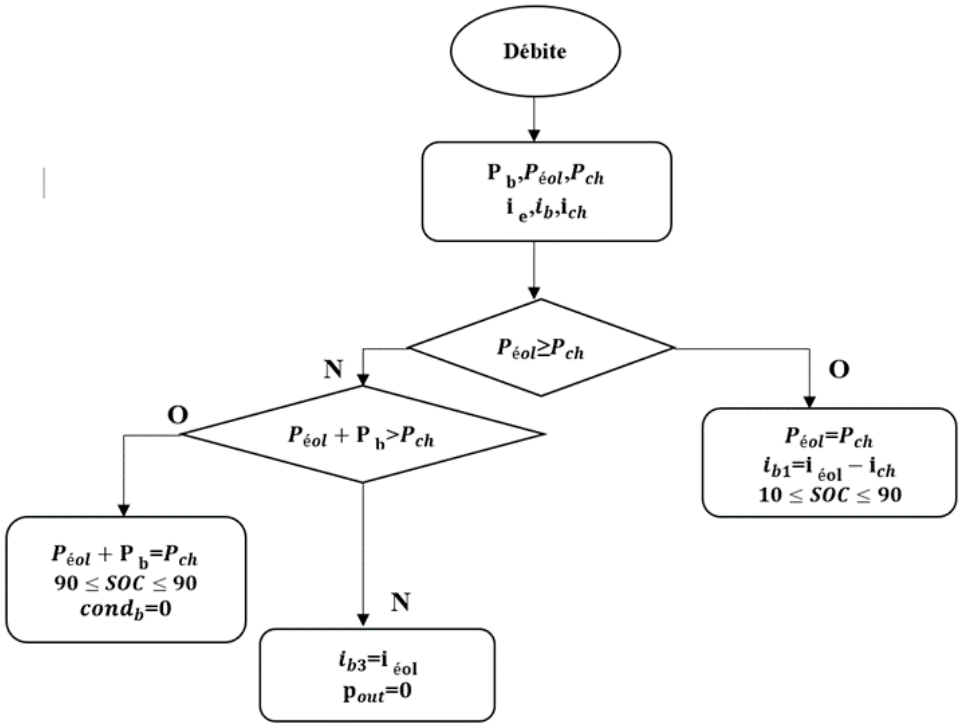


FIGURE IV.2 – Algorithme de la gestion d'énergie étudié.

IV.4 Techniques d'extraction du point de puissance maximale

On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées :

- *Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.*
- *Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique (voir Figure IV.3).*

IV.4.1 Stratégie de maximisation de puissance sans asservissement de la vitesse

Le principe de cette stratégie consiste à supposer que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, ce qui permet de négliger l'effet du couple de frottement visqueux C_{vis} (avec $C_{em} = 0$).

Dans ces conditions, on obtient le schéma bloc de la Figure IV.3 à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = C_{em-ref} \\ \dfrac{d\Omega_{mec}}{dt} = \dfrac{1}{J}(C_g - C_{em}) \\ \Longrightarrow C_{em-ref} = PI \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \\ \Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine\text{-}ref} \\ \Omega_{turbine\text{-}ref} = \dfrac{\lambda_{cp-\max} \cdot V}{R} \end{cases} \tag{IV.1}$$

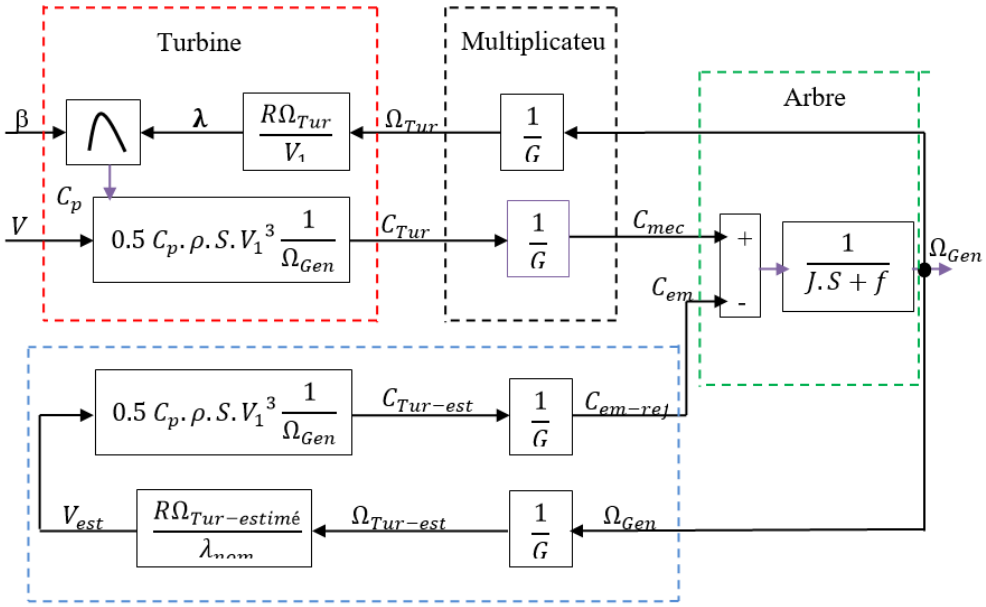


FIGURE IV.3 – Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse.

IV.4.2 Stratégie de maximisation de puissance avec asservissement de vitesse (BO)

L'asservissement de la vitesse est réalisé par un régulateur PI. Pour cette étude, on supposera que, quelle que soit la puissance générée, les grandeurs mécaniques développées sont à tout instant égales à leurs valeurs de référence.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant, selon le même modèle mécanique utilisé ci-dessus.

Pour l'asservissement de la vitesse, nous utilisons un régulateur proportionnel intégral (PI), en mode glissant, ainsi que par un régulateur flou.

