

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Université A. MIRA de Béjaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue d'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

THEME

*Commande non linéaire d'un aérogénérateur  
à base de la machine asynchrone à double  
alimentation*

**Préparé par :**  
NAIT AMARA Adam  
MOHAMMEDI Walid

**Encadré par :**  
Pr. BOUDRIES Zoubir  
Mr. ITOUCHENE Hichem

**Membres du jury**  
**Président :** pr. Taraft saci  
**Examineur :** Pr. Ouari kamel

PROMOTION 2018 / 2023

---

## ***Remerciement***

*Avant tout nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé pour mener à terme la réalisation de notre mémoire de fin d'étude.*

*En premier lieu nous voudrions remercier notre directeur de mémoire Monsieur Zoubir BOUDREAS professeur à l'université de Béjaia, pour sa patience, son accueil, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, et de nous avoir assuré l'encadrement pour l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous désirons aussi remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Enfin une mention spéciale à nos familles qui sont une source permanente de motivation et de bonheur.*

---

## *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce travail à :*

*En premier lieu à MES CHÈRES PARENTS QUE DIEU  
LES GARDES*

*Mes Frères AMINE et FAIZ*

*Toute La famille NAIT AMARA.*

*Tous mes proches amis SAMIR, ZAKARIA et IDIR.*

*A la plus douce personne au monde AMEL*

*Mon binôme WALID.*

*Et en fin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou  
de loin durant l'élaboration De ce travail.*

*NAIT AMARA ADAM*

---

*Je tiens à dédier ce travail à :*

*En premier lieu à la mémoire de mon merveilleux père  
décédé et ma MÈRE pour sa tendresse profonde.*

*Mes Frères NABIL et MASSY.*

*Mes sœurs SYLIA et YASSMINE.*

*Toute La famille MOHAMMEDI.*

*Tous mes proches amis ALI, AISSA et SEDDIK.*

*A la plus douce personne au monde AHLÈME*

*Mon binôme ADAM.*

*Et en fin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou  
de loin durant l'élaboration De ce travail.*

*MOHAMMEDI WALID*

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	14
<i>Chapitre 01</i> .....	<i>16</i>
GENERALITE SUR LE SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE.....	16
1.1. Introduction.....	16
1.2. Différentes sources de production d'énergie électrique.....	16
1.3. Définition de l'énergie éolienne.....	17
1.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	17
1.5. Principaux composants d'une éolienne.....	18
1.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	18
1.7. Différents types d'éoliennes.....	19
1.7.1. Selon l'axe.....	19
1.7.2. Selon le mode de fonctionnement.....	21
1.8. Analyse des Zones de Fonctionnement d'une Éolienne en Fonction de la Vitesse du Vent	23
1.9. Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation.....	24
1.9.1. Pourquoi la MADA.....	24
1.9.2. Fonctionnement en quatre quadrants de la MADA.....	24
1.9.3. Différentes structures de la MADA.....	26
1.10. Avantages et inconvénients de la MADA.....	29
1.11. Conclusion.....	30
<i>Chapitre 02</i> .....	<i>31</i>
MODELISATION DU SYSTEME (TURBINE EOLIENNE +MADA).....	31
2.1. Introduction.....	31
2.2. Modélisation de la partie mécanique.....	31
2.2.1. Modèle du vent.....	31
2.2.2. Modélisation de la turbine.....	32
2.2.3. Modèle du multiplicateur.....	33
2.2.4. Modèle de l'arbre mécanique.....	34
2.2.5. Techniques d'extraction de maximum de la puissance.....	34

2.3. Modélisation de la MADA.....	37
2.3.1. Hypothèses simplificatrices .....	37
2.3.2. Modèle dynamique de la MADA .....	38
2.3.3. Modèle de la MADA dans le plan (d q).....	41
2.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....	43
2.5. Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance.....	46
2.5.1. Modélisation de convertisseur côté réseaux (CCR) .....	46
2.5.2. Modélisation de convertisseur côté machine .....	47
2.5.3. Le bus continu.....	48
2.5.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	48
2.6. Conclusion .....	50
<i>Chapitre 03.....</i>	<i>51</i>

## COMMANDE ET SIMULATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION EOLIENNE.....51

3.1. Introduction.....	51
3.2. Historique de la commande par Backstepping .....	51
3.3. Le domaine d'application de la commande par Backstepping.....	52
3.4. Principe de la commande par Backstepping .....	52
3.5. Notions de base de la stabilité des systèmes non linéaires .....	53
3.5.1. Systèmes non linéaires .....	53
3.5.2. Equilibre.....	53
3.5.3. Plan de phase .....	53
3.5.4. Stabilité (Définition intuitive).....	53
3.5.5. Stabilité (Selon Lyapunov) .....	53
3.6. Les avantages et inconvénients de la commande Backstepping .....	54
3.7. Application du backstepping pour les systèmes d'ordre n.....	54
3.8. Application de la commande par Backstepping classique (BCS-Classique) à une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	56
3.8.1. Commande de la puissance active.....	56
3.8.2. Commande de la puissance réactive .....	57
3.9. Application de la commande par Backstepping avec action intégrale (BCS-Intégrale) à une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) .....	57
3.9.1. Commande de la puissance active.....	58
3.9.2. Commande de la puissance réactive .....	58
3.10. Résultats de simulation.....	59
3.10.1. Test 01= fonctionnement à Vitesse du vent constante .....	59
3.10.2. Test 02= fonctionnement à Vitesse de vents variable.....	61

---

3.10.3. Test 03= Robustesse.....	62
3.11. Conclusion .....	63
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>64</b>

---

---

## Liste des figures

---

---

Figure 1.1. Eléments constituant une éolienne.....	18
Figure 1.2. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique Cette conversion se fait en deux étapes [7]. .....	18
Figure 1.3. Éolienne à axe horizontal.....	19
Figure 1.4. Éolienne à axe vertical type Darrieus.....	21
Figure 1.5. Éolienne Savonius.....	21
Figure 1.6. Éolienne directement connectée au réseau.....	22
Figure 1.7. Aérogénérateur à vitesse variable.....	22
Figure 1.8. Caractéristique Puissance-vitesse du vent.....	23
Figure 1.9. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	25
Figure 1.10. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone .....	25
Figure 1.11. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	25
Figure 1.12. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	26
Figure 1.13. Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor .....	27
Figure 1.14. MADA – structure de Kramer .....	27
Figure 1.15. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée .....	28
Figure 1.16. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. ....	28
Figure 1.17. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	29
Figure 2.1. Schéma de la turbine éolienne.....	31
Figure 2.2. Simulation du profil de la vitesse du vent .....	32
Figure 2.3. Coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse.....	33
Figure 2.4. Schéma bloc du modèle de la turbine.....	34
Figure 2.5. Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne .....	35
Figure 2.6. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	36
Figure 2.7. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	37
Figure 2.8. Représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation.....	38
Figure 2.9. Passage du triphasé au biphasé et inverse .....	41
Figure 2.10. Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....	45
Figure 2.11. Redresseur de tension associé à un onduleur de tension.....	46
Figure 2.12. Schéma du convertisseur côté réseau CCR (Onduleur).....	46
Figure 2.13. Schéma du convertisseur côté machine CCM (redresseur).....	47
Figure 2.14. Schéma de bus continu .....	48
Figure 2.15. Commande modulation de largeur d'impulsion.....	49
Figure 3.1. Schéma de principe de la commande backstepping .....	52



---

Figure 3.2. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique (test de fonctionnement à Vitesse du vent constante).....	60
Figure 3.3. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique (test fonctionnement à Vitesse variable).....	61
Figure 3.4. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique et BCS-Intégrale (test robustesse).....	62

---

---

## *Liste des tableaux*

---

---

Tableau 1.1. Les conditions mathématiques pour le fonctionnement de la MADA [17].....	26
Tableau 3.1. Les échelons des puissances actives et réactives.....	60
Tableau 3.2. La comparaison entre la commande BCS-Classique et BCS-Intégrale.....	63

## Listes des Acronymes et Symboles

### Acronymes

MADA	: Machine à Double Alimentation,
GADA	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation,
MPPT	: Maximum Power Point Tracking,
MSAP	: machine synchrone à aimant permanent
CCM	: Convertisseur Côté Machine.
CCR	: Convertisseur Côté Réseaux.
MLI	: modulation de largeur d'impulsion
GTO	: gate turn-of thyristor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCTs	:integrated gate-commutated thyristors

### Symboles

a,b, c	: Axes du repère triphasé
d, q	: Axes du repère lié au champ tournant
$V_s$	: Tension statorique.
$V_{sd}, V_{sq}$	: Les tensions statoriques directes et en quadratures du système diphasé
$V_{sabc}$	: Tensions statorique triphasées
$V_r$	:T ension roptorique
$V_{rd}, V_{rq}$	: Les tensions rotoriques directes et en quadratures du système diphasé
$V_{rabc}$	: Tensions rotoriques triphasées
$I_s$	: Courants statoriques
$I_r$	: Courants rotoriques
$I_{sd}, I_{sd}$	: Les courants statoriques directes et en quadratures du système diphasé
$I_{rd}, I_{rd}$	: Les courants rotoriques directes et en quadratures du système diphasé
$I_{sabc}$	: Courants statorique triphasées
$I_{rabc}$	: Courants statorique triphasées
$i_c$	: Courants dans la capacité
$V$	: La vitesse du vent en (m/s)
$\rho$	: La masse volumique de L'air
$S$	: La surface balayée par la turbine.(m <sup>2</sup> )
$C_p$	: Coefficient de puissance, (dépend des caractéristiques de la turbine).
$\beta$	: Angle d'orientation des pales.

---

$\lambda$	: Le ratio de vitesse.
$R.\omega_t$	: la vitesse linéaire des pales
$\Omega_t$	: la vitesse angulaire de la turbine
$P_t$	: la puissance de vent
$C_g$	: couple génératrice
$C_{vis}$	: couple des frottements visqueux
$C_t$	: le couple turbine
$G$	: gain du multiplicateur
$C_{p-max}$	: maximum du coefficient de puissance
$C_{em} - r_{ef}$	: Le couple électromagnétique de référence
$\varphi_s$	: Flux statorique
$\varphi_r$	: Flux rotorique
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	: Les flux statoriques direct et en quadrature du système diphasé
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	: Les flux rotoriques direct et en quadrature du système diphasé
$L_s$	: Inductance statorique
$L_r$	: Inductance rotorique
$\ell_s$	: Inductance propre statorique
$\ell_r$	: Inductance propre rotorique
$R_s$	: résistance statorique
$R_r$	: résistance rotorique
$M_s$	: Inductance mutuelle entre enroulement statorique
$M_R$	: Inductance mutuelle rotorique
$M_{sr}$	: Inductance mutuelles stator-rotor
$M_{rs}$	: Inductance mutuelles rotor-stator
$M$	: Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique
$\theta$	: L'angle repère de l'axe d'une phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique.
$C_r$	: Couple résistance
$C_{me}$	: Couple électromécanique
$\Omega$	: la vitesse mécanique de la machine
$\sigma$	: coefficient de dispersion de Blondel.
$f$	: coefficient de frottement
$J$	: moment d'inertie
$P$	: Le nombre de paires de pôles de la MADA
$m$	: Le rapport de la fréquence porteuse
$\tau_m$	: Taux de modulation
$f$	: Fréquence de l'onde de référence ;

---

---

$f_p$	: Fréquence de la porteuse et $T_p$ sa période ;
$V_{ref}$	: Amplitude de la tension
$V_p$	: Amplitude de la porteuse
$V_{bus}$	: La tension du bus continu
$i_{r\_res}$	: Courant dans la résistance (A)
$i_{g\_cc}$	: Courant continu circulant de la liaison CC vers le réseau (A)
$i_{r\_cc}$	: Courant continu circulant du rotor vers la liaison CC (A)
$e_1$	: L'erreur de poursuite de la puissance active
$V(e_1)$	: Fonction de Lyapunov
$P_s$	: Puissance active statorique
$P_r$	: Puissance active rotorique
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
$Q_r$	: Puissance réactive rotorique
$p_s^{ref}$	: Puissance active de référence statorique
$Q_s^{ref}$	: Puissance réactive de référence statorique

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont de plus en plus inquiétants pour l'avenir de la planète [1].