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure IV.4 :

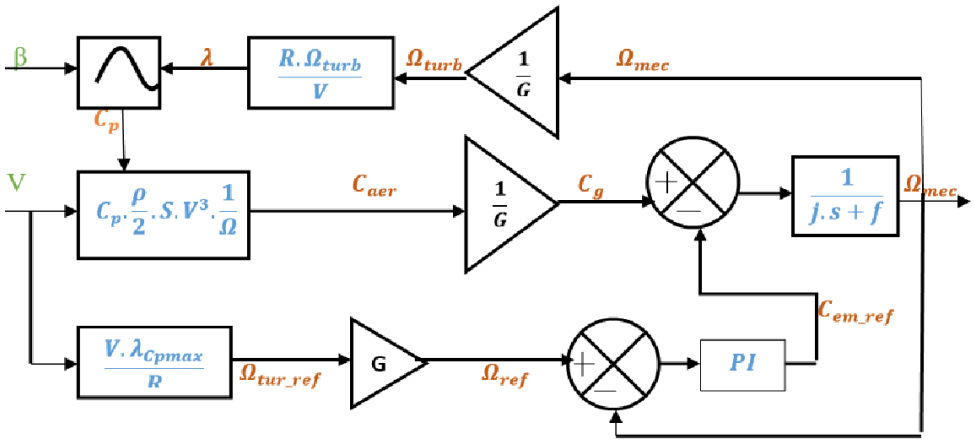
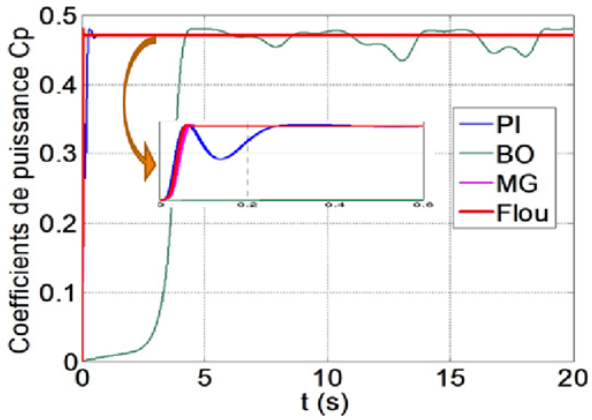


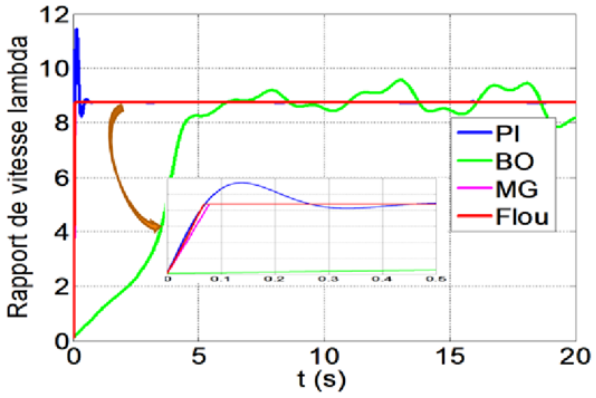
FIGURE IV.4 – Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

IV.4.3 Résultats de la simulation pour la poursuite du point de la puissance à l'aide des trois contrôleurs

Les figures ci-dessous montrent la comparaison entre deux stratégies (Boucle ouvert BO, et boucle fermée) à l'aide des trois contrôleurs différents, à savoir le mode glissant et les techniques d'amélioration de cette commande avec le régulateur flou, la turbine soumise au même profil du vent de la figure II.7.

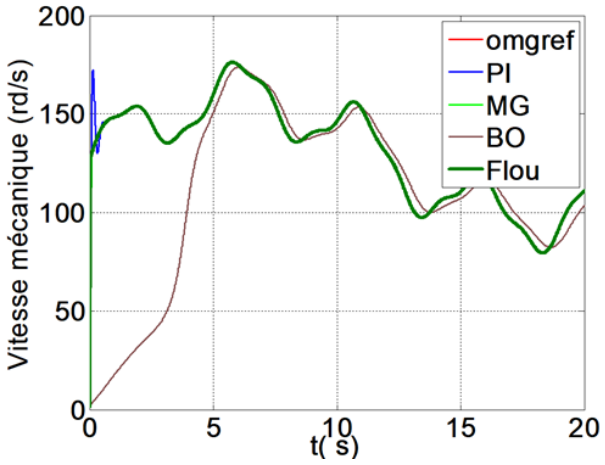


(a) Coefficient de puissance C_p.

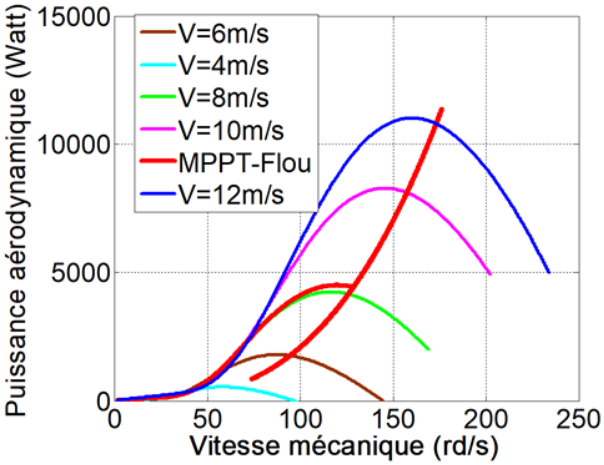


(b) Rapport de vitesse.

FIGURE IV.5 – Comparaison des stratégies en boucle ouverte et boucle fermée.



(a) Vitesse mécanique.



(b) Puissance aérodynamique.

Les résultats de simulation inhérents à cet algorithme de commande montrent que la variation de la vitesse de la génératrice est bien adaptée à la variation de la vitesse du vent (Figure IV.6a). On constate aussi un bon asservissement de la vitesse de la génératrice, qui suit parfaitement sa valeur de référence. Cela permet un suivi efficace du point de puissance maximale (MPPT).

Du point de vue énergétique, ces résultats démontrent que la puissance extraite est maximale pour différentes vitesses de vent, jusqu'à une valeur limite correspondant à la vitesse nominale de la machine.

IV.4.4 Système de stockage d'énergie

Pour le système de stockage, nous avons utilisé des batteries à accumulateurs au plomb-acide (Pb-acide). Le comportement de ce système est modélisé par les équations suivantes [13, 2, 22] :

$$I_{GAZ}(t) = \frac{C_{10}}{100} \cdot I_{GO} \cdot e^{C_V(V_{ELE}(t)-2.23)+C_T(T_{BB}(t)-20)} \tag{IV.2}$$

$$SOC(t) = \frac{C_B(t)}{C_{10}} \cdot 100\% \tag{IV.3}$$

$$V_B(t) = E_B(t) - R_{oc} \cdot I_{MR}(t), \quad ou \quad V_B(t) = E_B(t) - R_{OD} \cdot I_{MR}(t) \tag{IV.4}$$

$$X(t) = \frac{Q_{MAXC} - C_B(t)}{Q_{MAX}(I_{MR}(t))}, \quad avec \quad Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = C_1 I_{MR}^3 + C_2 I_{MR}^2 + C_3 I_{MR} + C_4 \tag{IV.5}$$

$$X(t) = \frac{Q_{MAXCD}(Q_{MAXCD} - C_B(t))}{Q_{MAX}(I_{MR}(t))}, \quad Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = D_1 I_{MR}^3 + D_2 I_{MR}^2 + D_3 I_{MR} + D_4 \tag{IV.6}$$

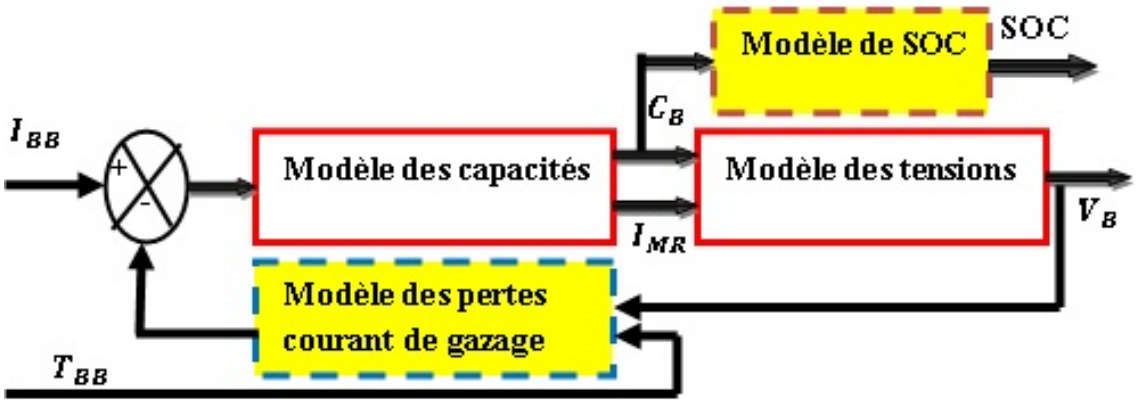


FIGURE IV.7 – Schéma bloc d'une batterie.

Charge : $I_{BB} > 0$

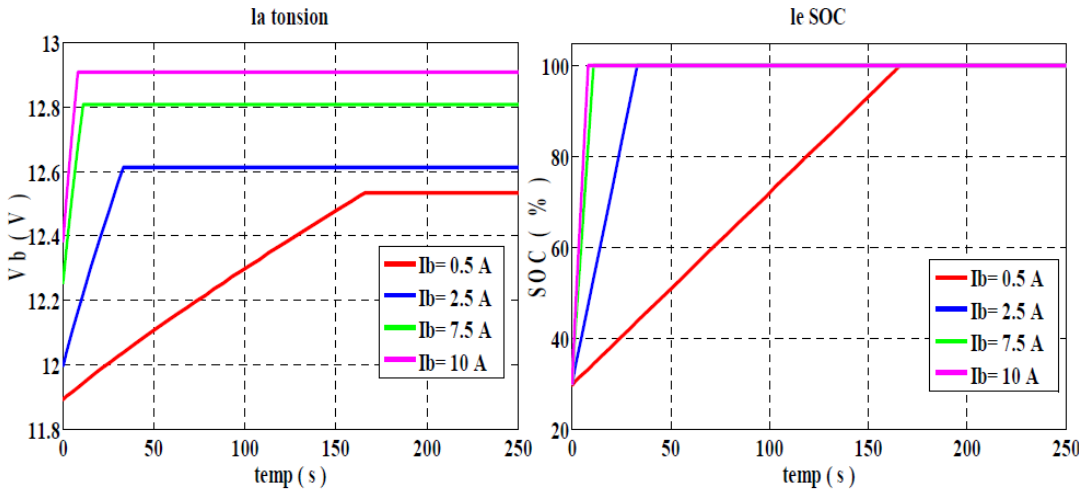


FIGURE IV.8 – Comportement de la batterie lors de la charge.

Décharge : $I_{BB} < 0$

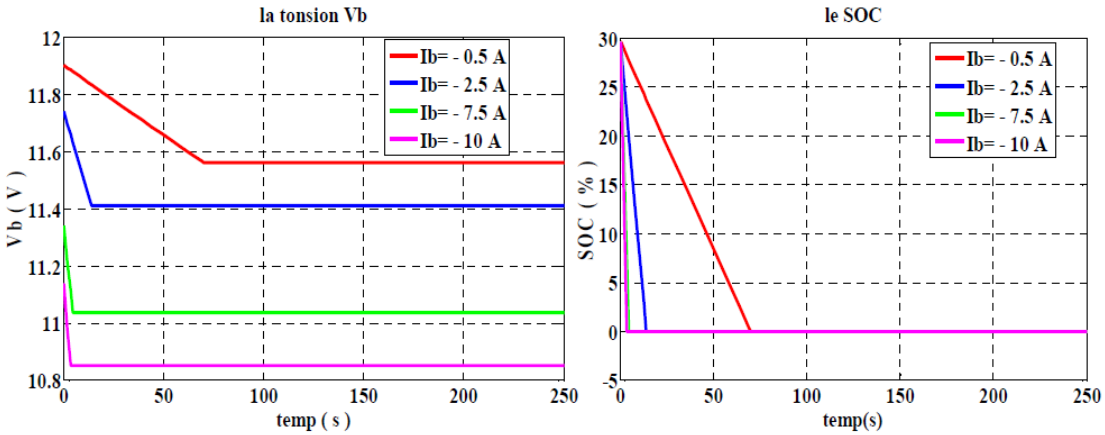


FIGURE IV.9 – Comportement de la batterie lors de la décharge.