Alors pour résoudre cette problématique, l'homme a cherché d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles afin de produire l'énergie avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant les différents éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en première place. Cette énergie est en train de se développer en conséquence des problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles et du progrès technologique des aérogénérateurs. La part de ce type d'énergie dans le réseau est de plus en plus importante dans les régions ventées, ainsi que son coût est encore trop élevé [2].

La commande des machines électriques joue un rôle crucial dans l'industrie, en particulier dans la gestion des opérations, la production et la logistique. Elle permet de coordonner les différents processus et de maintenir l'efficacité des activités industrielles [3].

De nos jours, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers l'utilisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) en tant que génératrice, en raison de ses nombreux avantages. Le schéma de raccordement le plus courant pour cette machine consiste à connecter directement le stator au réseau électrique, tandis que le rotor est alimenté par deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté rotor CCM et l'autre côté réseau CCR). Cette configuration permet à l'éolienne de fonctionner à des vitesses variables, ce qui lui permet de produire la puissance maximale sur une large plage de variations de vitesse. De plus, les convertisseurs statiques utilisés pour contrôler cette machine peuvent être dimensionnés pour transporter uniquement une fraction de la puissance totale (représentant la puissance de glissement). Cela entraîne moins de pertes lors des commutations, une réduction des coûts de production des convertisseurs, ainsi que des coûts et des pertes supplémentaires réduits [1].

La commande vectorielle basée sur l'orientation du flux est une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable, que ce soit en mode générateur ou moteur pour la machine asynchrone double alimentée. Cependant, l'utilisation de cette commande peut poser des problèmes lorsque les paramètres de la machine varient. Afin de résoudre cette

problématique, plusieurs approches de commande robustes sont mentionnées, notamment la commande par mode glissant, la commande backstepping et la commande adaptative.

Dans notre travail, nous étudierons le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée par un onduleur de tension contrôlé avec une stratégie de contrôle MLI, et nous appliquons la technique backstepping qui est relativement nouvelle pour les systèmes non linéaires et la mieux stable et la moins sensible par rapport à la commande vectorielle. Pour cela, nous divisons notre mémoire en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous passerons en revue les connaissances de base de l'énergie éolienne, son principe de fonctionnement, ses différents types ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Par la suite on présentera un état de l'art sur les différentes chaînes de conversion électromécanique, plus particulièrement celle avec la machine asynchrone à double alimentation.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne. En commençant par la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, par la suite, nous passerons à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation théorique de la technique du Backstepping, est son application au système étudié. Enfin, on présentera les résultats de la simulation, illustrant la stabilité de la technique de commande et ceci pour les différentes conditions de fonctionnement du moteur asynchrone.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble résultats obtenus

## Chapitre 01

# GENERALITE SUR LE SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE

---

## 1.1. Introduction

Le rôle d'une éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en électricité, et ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion. Les éoliennes doivent avoir :

- Un système électrique (La machine associée à l'électronique de puissance et sa commande).
- Un système mécanique (Orientation des pâles et de la nacelle).

Dans ce chapitre, nous présentons la composition générale des systèmes éoliens, puis présentons l'état de l'art des différents types d'éoliennes et leurs principes de fonctionnement dans le cadre de la conversion de l'énergie éolienne, puis décrivons les systèmes électriques les plus couramment utilisés. Différentes configurations utilisant des générateurs asynchrones à double alimentation seront décrites.

## 1.2. Différentes sources de production d'énergie électrique

La centrale électrique convertit diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique pour fournir de l'électricité à des consommateurs privés ou industriels situés loin de la centrale électrique via le réseau [4].

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques.
- Les centrales nucléaires qui utilisent la fission nucléaire de matières fissiles pour produire de la chaleur dont une partie est transformée en électricité.
- Les centrales hydroélectriques qui transforment l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité.
- Les centrales éoliennes, qui utilisent la force du vent sur les pâles d'une éolienne.



Lorsque le vent commence à souffler, la force agissant sur les pâles de l'hélice fait tourner le rotor. L'énergie électrique qui en résulte peut-être distribuée sur le réseau à l'aide de transformateurs.

Le contexte de ce travail est l'étude des générateurs asynchrones à double alimentation (MADA) utilisés dans les systèmes éoliens.

### 1.3. Définition de l'énergie éolienne

Une éolienne convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique via un générateur.

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne découle de la nécessité de développer des systèmes énergétiques durables, propres et fiables à long terme.

L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes afin d'offrir une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales [5].

### 1.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'intérêt porté à l'éolien ces dernières années est sans doute dû à ses avantages. Cependant, elle a aussi des inconvénients, il faut les rechercher, pour qu'ils ne deviennent pas des obstacles à son développement [25].

#### *a. Avantages*

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable c'est à dire qu'elle est inépuisable
- ✓ Elle est non polluante, aucune rejection de CO<sub>2</sub> ni d'aucun autre gaz polluant ou toxique
- ✓ Son exploitation ne présente pas de risque, contrairement au nucléaire
- ✓ Elle peut être rentable dans les régions éloignées et ventées (sites isolés)
- ✓ En terme de coût de revient, elle est la moins chère parmi toutes les énergies renouvelables
- ✓ Après son temps de fonctionnement, une éolienne est entièrement démontable et recyclable

#### *b. Inconvénients*

- Son aspect aléatoire, la production d'énergie a lieu en fonction du vent
- L'éolienne produit du bruit
- L'éolienne a des effets sur le paysage (au niveau de l'esthétique)

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel
- Le coût de l'énergie éolienne est élevé par rapport aux sources d'énergie classiques

### 1.5. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments :

- **Un mât** permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol
- **Une hélice** de trois pâles généralement, montée sur l'axe horizontale de l'éolienne
- **Une nacelle** montée au sommet du mât et constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie
- **Une cabine** située au pied de l'éolienne et qui permet de se connecter au réseau domestique dans le cas d'une utilisation individuelle

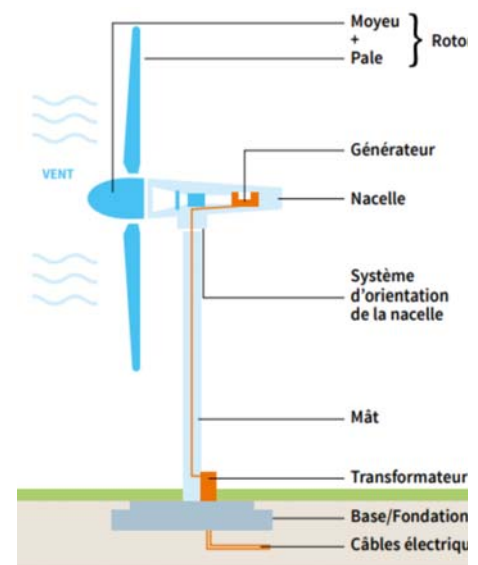


Figure 1.1. Eléments constituant une éolienne

### 1.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur (M), d'un générateur (GE), généralement triphasé, et d'un circuit électronique de puissance (EP). Selon leur utilisation prévue, les éoliennes sont soit connectées au réseau électrique, soit alimentées en électricité des consommateurs de subsistance figure 1.2 [6].

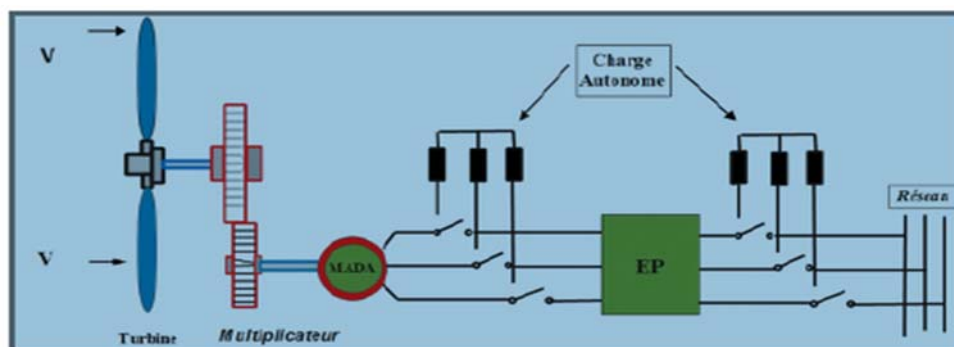


Figure 1.2. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique Cette conversion se fait en deux étapes [7].

Cette conversion se fait en deux étapes [7] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

## 1.7. Différents types d'éoliennes

### 1.7.1. Selon l'axe

Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont celles à axe vertical et celles à axe horizontal [8-9].

#### 1.7.1.1. Éolienne à axe horizontal

Ces éoliennes sont les descendantes directes des moulins à vent, avec des ailes généralement constituées de voiles enfilées sur des structures en bois remplacées par des éléments rappelant les ailes d'avion. Ici, la portance de ces ailes dues au vent n'est pas utilisée pour faire fonctionner des objets comme les avions, mais pour générer un couple moteur pour entraîner des dispositifs mécaniques tels que des générateurs et des pompes [11].



Figure 1.3. Éolienne à axe horizontal

Actuellement, les turbines à axe horizontal sont les plus couramment utilisées par rapport aux turbines à axe vertical. En effet, les turbines à axe horizontal sont moins chères et ont moins de contraintes mécaniques. Le nombre de pâles du rotor varie entre 1 et 3, mais un rotor à 3 pâles est le plus couramment utilisé car il équilibre le facteur de mérite, de coût et de vitesse de rotation du capteur de vent [10].

#### a. Avantages

- ✓ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical
- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol
- ✓ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage [8].

**b. Inconvénient**

- Coût de construction très élevé
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries [8].

**1.7.1.2. Éolienne à axe vertical**

On parle d'éolienne à axe vertical car l'axe de rotation du rotor est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Ce sont les premières structures développées pour produire de l'électricité [9]. Elle a l'avantage d'être facilement accessible car les commandes et le générateur sont hors sol.

Ces générateurs sont conçus pour fonctionner dans n'importe quel vent. Grâce à la symétrie des ailes, ils peuvent profiter du vent de toutes les directions sans avoir à ajuster leur position. De plus, l'installation du groupe électrogène au sol présente un grand avantage en termes de maintenance. Cependant, les éoliennes à axe vertical présentent certains inconvénients. Le modèle à axe vertical produit environ la moitié de l'énergie électrique produite par le modèle à axe horizontal. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles il y a peu de demande pour ce type de machine [12].

**a. Avantages**

- ✓ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [8].

**b. Inconvénients**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
- La conception verticale de ce type d'éoliennes impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pâles, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [8].

### A. Darrieus

Ils sont compacts, ne nécessitent pas de systèmes d'alignement et sont faciles à installer. En revanche, ils ont un faible rendement et ne sont pas autosuffisants.

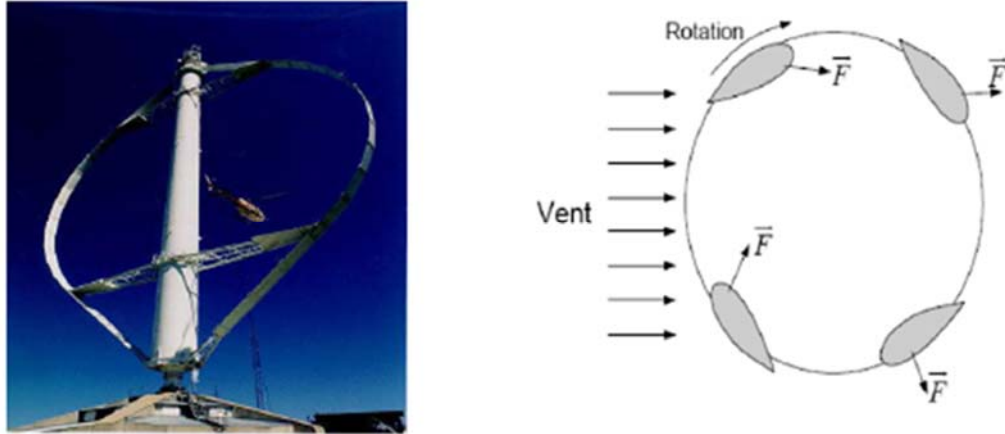


Figure 1.4. Éolienne à axe vertical type Darrieus

### B. Savonius

Cette éolienne est également moins performante qu'une éolienne classique, mais présente l'avantage de pouvoir fonctionner dans toutes les directions de vent. Les éoliennes sont compactes et leur axe vertical réduit les vibrations qui peuvent être très contraignantes pour les bâtiments.