IV.4.5 Commande de puissance et de la vitesse mécanique de la MADA par régulateur flou

L'objectif est de contrôler la puissance active et réactive ainsi que la vitesse de rotation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le contrôleur développé repose sur le modèle de Mamdani, représenté par la Figure IV.10.



FIGURE IV.10 – Schéma global du régulateur flou.

Les entrées du régulateur sont :

— $\Delta P = P[k] - P[k-1]$

— $\Delta\Omega = \Omega[k] - \Omega[k-1]$

La sortie est : $\Delta\Omega_{ref}$ *avec :*

$$\Omega_{ref}[k] = \Omega[k-1] + \Delta\Omega_{ref}[k] \tag{IV.7}$$

Le problème majeur rencontré lors de la synthèse du correcteur flou est le choix de ces paramètres d'adaptation qui jouent un rôle plus important pour assurer les meilleures performances. Nous faisons varier ces paramètres jusqu'à ce qu'on puisse avoir un phénomène transitoire de réglage convenable. Les fonctions d'appartenances choisis sont triangulaires [23] Les variables linguistiques sont notées comme suit :

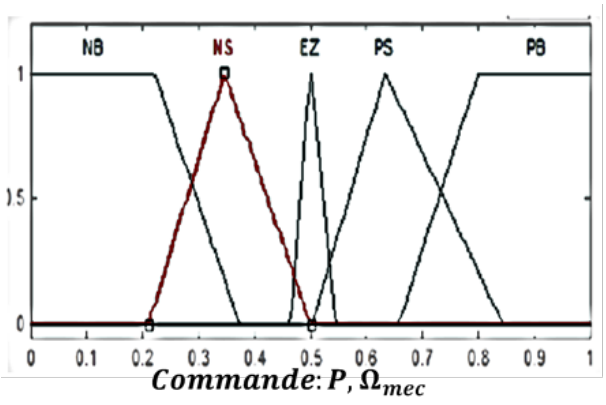
— *NG : négatif grand.*

— *NP : négatif petit.*

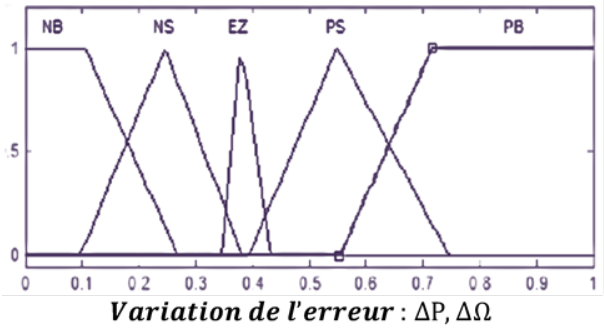
— *EZ : environ zéro.*

— *PP : positif petit.*

— *PG : positif grand.*



(a) Fonction d'appartenance de l'erreur de P et Ω_{mec}.



(b) Fonction d'appartenance de la variation de l'erreur de P et Ω_{mec}.

FIGURE IV.11 – Fonctions d'appartenance d'entrée pour le régulateur flou.

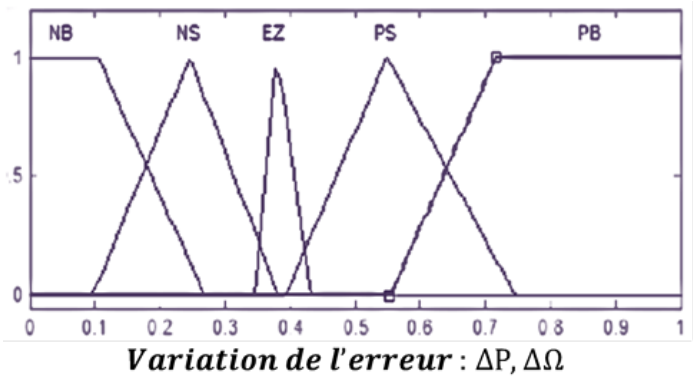


FIGURE IV.12 – Fonction d'appartenance de la commande de P et Ω_{mec}.

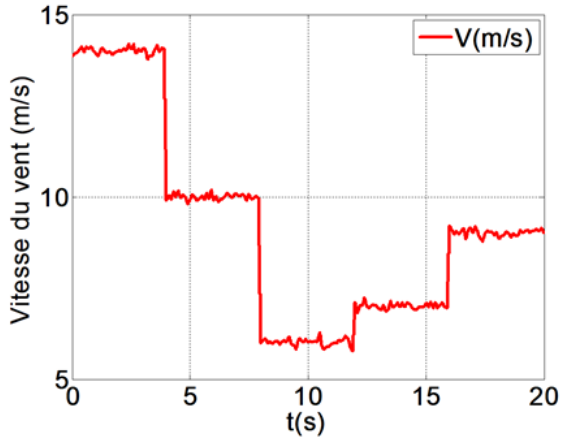
TABLE IV.1 – Règles floues du régulateur Mamdani.

U		e (ΔP ou $\Delta\Omega_{mec}$)				
		NG	**NP**	**EZ**	**PP**	**PG**
de/dt	**NG**	PP	NP	PP	PG	PG
	NP	NG	NP	NP	PP	PG
	EZ	N	P	P	PP	PP
	PP	NG	PP	EZ	EZ	PP
	PG	NG	NG	EZ	EZ	EZ

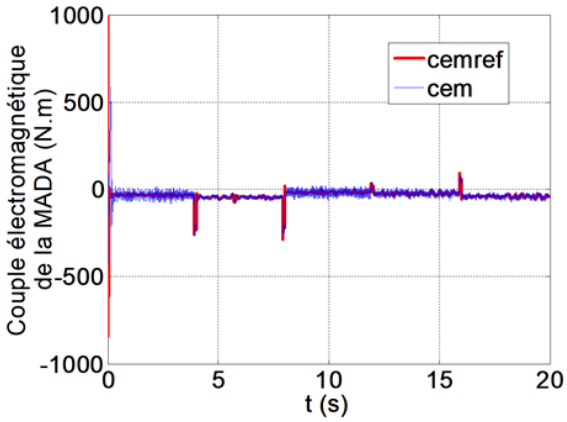
IV.4.6 Simulation et interprétation des résultats

Dans ce qui suit, nous avons simulé notre système en appliquant une gestion basée sur un algorithme global (voir Figure IV.2) chargé d'assurer la coordination entre les deux sources : l'éolienne et les batteries. Pour cela, nous avons choisi une évolution du vent variable afin d'observer tous les cas possibles d'interaction entre ces systèmes.

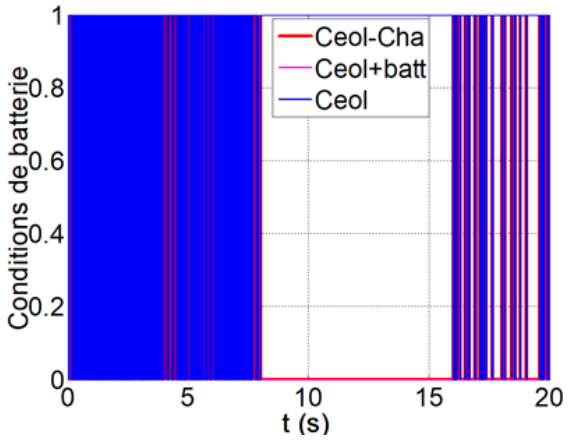
IV.4.6.1 Résultats de la simulation pour une charge de 8 kW



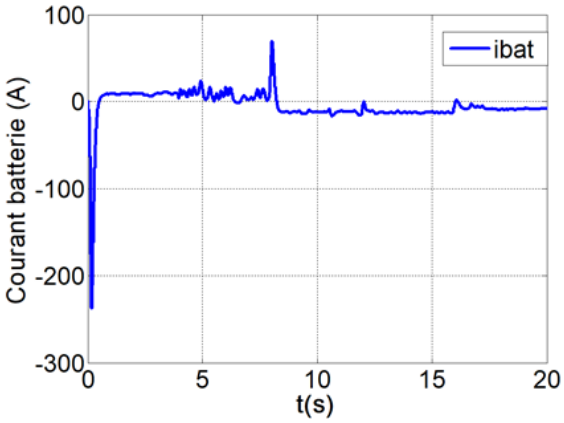
(a) Vitesse du vent



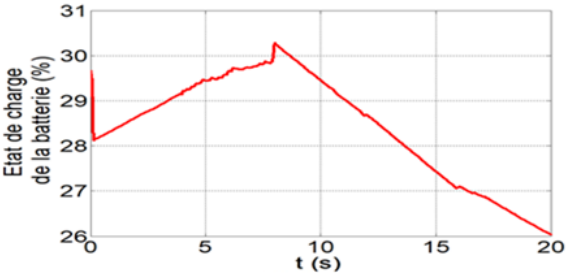
(b) Couple électromagnétique de la MADA



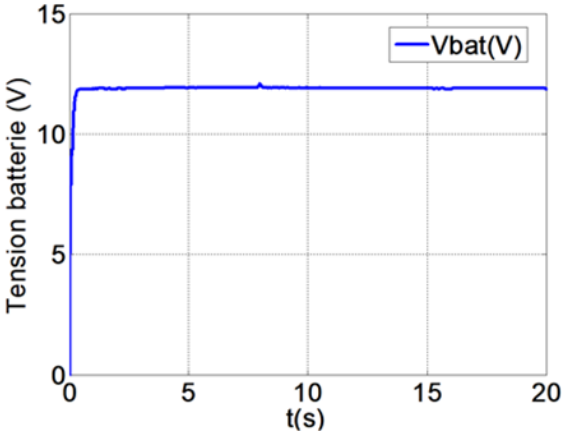
(c) Conditions de charge ou de décharge de la batterie