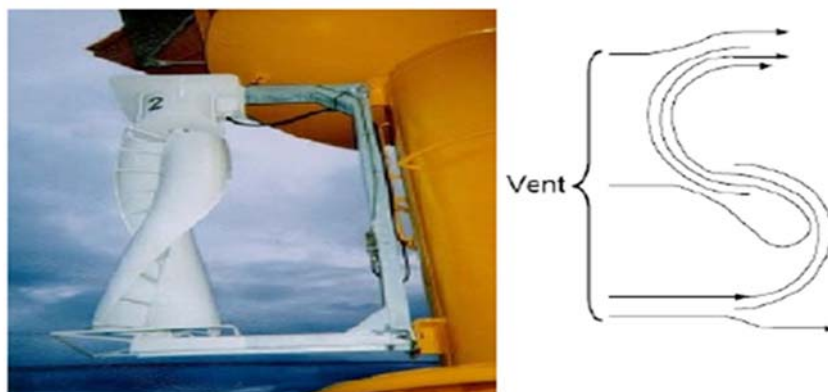


Figure 1.5. Éolienne Savonius

## 1.7.2. Selon le mode de fonctionnement

### 1.7.2.1. Éolienne à vitesse fixe

Elles ont été les premières à être développées. Dans cette topologie, le générateur utilisé fonctionne à une vitesse de rotor confinée dans une zone de vitesse constante. Ce générateur peut être connecté directement au réseau et sa vitesse est déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles, figure 1.5 [13].

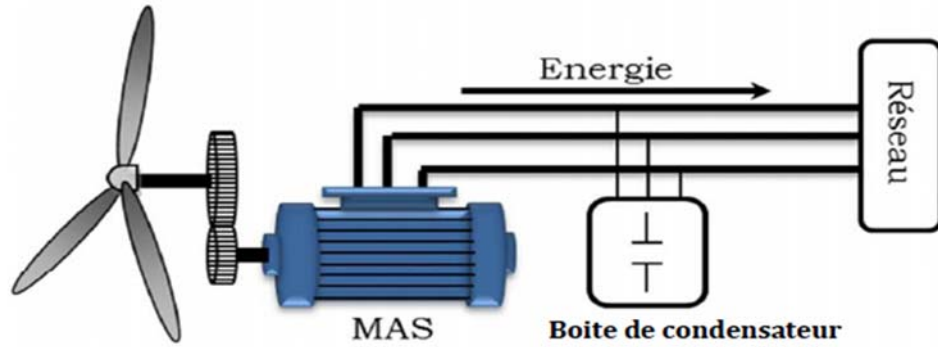


Figure 1.6. Éolienne directement connectée au réseau

### a. Avantages

Les avantages principaux de ce type :

- ✓ Système électrique plus simple
- ✓ Moins cher
- ✓ Pas besoin de système électronique
- ✓ Plus fiable (moins d'entretien)

### b. Inconvénients

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance

### 1.7.2.2. Fonctionnement à vitesse variable

Il se compose d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces derniers (MADA et MSAP) sont installés principalement pour augmenter la puissance récoltée à partir du vent et pour les options de personnalisation.

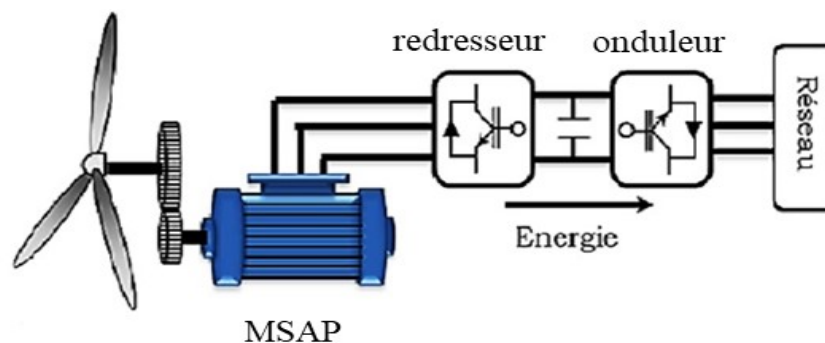


Figure 1.7. Aérogénérateur à vitesse variable

### a. Avantages

- ✓ Optimisation d'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor
- ✓ Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau
- ✓ Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance
- ✓ Turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple
- ✓ Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité
- ✓ Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- ✓ Réduction des bruits acoustiques

### b. Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,)
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisé
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

## 1.8. Analyse des ZONES de Fonctionnement d'une Éolienne en Fonction de la Vitesse du Vent

Une courbe de puissance détermine la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses de vent. En général, la fonctionnalité fournie par le constructeur permet de définir quatre zones de fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent [7].

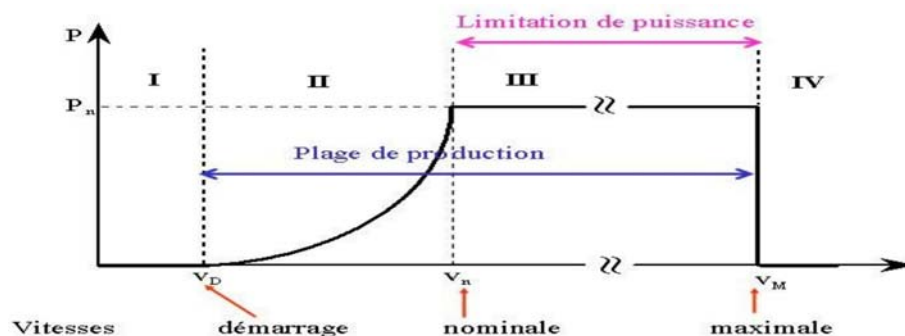


Figure 1.8. Caractéristique Puissance-vitesse du vent

$V_d$  : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

$V_n$  : Vitesse du vent correspondant à la vitesse nominale de la génératrice.

$V_m$  : Vitesse du vent correspondant à la vitesse de décrochage, pour laquelle l'éolienne doit être déconnectée, pour des raisons de sécurité mécanique.

**Zone I :** La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II :** Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III :** La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de  $(P_n)$ . Cette zone correspond fonctionnement à plein charge.

**Zone IV :** La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

## 1.9. Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation

### 1.9.1. Pourquoi la MADA

Les machines à induction à double alimentation (MADA) gagnent en popularité en raison de certains avantages par rapport à tous les autres types de générateurs à vitesse variable. Son utilisation dans les chaînes de conversion électromécaniques comme les éoliennes et les moteurs a connu une croissance impressionnante ces dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé pour redresser et onduler le courant alternatif dans le rotor fait partie de la puissance nominale du générateur et coûte moins cher par rapport aux topologies concurrentes [14].

### 1.9.2. Fonctionnement en quatre quadrants de la MADA

En général, MADA peut fonctionner comme un moteur ou un générateur, mais la différence avec d'autres types de machines est que la vitesse ne détermine plus le mode de fonctionnement du moteur ou du générateur dans MADA.

En fait, nous savons qu'une machine à cage d'écureuil doit tourner en dessous de la vitesse synchrone pour fonctionner comme un moteur, et au-dessus de la vitesse synchrone pour fonctionner comme un générateur [8].

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [15].



### 1.9.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La figure 1.9 montre que la puissance est fournie au stator via le réseau et que la puissance de glissement circule à travers le rotor et est réinjectée dans le réseau. Ainsi, le moteur tourne en dessous de la vitesse synchrone. Les machines asynchrones classiques à cage d'écurueil fonctionnent également de cette manière, mais la perte de joules dans les rotors fait perdre la force de glissement. [16].

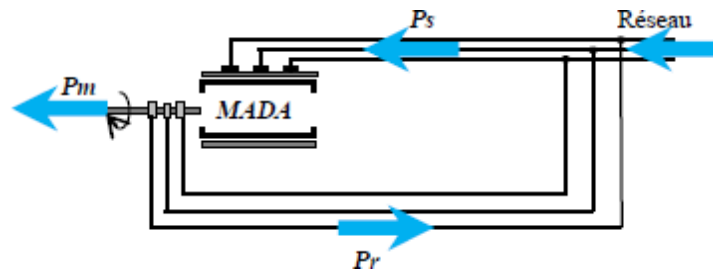


Figure 1.9. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

### 1.9.2.2. Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

La Figure 1.10 montre que la puissance est délivrée du réseau au stator et que la puissance de glissement est également délivrée du réseau au rotor. Par conséquent, le moteur tourne au-delà de la vitesse synchrone. Une machine asynchrone en cage classique ne peut pas effectuer cette opération [16].

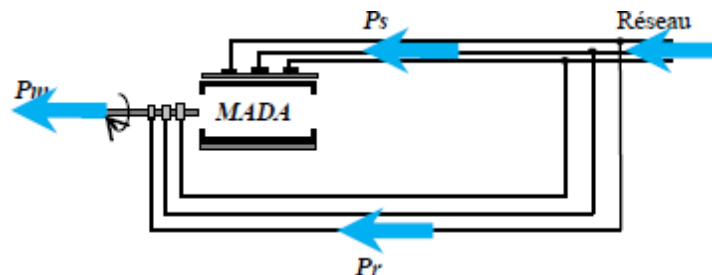


Figure 1.10. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

### 1.9.2.3. Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

La figure 1.11 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [16].

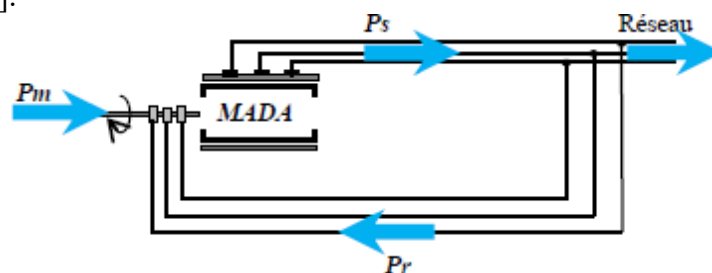


Figure 1.11. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

### 1.9.2.4. Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

La figure 1.12 montre que la puissance est délivrée du stator au réseau et que la puissance de glissement est récupérée par le rotor et renvoyée au réseau. Par conséquent, le fonctionnement du générateur s'effectue au-delà de la vitesse synchrone. Une machine asynchrone à cage d'écureuil classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la force de glissement est consommée sous forme de pertes joules dans le rotor [16].

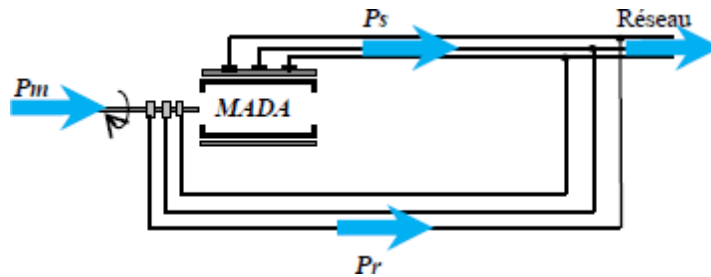


Figure 1.12. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

Le tableau suivant résume bien le fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

Tableau 1.1. Les conditions mathématiques pour le fonctionnement de la MADA [17].

		Les modes de fonctionnement		
		Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$	Glissement
Régime	Hypo-synchrone	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$g > 0$
	Hyper-synchrone	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$	$g < 0$

## 1.9.3. Différentes structures de la MADA

### 1.9.3.1. Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

La figure 1.13 montre que le stator est directement connecté à l'alimentation et les grandeurs rotoriques sont contrôlée par un convertisseur de puissance. Le contrôle par le rotor de l'état électromagnétique de la machine permet au rotor de s'éloigner de la vitesse synchrone et de continuer à fonctionner à la fréquence et à l'amplitude nominales du réseau [21]. Les dimensions du convertisseur sont proportionnelles au glissement maximal du rotor. Autrement dit, cela dépend de l'écart maximal entre la vitesse synchrone et la vitesse réelle du rotor [22].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse [23].