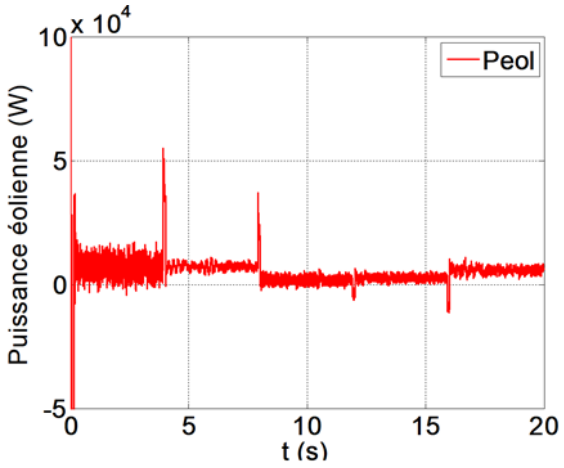
(d) Courant de la batterie



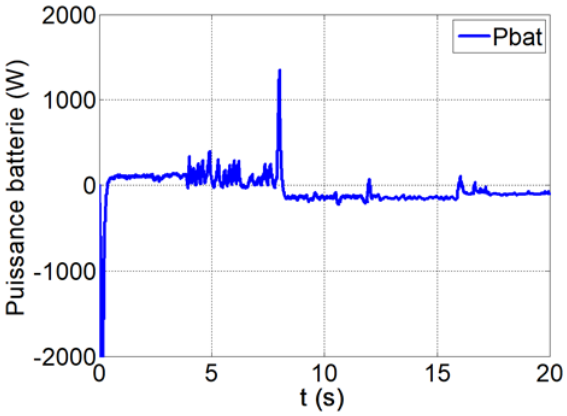
(e) État de charge de la batterie



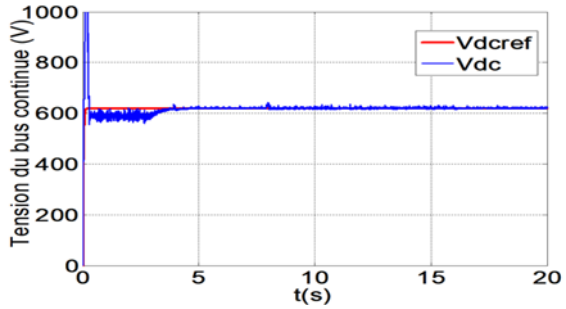
(f) Tension de la batterie



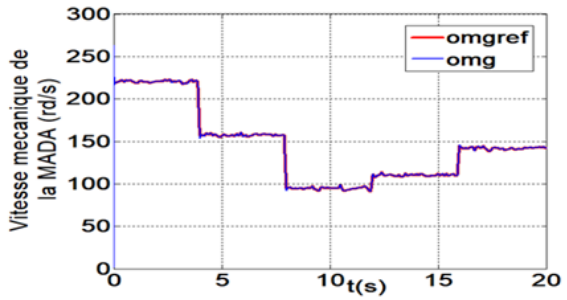
(a) Puissance éolienne



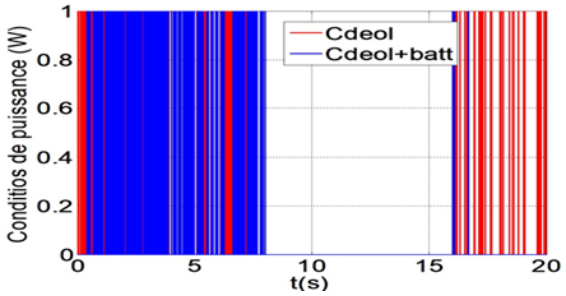
(b) Puissance de la batterie



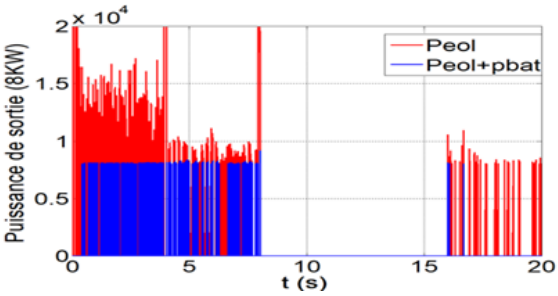
(c) Tension du bus continu



(d) Vitesse mécanique de la MADA



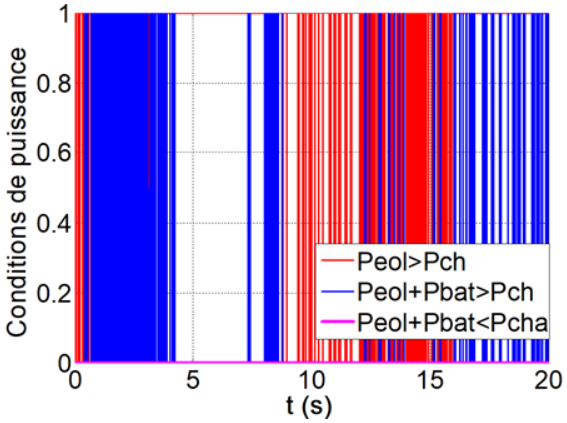
(e) Conditions de puissance de charge



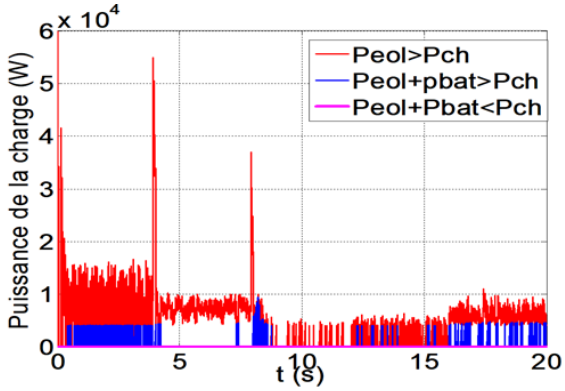
(f) Puissance de sortie (8 kW)

FIGURE IV.14 – Résultats de simulation pour une charge de 8 kW

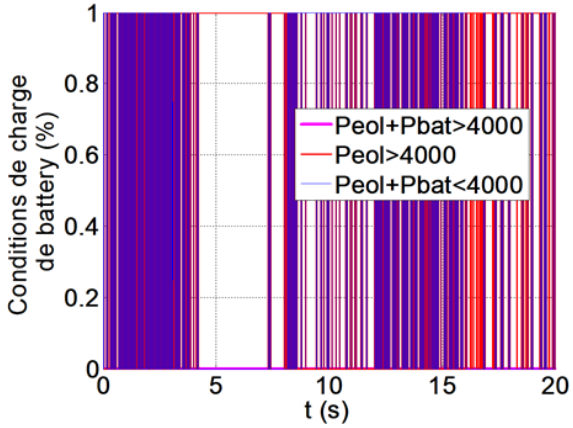
IV.4.6.2 Résultats de la simulation pour une charge de 4 kW