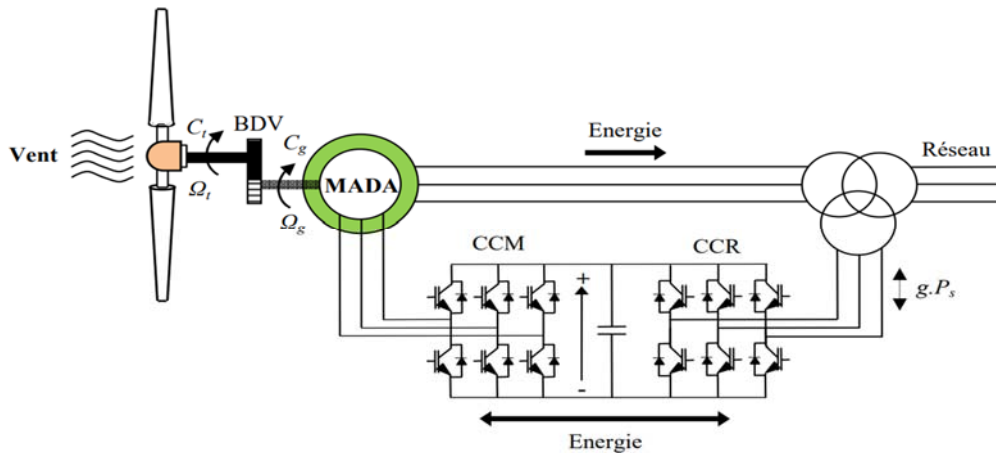


Figure 1.13. Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables

#### a. MADA à structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est illustrée dans la figure 1.14, le stator est directement connecté au réseau, le rotor est connecté au redresseur et l'onduleur est connecté à la sortie du redresseur. L'ensemble redresseur et onduleur est dimensionné pour une partie de la puissance nominale de la machine [22].

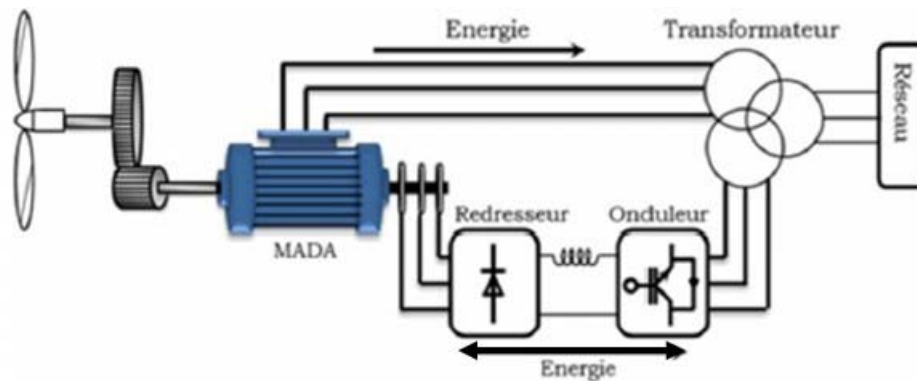


Figure 1.14. MADA – structure de Kramer

#### b. MADA à énergie rotorique dissipée

La figure 1.15 montre cette configuration, avec le stator directement connecté au secteur et le rotor connecté au redresseur. Une charge résistive est ensuite appliquée à la sortie du redresseur via un hacheur IGBT ou GTO. Le pilotage de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par les enroulements rotoriques, permettant à la machine asynchrone de fonctionner à vitesse variable tout en restant dans la partie stable de la caractéristique couple-vitesse.

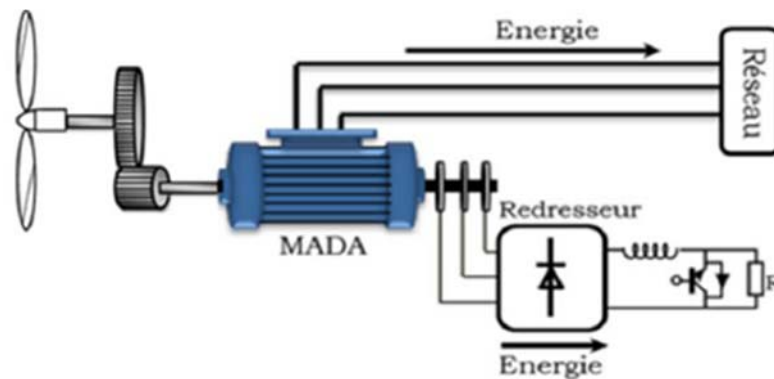


Figure 1.15. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

### c. MADA à structure de « Scherbius » avec cyclo-convertisseur

Dans cette configuration la liaison redresseur-onduleur est remplacée par un cyclo-convertisseur figure 1.16, permettant un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, on parle de "configuration Scherbius". Le principe d'un cyclo-convertisseur est d'utiliser une partie de la tension sinusoïdale du réseau pour reproduire des ondes de plus basse fréquence. Par conséquent, son utilisation crée des interférences harmoniques importantes qui affectent négativement le facteur de puissance de l'appareil. Les progrès de l'électronique de puissance ont remplacé le cyclo-convertisseur par des structures à deux convertisseurs IGBT commandés en MLI [24].

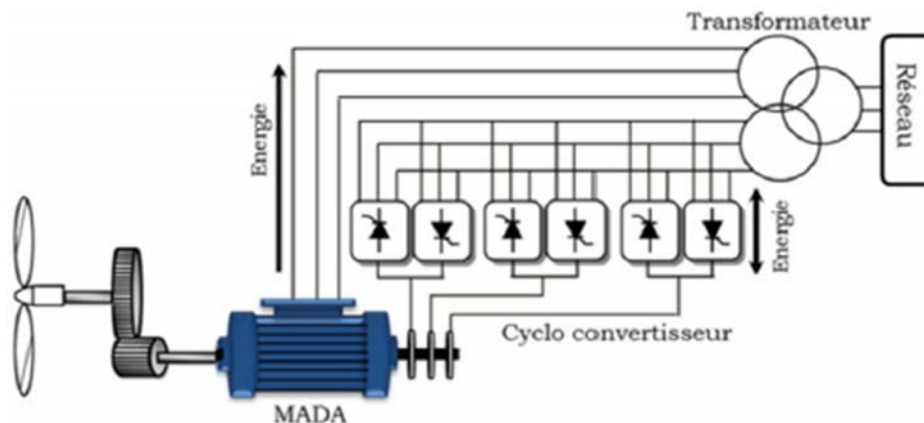


Figure 1.16. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

### 1.9.3.2. Machine Asynchrone à Double Alimentation type "Brushless"

Cette machine se compose de deux enroulements de stator triphasés. L'un des enroulements est directement connecté au réseau et utilisé pour la transmission de puissance. Le deuxième enroulement a une section de conducteur plus petite et peut modifier le courant d'excitation de la machine. Le

stator haute puissance est directement connecté au réseau et le convertisseur est placé entre le stator basse puissance et le réseau, figure 1.17.

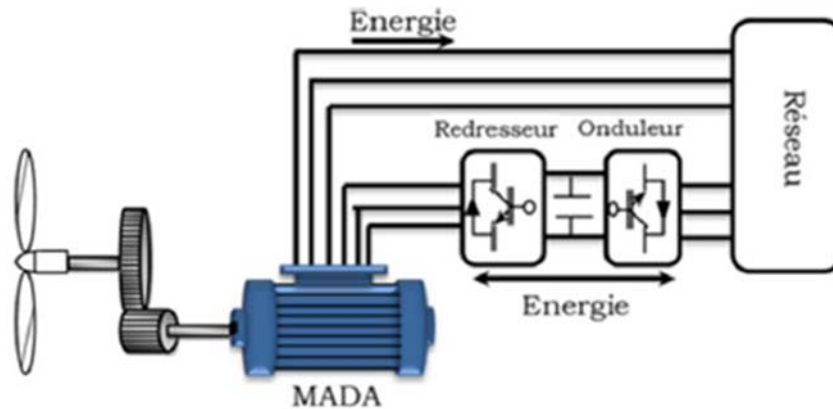


Figure 1.17. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

## 1.10. Avantages et inconvénients de la MADA

### a. Avantages

- ✓ Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [10].
- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive [18].
- ✓ Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes de la machine et augmentant son rendement [19].

### b. Inconvénients

- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus important que celle de la machine classique [8].
- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais [20].
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage [19].

### **1.11. Conclusion**

Ce chapitre a fourni des informations générales sur l'énergie éolienne. A cet égard, le concept de base de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique a été rappelé. Différents types d'éoliennes avec des machines électriques utilisées pour cette conversion d'énergie ont été décrites. Ces caractéristiques de fonctionnement nous ont conduit à opter pour une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

Pour bien exploiter la machine à double alimentation dans l'étude d'un système éolien, sa modélisation et sa commande sont indispensables. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

## Chapitre 02

---

**MODELISATION DU SYSTEME (TURBINE EOLIENNE + MADA)**


---

**2.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et à la simulation des différentes parties d'un aérogénérateur à base de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette partie nous allons présenter le modèle dynamique de la turbine et nous montrons toutes les équations caractéristiques. Ensuite, nous allons présenter aussi le modèle dynamique de la machine à double alimentation dans le repère naturel (a, b, c) et le repère de Park (d, q, o). Pour cela, nous proposons les équations électriques, magnétiques et mécaniques et le bilan des puissances de la MADA, Et dans la deuxième partie, nous présenterons la modélisation du convertisseur associé.

**2.2. Modélisation de la partie mécanique**

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pâles de longueur R entrainant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G.

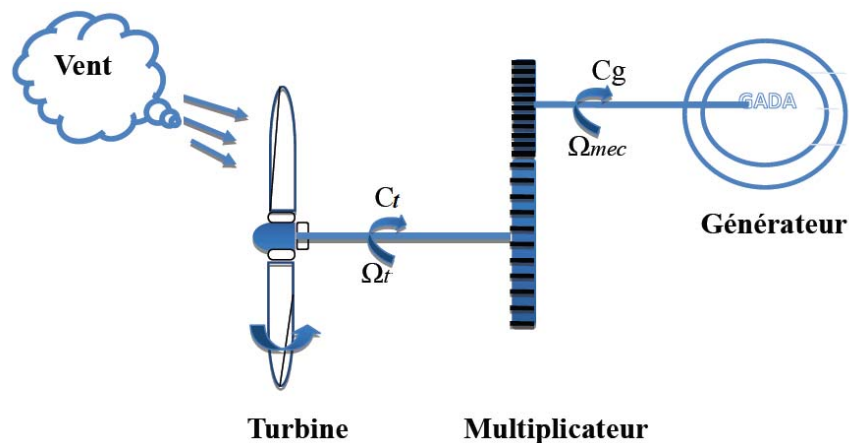


Figure 2.1. Schéma de la turbine éolienne

**2.2.1. Modèle du vent**

Le vent est la source principale de l'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique.

$$v(t) = 10 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (2.1)$$

Avec  $\omega=2\pi/10$  :

La figure 2.2 Représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 10m/s.

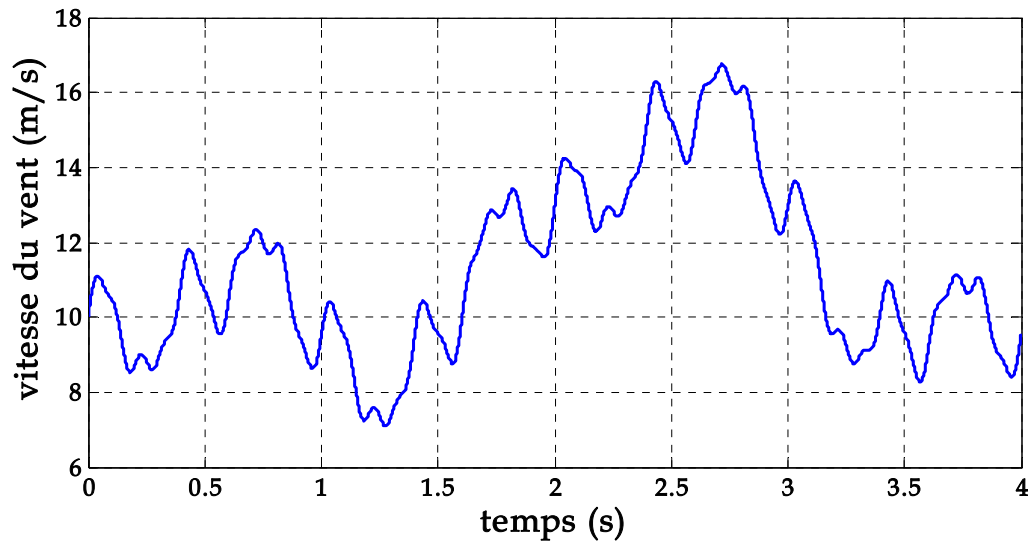


Figure 2.2. Simulation du profil de la vitesse du vent

### 2.2.2. Modélisation de la turbine

Les éoliennes captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en couple qui fait tourner les pâles du rotor. La puissance de la turbine [25] peut être exprimée comme suit :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.2)$$

Avec :

$$\rho: 1.25 \text{ Kg/m}^3$$

Le ratio de la vitesse  $\lambda$  représente le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse du vent. Il est donné par l'équation :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \quad (2.3)$$

La limite d'extraction de puissance d'un seul rotor d'éolienne est connue pour être de 16/27 (ou 59,3%) de l'énergie cinétique du vent traversant la zone balayée du rotor, connue sous le nom de limite de Betz ou Betz-Zhukovsky limite.

Dans le cadre de ce mémoire nous avons utilisé une éolienne de 1,5 MW dont les paramètres sont donnés en Annexe (A). Le coefficient de puissance  $C_p$  d'une éolienne a été donné empiriquement comme le montre l'expression suivante :

$$C_p(\lambda; \beta) = 0.5176 \left[ \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2.4)$$



Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

La variation du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pâles  $\beta_i$  est illustrée à la figure 2.3. On note que si pour des angles constants  $\beta_i$  ( $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ ), on peut garder le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda_{opt}$  à chaque instant la puissance captée par l'éolienne sera maximale. On note que  $C_p$  atteint un maximum pour un l'angle  $\beta = 0^\circ$ , ce qui nous donne  $\lambda_{opt}$ .

Le couple de la turbine :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho}{2} S \cdot v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (2.6)$$

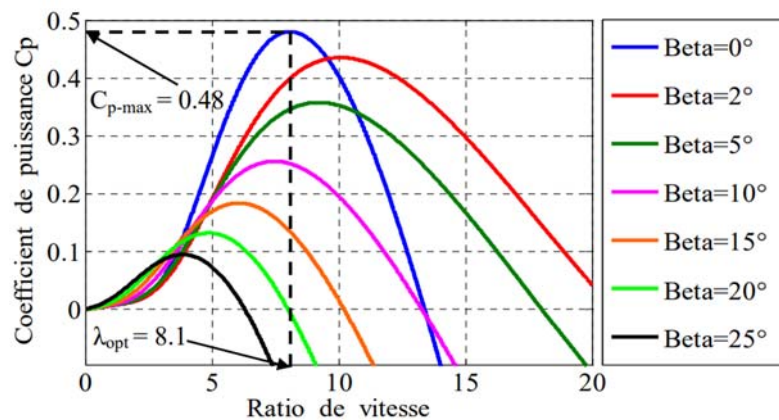


Figure 2.3. Coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse

### 2.2.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est un intermédiaire entre la turbine et le générateur. Son but est d'adapter la vitesse  $\Omega_t$  de la turbine à la vitesse  $\Omega_{méc}$  de la génératrice. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain ( $G$ ). L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont ignorés. La perte d'énergie dans le multiplicateur est considérée comme nulle. C'est un appareil très complexe et nous le modélisons très simplement par les deux équations suivantes [26].

$$G = \frac{C_t}{C_g} \quad (2.7)$$

$$\Omega_{méc} = G \cdot \Omega_t \quad (2.8)$$

### 2.2.4. Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  et comprend la masse des pâles et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [27].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{2.9}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor de la génératrice. Ce couple mécanique est la résultante du couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$  et le couple de la turbine ramenée à l'arbre rapide  $C_g$  [28].

$$\sum C = C_{méc} = J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \tag{2.10}$$

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{2.11}$$

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \tag{2.12}$$

Le schéma bloc du modèle de la turbine est donné sur la figure 2.3.

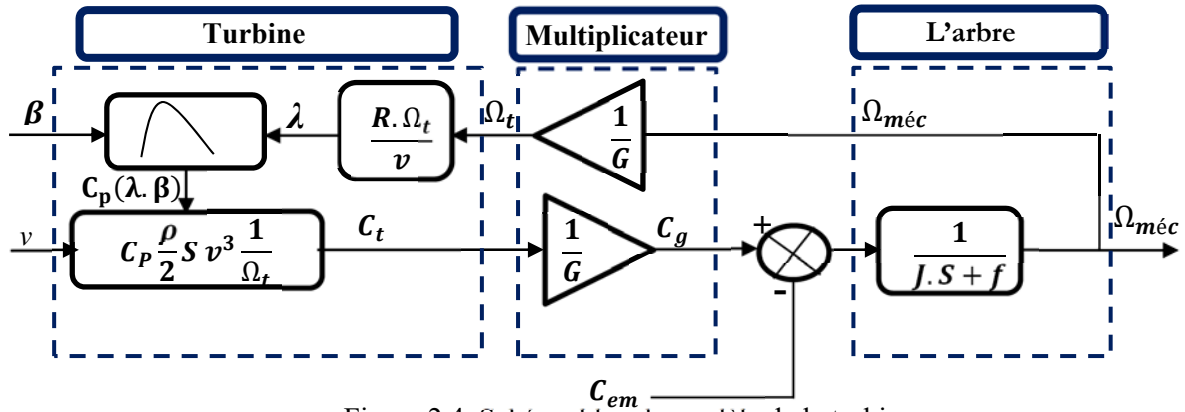


Figure 2.4. Schéma bloc du modèle de la turbine

### 2.2.5. Techniques d'extraction de maximum de la puissance

Les éoliennes utilisées pour produire de l'électricité doivent pouvoir produire un maximum de puissance en tirant le meilleur parti de l'énergie disponible dans le vent. Il est donc nécessaire de concevoir une stratégie de commande qui maximise la puissance générée (par couple électromagnétique) en ajustant la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$ , et en ajustant la vitesse

de rotation du générateur à une valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme une grandeur de perturbation [18].

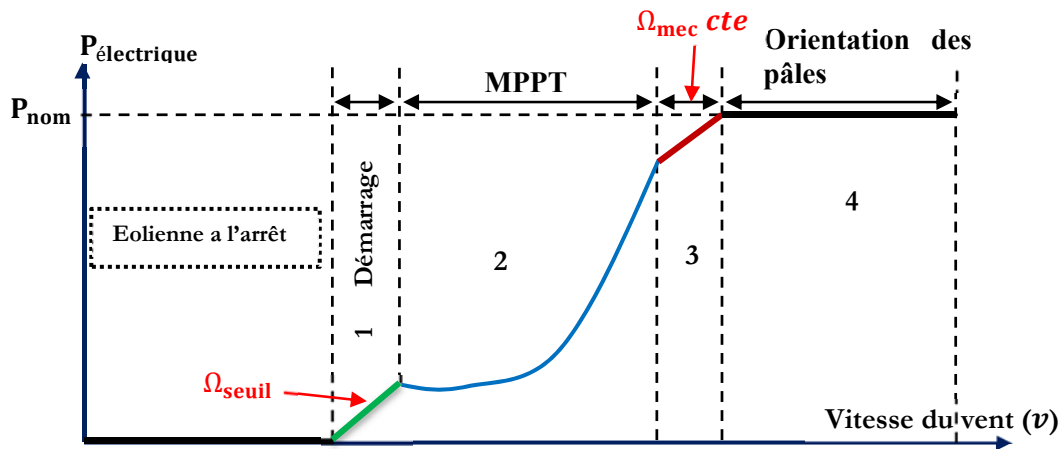


Figure 2.5. Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

**Zone1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).

**Zone2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un  $C_p$  maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

**Zone3** : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale  $P_{nom}$ .

**Zone4** : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pâles. (Angle de calage), c'est le « Pitch Control ».

On distingue deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite

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

### 2.2.5.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Cette première stratégie de commande consiste à réguler le couple électromagnétique de la génératrice afin de fixer la vitesse mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Si la valeur maximale du coefficient  $C_p$  est atteinte, la puissance

mécanique est maximale. Ceci est obtenu lorsque la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$ . Par conséquent, la vitesse de rotation de référence de la MADA  $\Omega_g^*$  [18] est obtenue à partir de l'équation (2.8).

$$\Omega_g^* = G \Omega_t^* \tag{2.13}$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \tag{2.14}$$

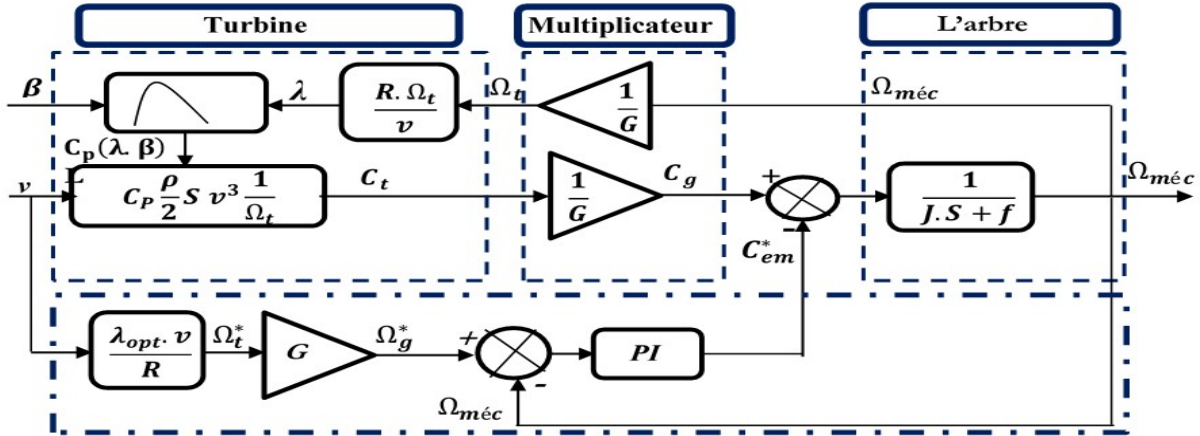


Figure 2.6. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

**2.2.5.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse**

Cette stratégie de recontrôle est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent change peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant l'état stationnaire de la turbine [18].

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{2.15}$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottement visqueux  $C_{vis} = 0$ , on obtient :

$$C_g = C_{em} \tag{2.16}$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{t-est}}{G} \tag{2.17}$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (2.6) :

$$C_{t-est} = C_p \frac{\rho \cdot S}{2} \frac{1}{\Omega_{t-est}} v_{est}^3 \tag{2.18}$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{t-est}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \tag{2.19}$$

En regroupant ces quatre équations (2.19) (2.18) (2.17) (2.16), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3} \tag{2.20}$$

Pour extraire le maximum de la puissance on fixe le rapport de vitesse à la valeur  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p-max}$ . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3} \tag{2.21}$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice :

$$C_{em-ref} = K \cdot \Omega_{méc}^2 \tag{2.22}$$

Le schéma bloc de la figure 2.7 résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

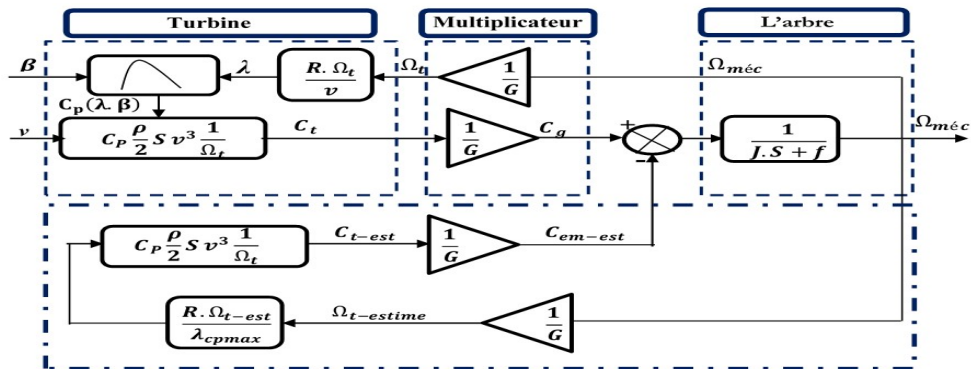


Figure 2.7. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

### 2.3. Modélisation de la MADA

#### 2.3.1. Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligé.

- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles statoriques sont proportionnel à l'angle entre les bobines correspondantes.

### 2.3.2. Modèle dynamique de la MADA

La représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation dans Le repère triphasé est donnée par la figure 2.8.