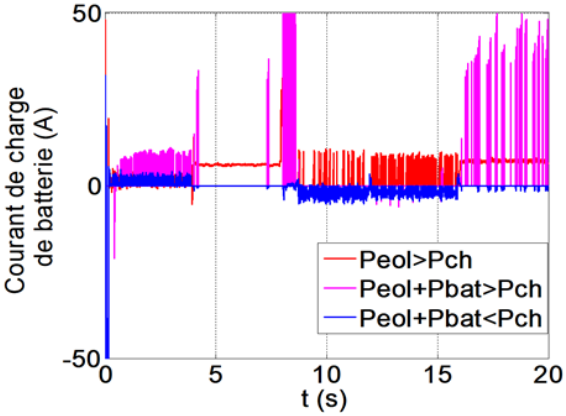
(a) Conditions de puissance de charge



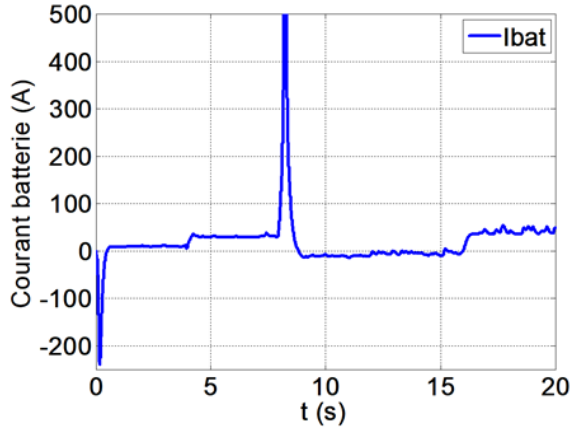
(b) Puissance de charge en sortie



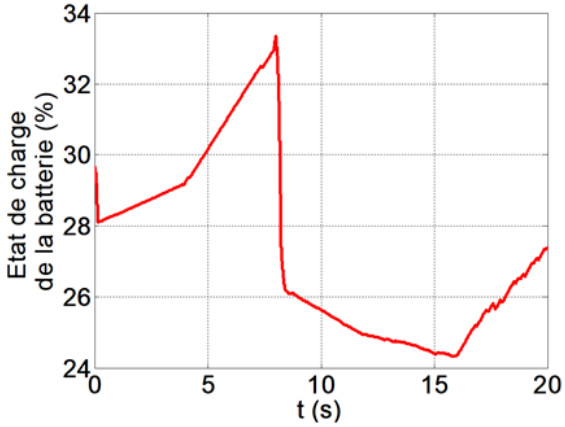
(c) Conditions de charge de la batterie



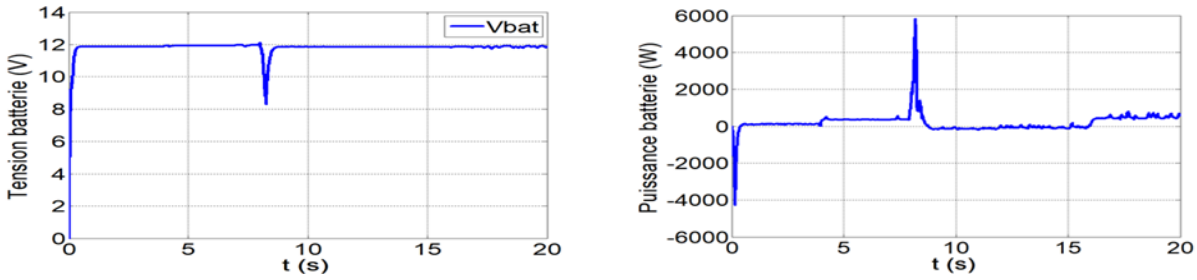
(d) Courant de charge de la batterie



(e) Courant produit de la batterie



(f) État de charge de la batterie



(a) Tension de la batterie (b) Puissance de la batterie

FIGURE IV.16 – Résultats de simulation pour une charge de 4 kW

IV.4.6.3 Interprétation des résultats

Les figures ci-dessus illustrent les performances des contrôleurs appliqués (PI et logique floue), ainsi que de la commande vectorielle des puissances active et réactive statoriques, appliquée à la MADA intégrée dans un système éolien. La vitesse mécanique du rotor suit l'évolution de la vitesse du vent, qui varie entre 100 rad/s et 220 rad/s, correspondant à des vitesses de vent comprises entre 6,5 m/s et 14 m/s (voir figures IV.13a et IV.14d). La régulation de la tension du bus continu est présentée à la figure IV.14c. Cette tension est correctement asservie à sa consigne $V_{dc} = 620\,V$, bien qu'elle présente des perturbations : elle augmente ou diminue en fonction des variations de la puissance électrique exploitée. Afin de stabiliser cette tension, l'onduleur intervient en injectant l'excès de courant vers la charge ou, inversement, en prélevant pour charger ou décharger le condensateur jusqu'à ce que $V_{dc} = V_{dc_ref}$. Parallèlement, l'onduleur assure le transfert de la puissance exploitée vers la charge.

Dans cette simulation, on considère que la charge demande successivement une puissance de 8 kW et de 4 kW. D'après les résultats obtenus, on remarque que, pour l'intervalle de temps $2\,s < t < 8\,s$, la puissance produite par l'éolienne P_{eol} est supérieure à la puissance demandée par la charge $P_{charge} = 8\,kW$ (voir figure IV.14a). Dans ce cas, l'énergie produite par l'aérogénérateur alimente directement la charge électrique (figures IV.14e et IV.14f), et l'excès de courant $i_{eol} - i_{charge}$ est utilisé pour recharger la batterie (figure IV.13c), ce qui se traduit par une augmentation de l'état de charge de la batterie (figure IV.13e).

En revanche, pour l'intervalle $9\,s < t < 16\,s$, la somme de la puissance fournie par l'éolienne et la batterie $P_{eol} + P_{batterie} < P_{charge}$ est inférieure à la puissance demandée. Dans ce cas, aucune puissance n'est envoyée à la charge (figures IV.14e et IV.14f). Le courant produit par l'éolienne est alors redirigé vers la batterie (figure IV.13c), ce qui entraîne une diminution de l'état de charge de la batterie (figure IV.13e).

Ces résultats mettent en évidence la performance des régulateurs ainsi que l'efficacité de la stratégie de gestion de l'énergie proposée.

IV.4.7 Conclusion

L'étude menée a permis de valider, par simulation, le bon fonctionnement et l'efficacité de l'architecture éolienne étudiée, intégrant une génératrice à double alimentation (MADA), une commande MPPT floue, ainsi qu'un système de gestion de l'énergie entre source éolienne, batterie et charge. Les résultats obtenus montrent que la commande vectorielle appliquée aux puissances active et réactive statoriques assure un bon suivi de la vitesse du rotor en fonction des variations du vent, garantissant ainsi une exploitation optimale de la ressource éolienne.

Par ailleurs, la régulation de la tension du bus continu est globalement satisfaisante, avec une tension bien asservie à sa consigne, malgré quelques perturbations naturelles dues aux variations de puissance. Le rôle de l'onduleur s'est avéré essentiel dans le maintien de cette stabilité, notamment en assurant la compensation des écarts de puissance et en facilitant le transfert vers la charge.

Enfin, la simulation des différents scénarios de demande de puissance (8 kW et 4 kW) a mis en évidence la réactivité et la cohérence de la stratégie de gestion d'énergie proposée. En situation d'excès de production, l'énergie est efficacement stockée dans la batterie, tandis qu'en situation de déficit, la batterie compense partiellement le manque, jusqu'à sa limite. Ces comportements confirment la pertinence des régulateurs utilisés (PI et flou) et démontrent la robustesse du système dans des conditions de fonctionnement réalistes.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie sur la modélisation, l'alimentation et la commande vectorielle d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement des énergies renouvelables, et plus particulièrement de l'énergie éolienne, qui représente une alternative prometteuse aux sources d'énergie conventionnelles.