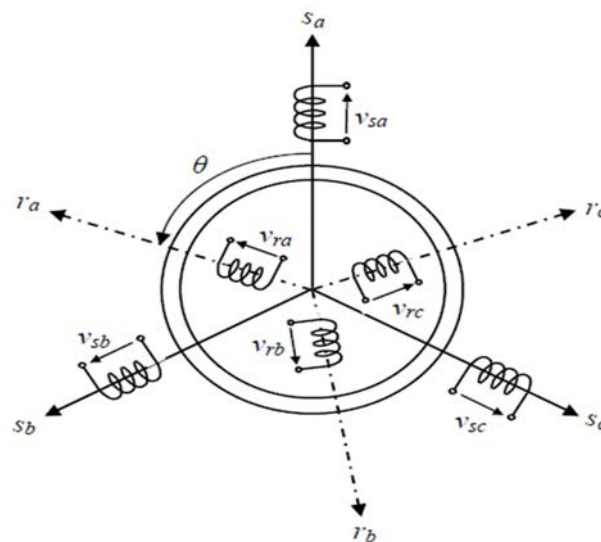


Figure 2.8. Représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation

#### 2.3.2.1. Équations électriques

Pour établir le modèle de la MADA, nous déterminons un modèle de machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle est présenté de manière similaire au modèle de machine asynchrone à cage d'écureuil. Un défi est la présence de tensions de rotor non nulles. Commençons par les équations générales d'une machine asynchrone à rotor bobiné [29].

- Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (2.23)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$[v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (2.25)$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} \end{cases} \quad (2.27)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$[v_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (2.29)$$

Avec :

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

### 2.3.2.2. Equations magnétiques

On sait que :

$$[\varphi] = [L] \cdot [I] \quad (2.31)$$

Dans la machine asynchrone, il y a six bobines couplées magnétiquement. Chacune d'entre elle va influencer ses voisines. Les tensions que l'on retrouve aux bornes de ces bobines vont donc être marquées par les mutuelles inductances des autres.

Les équations sont représentées comme suit :

- Pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = \ell_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sb} + M_s \cdot i_{sc} + M_{aa} \cdot i_{ra} + M_{ab} \cdot i_{rb} + M_{ac} \cdot i_{rc} \\ \varphi_{sb} = \ell_s \cdot i_{sb} + M_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sc} + M_{ba} \cdot i_{ra} + M_{bb} \cdot i_{rb} + M_{bc} \cdot i_{rc} \\ \varphi_{sc} = \ell_s \cdot i_{sc} + M_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sb} + M_{ca} \cdot i_{ra} + M_{cb} \cdot i_{rb} + M_{cc} \cdot i_{rc} \end{cases} \quad (2.32)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$[\varphi_{ss}] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (2.34)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{ra} = \ell_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rb} + M_r \cdot i_{rc} + M_{aa} \cdot i_{sa} + M_{ba} \cdot i_{sb} + M_{ca} \cdot i_{sc} \\ \varphi_{rb} = \ell_r \cdot i_{rb} + M_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rc} + M_{ab} \cdot i_{sa} + M_{bb} \cdot i_{sb} + M_{cb} \cdot i_{sc} \\ \varphi_{rc} = \ell_r \cdot i_{rc} + M_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rb} + M_{ac} \cdot i_{sa} + M_{bc} \cdot i_{sb} + M_{cc} \cdot i_{sc} \end{cases} \quad (2.35)$$

Sus forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = [L_{rr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[\varphi_{sr}] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \quad (2.37)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} \ell_s & M_s & M_s \\ M_s & \ell_s & M_s \\ M_s & M_s & \ell_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} \ell_r & M_r & M_r \\ M_r & \ell_r & M_r \\ M_r & M_r & \ell_r \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Et la matrice des inductances mutuelles stator-rotor :

$$[Msr] = [Mrs]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$



Avec :

[M] : max de l'inductance mutuelle statorique-rotorique lorsque les axes des bobines sont confondus

### 2.3.2.3. Equations mécanique

L'équation mécanique reflétant le mouvement de rotation de l'arbre du moteur électrique est donné par le couple électromagnétique [29].

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega + C_r \quad (2.40)$$

Avec :

$C_r$  : couple résistance

$C_{em}$  : couple électromécanique

$\Omega$  : la vitesse mécanique de la machine

$f$  : coefficient de frottement

$J$  : moment d'inertie

### 2.3.3. Modèle de la MADA dans le plan (d q)

#### 2.3.3.1. La transformation de Park

Pour trouver la loi de commande d'un moteur à courant alternatif, on peut le modéliser dans un repère tournant (d, q), dont l'orientation est a priori arbitraire. Le modèle est obtenu en transformant virtuellement un moteur triphasé en un moteur biphasé équivalent [32-18].

Cette transformation permet de passer d'un système triphasé à un système diphasé, elle est réalisée en faisant correspondre les grandeurs réelles à leurs composantes unipolaires, directe et en quadrature, figure 2.9.

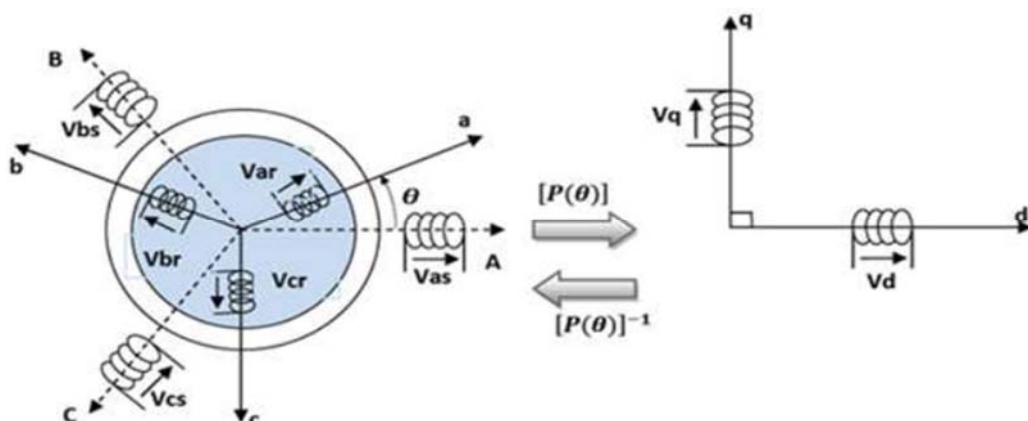


Figure 2.9. Passage du triphasé au biphasé et inverse

Pour le passage d'un système triphasé à un système biphasé, la matrice  $P[\theta]$  est utilisée :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Les changements de variables liées au courant, à la tension et au flux sont définis par des transformations

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [p(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Avec  $x$  : tension, courant ou flux est :

- O : indice de l'axe homopolaire
- d : indice de l'axe direct
- q : Indice de l'axe en quadrature

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

On obtient la variable réelle à partir de la variable biphasique par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

### 2.3.3.2. Équations électriques de la MADA dans le repère (dq)

- Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (2.45)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.46)$$

### 2.3.3.3. Équations magnétique de la MADA dans le repère (dq)

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

- Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (2.47)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (2.48)$$

Avec :

$L_s = \ell_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique

$L_r = \ell_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique

$L_m = \frac{3}{2} M$  : Inductance mutuelle cyclique statorique-rotorique

### 2.3.3.4. Équation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être obtenu à l'aide du bilan de puissance. En résulte Plusieurs expressions toutes égales :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\phi_{sq} I_{rd} - \phi_{sd} I_{rq}) \quad (2.49)$$

P : est le nombre de paires de pôles de la MADA

### 2.3.3.5. Puissances actives et réactives statoriques et rotoriques

- Pour le stator :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq}) \end{cases} \quad (2.50)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq}) \\ Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq}) \end{cases} \quad (2.51)$$

## 2.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce travail on va utiliser la méthode d'orientation du flux statorique. Le champ est alors tourné et orienté suivant le flux statorique d'axe direct [18-30 et 31].

On a donc :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

Les expressions des tensions statoriques de la machine deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (2.53)$$

Les expressions des flux statoriques de la machine deviennent :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (2.54)$$

A partir de l'équation (2.54), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (2.55)$$

En remplaçant dans l'équation des flux (2.48), les courants statoriques par l'expression (2.55), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \sigma L_r I_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \phi_{rq} = \sigma L_r I_{rq} \end{cases} \quad (2.56)$$

Avec :  $\sigma$  coefficient de dispersion de Blondel est donné par  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (2.56) par leurs expressions dans l'équation (2.46), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \frac{L_m}{L_s} V_s \end{cases} \quad (2.57)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \frac{L_m}{L_s} V_s \end{cases} \quad (2.58)$$

L'adaptation des équations des puissances (2.50) au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{sd}=0$ ) donne :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s I_{sq} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s I_{sd} \end{cases} \quad (2.59)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (2.55) dans l'équation (2.59) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd}) \end{cases} \quad (2.60)$$

En tirant  $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  de l'équation (2.53), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{3}{2} \left( \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \right) \quad (2.61)$$

En remplaçant (2.53) dans (2.49), le couple de la MADA on aura pour expression :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} I_{rq} \quad (2.62)$$

En examinant les équations (2.57), (2.60), (2.61) et (2.62), on peut établir le schéma bloc de la MADA illustré dans la figure 2.10 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactive statoriques et le couple électromagnétique.

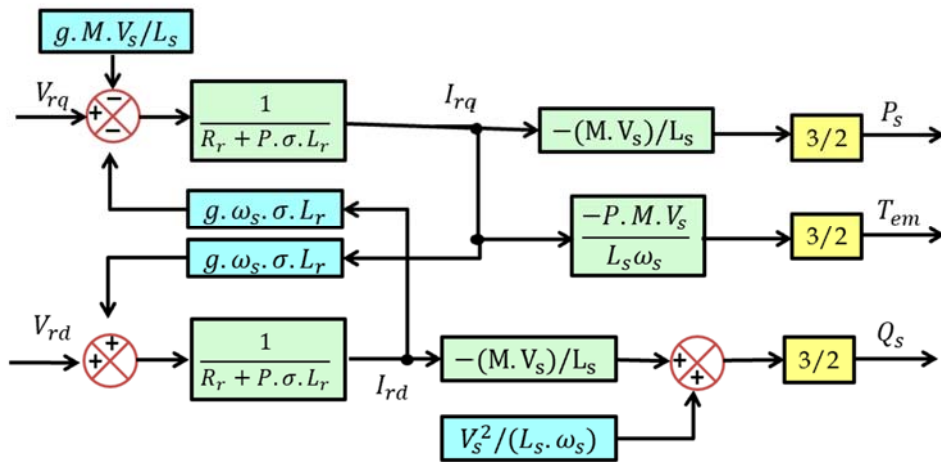


Figure 2.10. Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

### 2.5. Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance

Ce convertisseur de puissance est composé de deux parties principales, un redresseur de courant du côté machine (CCM) associé à un onduleur de tension du côté réseaux (CCR), et la fréquence du côté du rotor est limité seulement par la commutation des interrupteurs de puissance qui peuvent être des GTO, IGBT, IGCTs, [33].

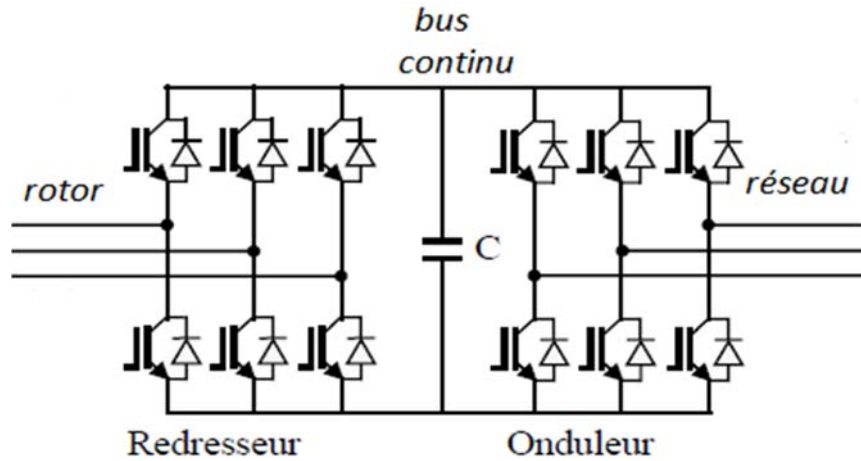


Figure 2.11. Redresseur de tension associé à un onduleur de tension

#### 2.5.1. Modélisation de convertisseur côté réseaux (CCR)

Un onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui convertit le courant continu en courant alternatif triphasé. On considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu) [18-31].

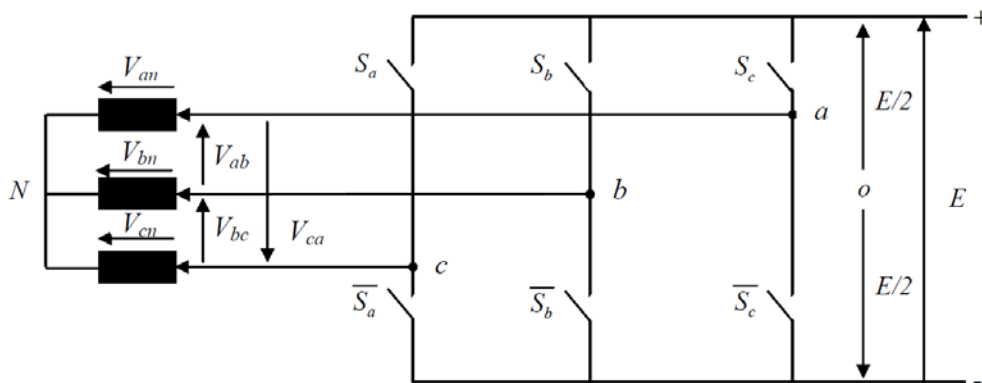


Figure 2.12. Schéma du convertisseur côté réseau CCR (Onduleur)

Les trois tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « o ».

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{ao} - v_{ob} = v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bc} = v_{bo} - v_{oc} = v_{bo} - v_{co} \\ v_{ca} = v_{co} - v_{oa} = v_{co} - v_{ao} \end{cases} \quad (2.63)$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif (MADA), alors on aura :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} \\ v_{ca} = v_{cn} - v_{an} \end{cases} \quad (2.64)$$

La charge est considérée équilibré, il l'en résulte :

$$\begin{cases} v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \\ i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \end{cases} \quad (2.65)$$

Alors :

$$V_{NO} = \frac{1}{3} * (V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \quad (2.66)$$

On obtient finalement les expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} * (2 * V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} * (-V_{ao} + 2 * V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} * (-V_{ao} - V_{bo} + 2 * V_{co}) \end{cases} \quad (2.67)$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

### 2.5.2. Modélisation de convertisseur côté machine

Chaque bobine des phases du rotor de GADA peut être représentée par une force électromotrice (f.e.m.) On désigne par  $e_{ri}$  la tension induite par la phase,  $v_{ri}$  les tensions triphasées à l'entrée du redresseur et,  $i_{ri}$  les courants traversant chaque phase avec  $i = a, c, b$ .

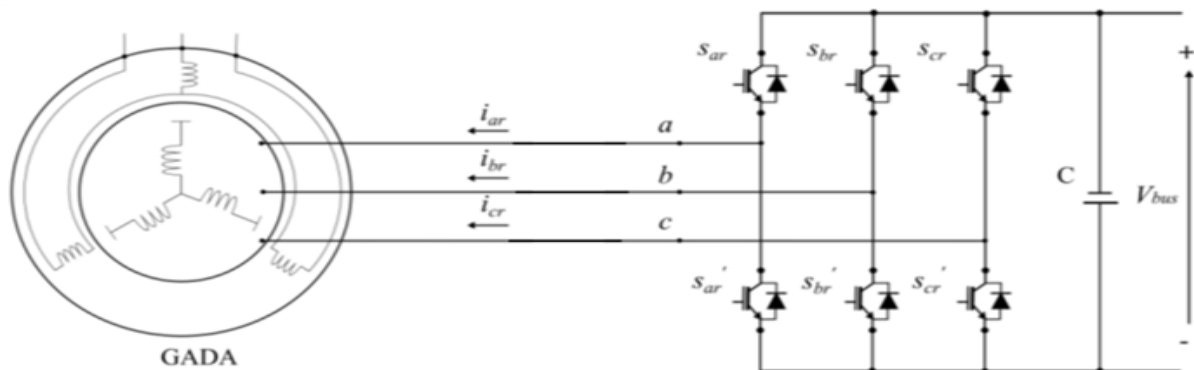


Figure 2.13. Schéma du convertisseur côté machine CCM (redresseur)

La figure 2.13 illustre le schéma fonctionnel du convertisseur côté machine utilisé pour alimenter le rotor du GADA. Le convertisseur côté machine est similaire au convertisseur côté réseau présenté dans la section précédente [34].

### 2.5.3. Le bus continu

La modélisation d'un bus continu capacitif se fait en utilisant un condensateur pour représenter la capacité du bus à stocker et à fournir de l'énergie. Le bus continu capacitif est généralement utilisé dans les systèmes d'alimentation électrique pour assurer une régulation de tension et une compensation de puissance.

L'équation fondamentale qui régit le comportement du bus continu capacitif est la relation courant-tension du condensateur, qui est donnée par :

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} i_{dc}(t) \quad (2.69)$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (2.70)$$

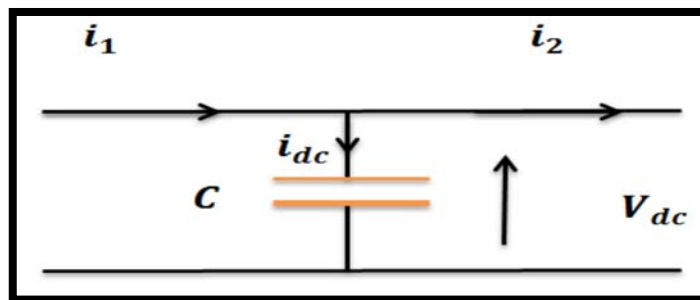


Figure 2.14. Schéma de bus continu

Avec :

$i_{dc}$  : Courant de charge du condensateur.

$i_1$  : Courant redressé.

$i_2$  : Courant à onduler.

### 2.5.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture d'un interrupteur, on utilise la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) à une onde sinusoïdale générale de référence appelée modulateur la technique est caractérisée par deux paramètres [25].

L'indice de modulation " $m$ " est défini comme le rapport de la fréquence porteuse à la fréquence de la tension de référence  $f$  :



$$m = \frac{f_p}{f} \quad (2.71)$$

Le taux de modulation  $\tau_m$  est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_{ref}$ ) sur la porteuse ( $V_p$ ) :

$$\tau_m = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (2.72)$$

$f_p$  : Fréquence de la porteuse et  $T_p$  sa période

$f$  : Fréquence de l'onde de référence

$V_{ref}$  : Amplitude de la tension

$V_p$  : Amplitude de la porteuse

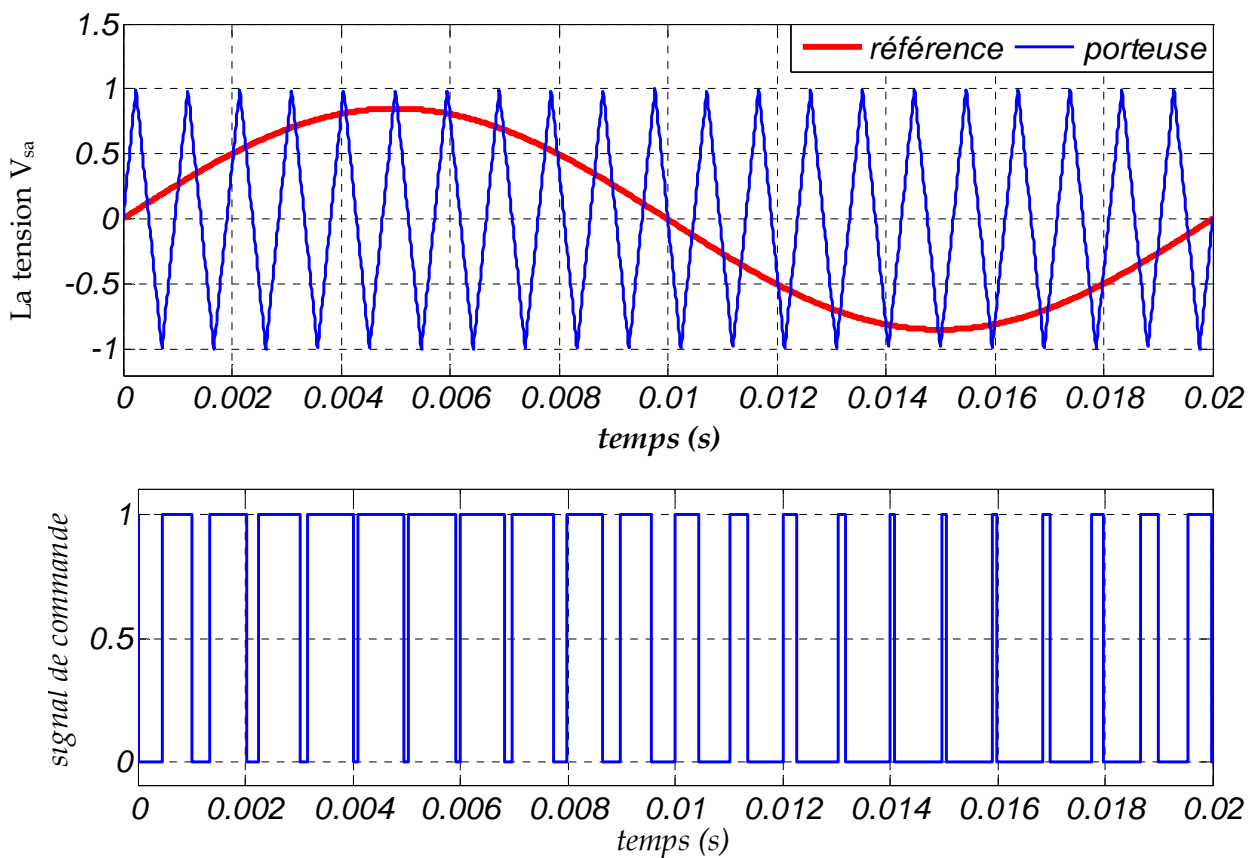


Figure 2.15. Commande modulation de largeur d'impulsion

## 2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation en modélisant d'abord la partie mécanique (arbre d'entraînement de la turbine) et en expliquant en même temps le principe MPPT.

Nous modélisons ensuite MADA sur la base d'hypothèses simplifiées. Il s'avère que le modèle obtenu est un système complexe. Pour simplifier le modèle, on a recours à un modèle biphasé en utilisant la transformation de Park.

## Chapitre 03

# COMMANDE ET SIMULATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION ÉOLIENNE

---

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la commande des puissances active et réactive de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Le système étudié consiste en un aérogénérateur à base de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) connecté au réseau triphasé.

Nous consacrons une section de ce chapitre à la description de la technique de commande Backstepping classique et intégral, qui permet de résoudre le problème des variations des paramètres de la machine.

L'action intégrale dans la commande Backstepping est une extension qui vise à corriger l'erreur statique en accumulant les erreurs passées au fil du temps. Elle améliore la précision du suivi de référence, mais peut également augmenter la sensibilité aux variations des paramètres du modèle et les oscillations du système. Son utilisation doit donc être soigneusement ajustée en fonction des besoins spécifiques du système et des contraintes qui s'appliquent.

La robustesse de cette technique de commande face aux variations des paramètres du GADA sera testée par simulation sous MATLAB/SIMULINK, ce qui nous permettra d'évaluer ses performances dans des conditions variables et de mieux comprendre son comportement dans différentes situations.

### 3.2. Historique de la commande par Backstepping

La technique du Backstepping est apparue dans les années 1990 et était développée par Kanellakopoulos. (1991) s'inspirant des travaux de Feurer et Morse (1978). D'une part et Tsinias (1989). Kokotovic et Sussmann (1989) d'autre part. Il fournit une approche systématique de la conception de contrôleurs pour les systèmes non linéaires. Le terme backtracking s'applique surtout au processus récursif inhérent à la synthèse. Il permet une synthèse constructive des lois de commande pour les systèmes non linéaires triangulaires en utilisant la théorie de Lyapunov. L'idée est de choisir une fonction de Lyapunov définie positive dont la dérivée est toujours négative [42-43].

### 3.3. Le domaine d'application de la commande par Backstepping

Concevoir des contrôleurs pour de grands systèmes non linéaires est souvent impossible. La commande Backstepping fournit une approche systématique pour résoudre de tels problèmes [38]. Le domaine d'application de cette commande est vaste et englobe les systèmes non linéaires dans divers domaines tels que l'ingénierie électrique, l'automatique, la robotique, l'aérospatiale, etc. Cette approche de commande peut être utilisée pour stabiliser et contrôler des systèmes complexes et non linéaires, indépendamment de leur taille ou de leur complexité. Elle s'avère particulièrement utile dans les systèmes où la linéarisation est difficile ou impossible à réaliser. La commande Backstepping permet de concevoir des lois de commande robustes et efficaces, garantissant la stabilité et les performances souhaitées du système.