Nous avons tout d'abord présenté les généralités sur l'énergie éolienne, ses enjeux, ainsi que les différents types d'éoliennes et machines électriques utilisées. La MADA, grâce à sa capacité à fonctionner à vitesse variable et à son aptitude au contrôle vectoriel, a été identifiée comme une solution pertinente pour optimiser la conversion énergétique dans les systèmes éoliens.

La modélisation détaillée de la MADA a permis d'établir les bases nécessaires à la conception des stratégies de commande. Nous avons ensuite étudié les différentes méthodes d'alimentation et de commande vectorielle, en insistant sur le contrôle direct du couple et la recherche du point de puissance maximale (MPPT), indispensables pour maximiser la récupération d'énergie éolienne.

Enfin, une étude appliquée a été réalisée pour démontrer la capacité de la chaîne éolienne à alimenter des charges électriques variées, avec des simulations qui ont confirmé l'efficacité des stratégies développées en termes de performance et de robustesse.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour le développement futur des systèmes éoliens, notamment l'intégration de stratégies de commande avancées, l'amélioration de la gestion énergétique et la connexion avec des réseaux intelligents. L'exploitation optimale de la MADA dans les aérogénérateurs contribuera ainsi à renforcer la place des énergies renouvelables dans le mix énergétique et à promouvoir un développement durable.

L'étude par simulation a validé l'efficacité d'un système éolien à MADA avec MPPT flou et gestion d'énergie batterie/charge, assurant un bon suivi de la vitesse rotorique et une régulation satisfaisante du bus continu. La modélisation simplifiée a mis en évidence le couplage (d–q), justifiant l'adoption d'une commande vectorielle.

Bibliographie

[1] *M. Rapin and J.M. Noel.* Énergies éoliennes, Principes et étude de cas. *Dunod, Paris, 2010. Chapitre sur les composants des éoliennes.*

[2] *B. Chen and J. Smith. Étude des machines à double alimentation.* Revue d'Électrotechnique*, 45(3) :123–135, 2012.*

[3] *Amira Laghouati. Electrolysis (sono-hydro-gen) for hydrogen extraction by wind system with storage. Mémoire de master, 2024.*

[4] *A. Glumineau and J.-P. Barbot.* Commande des machines électriques. *Hermès Lavoisier, 2000.*

[5] *A. B. Raj and al. A upf power conditioner with mppt for grid connected variable speed wind system.* IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(2) :163–168, 2003. Principes aérodynamiques du rotor.*

[6] *M. Rapin and J.M. Noel.* Énergies éoliennes : Principes et étude de cas. *Dunod, Paris, 2 edition, 2010.*

[7] *Abdelhafidh Moualdia.* Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne. *Thèse de doctorat en génie Électrique, option : Automatique, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2014.*

[8] *A. Bourahla. Commande vectorielle d'un système éolien basé sur une mada connectée au réseau. Mémoire de master, Université de Boumerdès, 2018.*

[9] *H. Li and Z. Chen. Overview of different wind generator systems.* IET Renewable Power Generation*, 2(2) :123–138, 2008.*

[10] *Mohamed Fathi Abid. Étude et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau sans transformateur. Mémoire de mastère de recherche, Université de Tunis El Manar, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2019. Analyse des architectures PV sans transformateur et optimisation de l'onduleur de chaîne.*

[11] *H. Li and Z. Chen. Overview of different wind generator systems.* IET Renewable Power Generation*, 2(2) :123–138, 2008. Courbe puissance-vitesse d'éolienne.*

[12] M. Rapin and J.-M. Noël. Energies éoliennes : Principes et étude de cas. *Dunod, Paris, 2010. Cité pour les caractéristiques générales, coût, durée de vie, fonctionnement des éoliennes.*

[13] A. David and Collaborators. Titre du livre sur les machines électriques. *Éditeur, Lieu, 2007.*

[14] M. Lindström. Classification des machines asynchrones. Electr. Mach. Rev., *15 :77–90, 2003.*

[15] F. Salem. Applications des machines à double alimentation. Rev. Sci. Tech., *10 :45–59, 2007.*

[16] Djamel Benslimane. Commande non linéaire d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation. *Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2019.*

[17] A. Belkacem, L. Mokrani, and R. Abdessemed. Commande directe du couple d'un générateur asynchrone à double alimentation pour la production éolienne. Revue des Energies Renouvelables, *12(3) :435–446, 2009.*

[18] A. Zerarka. Commande robuste et optimale d'un système éolien à base d'une MADA. *Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2014.*

[19] M. Machmoum and S. Saadate. Étude des performances d'un générateur asynchrone à double alimentation pour application éolienne. Revue internationale de génie électrique, *2001.*

[20] F. Bouchakour. Commande vectorielle et directe d'une machine asynchrone à double alimentation (mada) pour application éolienne. Mémoire de magister, Université de Batna, 2010.

[21] A. Bourahla. Commande vectorielle d'un système éolien basé sur une mada connectée au réseau. Mémoire de master, Université de Boumerdès, 2018.

[22] J. Aubert. Analyse des machines à double alimentation. Journal des Machines Électriques, *20 :50–65, 2012.*

[23] Alain Glumineau and Jean-Pierre Barbot. Commande des machines électriques. *Hermès Lavoisier, 2000.*

[24] K. Hoppe. Revue bibliographique des machines asynchrones. Rev. Electrotech., *33 :100–120, 2001.*

[25] F. Bouchakour. Commande vectorielle et directe d'une machine asynchrone à double alimentation (mada) pour application éolienne. Mémoire de magister, Université de Batna, 2010.

[26] J.-P. Hautier. Commandes des machines électriques : Théorie et mise en œuvre. *Dunod, 2003.*

[27] Mohamed Machmoum. Conversion électromécanique de l'énergie : Commande des machines électriques. *Dunod, 2014.*

[28] J.-P. Hautier. Commandes des machines électriques : Théorie et mise en œuvre. *Dunod, 2003.*

[29] M. Machmoum. Conversion électromécanique de l'énergie : Commande des machines électriques. *Dunod, 2014.*

[30] Mustapha Boukhnifer. Commande robuste d'un système éolien à base de génératrice asynchrone à double alimentation. *Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2020.*

[31] M. Fadel. Commande vectorielle des machines asynchrones : principes et applications. Techniques de l'Ingénieur, *(D 3 840), 2003.*