### 3.4. Principe de la commande par Backstepping

Le Backstepping est une approche relativement nouvelle pour contrôler les systèmes non linéaires. C'est une technique qui permet la construction de fonctions de Lyapunov stables de manière séquentielle et systématique.

Le principe du Backstepping repose sur sa capacité à séparer le problème complexe de contrôle non linéaire du système en problèmes plus simples et plus petits [35–37-46]. Essentiellement, cette technique synthétise la conception du contrôle en différentes étapes, chacune traitant d'un sous-système plus simple avec des problèmes d'entrée individuelle et de sortie unique. La référence de base pour la prochaine étape de synthèse est établie par chaque sous-système. La fonction de Lyapunov du système global est utilisée pour obtenir la stabilité globale et les performances globales du système [36-47].

La figure suivante illustre le principe de la commande par Backstepping :

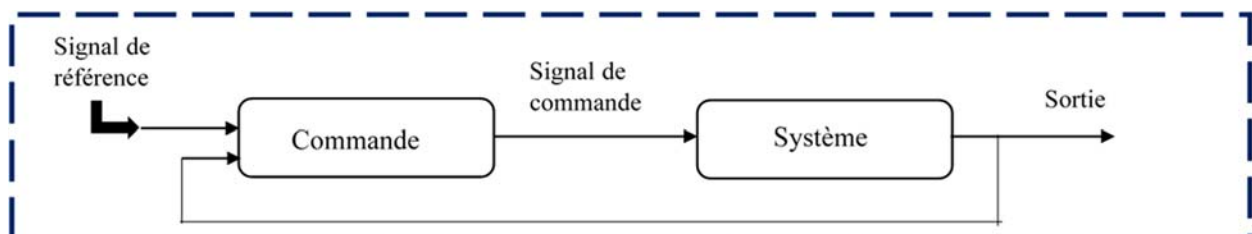


Figure 3.1. Schéma de principe de la commande backstepping

## 3.5. Notions de base de la stabilité des systèmes non linéaires

### 3.5.1. Systèmes non linéaires

Les systèmes physiques décrits par des équations différentielles linéaires à coefficients constants sont appelés des systèmes linéaires. Cette hypothèse de linéarité est basée sur le principe de superposition. En revanche, les systèmes physiques qui ne sont pas décrits par des équations linéaires sont appelés des systèmes non linéaires. Dans de tels cas, le principe de superposition ne peut pas être appliqué [40].

### 3.5.2. Equilibre

Physiquement, un système est en équilibre lorsqu'il maintient son état sans l'influence de forces extérieures. Mathématiquement, cela signifie que la dérivée de l'état du système, notée  $\dot{x}$ , est nulle [40].

### 3.5.3. Plan de phase

Pour comprendre le comportement des systèmes non linéaires, il est courant de représenter leur évolution par des trajectoires dans l'espace. Ces trajectoires sont des courbes qui décrivent l'évolution de l'état du système au fil du temps. Cependant, résoudre les équations différentielles pour obtenir ces trajectoires peut être complexe. C'est pourquoi les techniques basées sur la deuxième méthode de Lyapunov sont largement utilisées pour analyser le comportement des systèmes sans avoir à résoudre leurs équations [40].

### 3.5.4. Stabilité (Définition intuitive)

Lorsque le système revient à son état d'équilibre (s'approche de la position d'équilibre), on dit que le système est stable. En revanche, si une perturbation le déplace de sa position d'équilibre, on dit qu'il est instable [40-43].

### 3.5.5. Stabilité (Selon Lyapunov)

Les méthodes de Lyapunov, connues sous le nom de premières et deuxièmes méthodes, sont des outils d'analyse puissants pour étudier la stabilité des systèmes non linéaires. La première méthode, appelée méthode de linéarisation, utilise une approximation linéaire pour analyser la stabilité autour du point d'équilibre, ce qui permet d'appliquer les outils des systèmes de contrôle linéaire. En revanche, la deuxième méthode, plus générale, se base sur le principe

de l'énergie pour analyser la stabilité. Un système est considéré stable s'il ne s'écarte pas significativement de son état d'équilibre. Lyapunov a développé une fonction similaire avec des propriétés énergétiques qui facilite l'analyse de la stabilité des systèmes [44-45].

### 3.6. Les avantages et inconvénients de la commande Backstepping

La commande Backstepping présente plusieurs avantages et inconvénients [38-39] :

#### a. Avantages

- Simplicité dans la démarche de conception
- Robustesse
- Performances de suivi de référence
- Large champ d'application
- Stabilité du système de contrôle

#### b. Inconvénients

- Les choix des gains
- L'algorithme de calcul
- La limitation des valeurs de la commande

### 3.7. Application du backstepping pour les systèmes d'ordre n

L'application de la commande par Backstepping aux systèmes d'ordre n permet de réguler et contrôler de manière précise les grandeurs et les performances du système, en assurant la stabilité et la robustesse du système [35-41].

Soit le système suivant d'ordre n suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(x_1)\varepsilon_1 \\ \dot{x}_2 = x_3 + f_2(x_1, x_2)\varepsilon_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n + f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})\varepsilon_{n-1} \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)\varepsilon_n + g(x_1, x_2, \dots, x_n)u \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Où  $x \in R^n$ ,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$  sont des scalaires,  $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$  : vecteur de fonction non linéaire avec :

$$f_n(0,0, \dots, 0) = 0 \text{ et } g(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq 0 \tag{3.2}$$

En général, selon le principe du Backstepping, la conception de la loi de commande  $u$  est exécutée en  $n$  étapes. A l'étape  $i$ , le sous-système d'ordre  $i$  est stabilisé par rapport à la fonction de Lyapunov  $v_i$  en concevant une fonction de stabilisation. Les lois de commande sont ensuite établies dans l'étape finale. Le sous-système  $x$  vérifie les hypothèses suivantes :

Considérant  $\varepsilon_1$  comme son entrée de commande  $u$  (commande virtuelle), le système :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \text{ avec } x \in R^n, u \in R, f(0) = 0$$

Admet un retour d'état stabilisant  $u = \alpha(x)$  tel que :

$$\frac{dv(x)}{dx} = [f(x) + g(x)\alpha(x)] \leq -W(x) \leq 0 \tag{3.3}$$

Pour la fonction de Lyapunov  $V$  et la fonction définie positive  $W$

L'algorithme global du Backstepping est donné par

Par convention, on définit :  $e_0 = 0, \alpha_0 = 0, e_1 = x_1 - y_r$

$$e_i = x_i - \alpha_{i-1} - y_r^{i-1}$$

$$\alpha_i = -e_i - k_i e_i - \beta_i$$

Ou  $\beta_1 = W_1, \beta_i = W_1 - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} x_{j+1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{j-1}} y_r^j, 2 \leq i \leq n$

$$W_1 = f_1 \varepsilon_1, W_i = f_1 \varepsilon_1 - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} (f_1 \varepsilon_1)$$

$$u = \frac{1}{g} (\alpha_n + y_r^n)$$

$\dot{E} = AE$  Avec

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & -k_2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & -k_3 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -k_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n \end{bmatrix} \quad E = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ \dots \ e_n]^T$$

### 3.8. Application de la commande par Backstepping classique (BCS-Classique) à une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La commande par Backstepping permet de séparer et de contrôler de manière indépendante les puissances active et réactive d'un générateur asynchrone à double alimentation, garantissant ainsi une dynamique stable pour les erreurs entre les grandeurs de référence et les grandeurs réelles de puissance à chaque instant.

#### 3.8.1. Commande de la puissance active

L'erreur de la puissance active :

$$e_1 = P_s^{ref} - P_s \quad (3.4)$$

La fonction de Lyapunov :

$$V(e_1) = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.5)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 \quad (3.6)$$

Avec :

$$\dot{e}_1 = \dot{p}_s^{ref} - \dot{p}_s = \dot{p}_s^{ref} + \frac{3 V_s L_m}{2 L_s} \frac{di_{rq}}{dt} \quad (3.7)$$

En remplaçant l'expression de la dérivée du courant  $i_{rq}$  dans l'équation de la tension  $v_{rq}$  on obtient:

$$\dot{e}_1 = \dot{p}_s^{ref} + \frac{3 V_s L_m}{2 L_s} \left( -g w_s i_{rd} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \cdot I_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot v_{rq} - g \cdot \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} V_s \right) \quad (3.8)$$

En remplaçant l'équation (3.8) dans (3.6) on obtient :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 = e_1 \left[ \dot{p}_s^{ref} + \frac{3 V_s L_m}{2 L_s} \left( -g w_s i_{rd} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \cdot I_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot v_{rq} - g \cdot \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} V_s \right) \right] \quad (3.9)$$

On tire l'expression de la commande stabilisante backstepping comme suite :

$$v_{rq} = -\frac{2 f_2}{3 f_1} \cdot \dot{p}_s^{ref} + f_2 g w_s i_{rd} + R_r I_{rq} + g f_1 - \frac{2 f_2}{3 f_1} \cdot k_1 e_1 \quad (3.10)$$

Où :

$$f_1 = \frac{V_s L_m}{L_s} \text{ et } f_2 = \sigma L_r$$

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de Lyapunov, en remplaçant l'expression (3.10) dans (3.9), on obtient :



$$\dot{v}(e_1) = -k_1 \cdot e_1^2 < 0 \quad (3.11)$$

Avec :  $k_1$  constante et positive.

### 3.8.2. Commande de la puissance réactive

L'erreur de la puissance réactive est :

$$e_2 = Q_s^{ref} - Q_s \quad (3.12)$$

La fonction de Lyapunov :

$$v(e_2) = \frac{1}{2} e_2^2 \quad (3.13)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{v}(e_2) = e_2 \cdot \dot{e}_2 = e_2 \cdot (\dot{Q}_s^{ref} - \dot{Q}_s) \quad (3.14)$$

Avec :

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{ref} - \dot{Q}_s = \dot{Q}_s^{ref} + \frac{3 V_s L_m}{2 L_s} \frac{di_{rd}}{dt} \quad (3.15)$$

En remplaçant l'expression de la dérivée du courant  $i_{rd}$  dans l'équation de la tension  $v_{rd}$  on obtient :

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{ref} + \frac{3 V_s M_{sr}}{2 \sigma L_s L_r} (v_{rd} - R_r i_{rd} - \sigma l_r w_r i_{rq}) \quad (3.16)$$

En remplaçant la dernière expression (2.16) dans (3.14), nous obtenons :

$$\dot{v}(e_2) = e_2 \left[ \dot{Q}_s^{ref} + \frac{3 V_s M_{sr}}{2 \sigma L_s L_r} (v_{rd} - R_r i_{rd} - \sigma l_r w_r i_{rq}) \right] \quad (3.17)$$

L'expression de la commande stabilisante Backstepping est donnée par :

$$v_{rd} = -\frac{2 f_2}{3 f_1} \dot{Q}_s^{ref} + R_r i_{rd} - g w_s f_2 i_{rq} - \frac{2 f_2}{3 f_1} \cdot k_2 e_2 \quad (3.18)$$

On va remplacer (3.18) dans l'équation (3.17), nous obtenons :

$$\dot{v}(e_2) = -k_2 \cdot e_2^2 < 0 \quad (3.19)$$

Avec :  $k_2$  Constante positive

## 3.9. Application de la commande par Backstepping avec action intégrale (BCS-Intégrale) à une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La commande par Backstepping avec action intégrale (BCS-Intégrale) permet d'intégrer une composante d'intégration dans le processus de commande. Cela permet de traiter les erreurs cumulées au fil du temps et d'améliorer la précision du contrôle. L'action intégrale contribue à

réduire les erreurs de suivi de référence à long terme et à améliorer la performance du système. Cependant, il est important de bien ajuster les paramètres de l'action intégrale pour éviter tout problème de stabilité ou de dépassement.

### 3.9.1. Commande de la puissance active

L'erreur de la puissance active :

$$e_1 = p_s^{ref} - p_s \quad (3.20)$$

Avec :

$$\dot{e}_{01} = e_1 \quad (3.21)$$

$$e_{01} = \gamma \cdot \int_0^t e_1(t) \cdot dt \quad \gamma > 0 \quad (3.22)$$

La fonction de Lyapunov :

$$v(e_1) = \frac{1}{2} \cdot e_1^2 + \frac{1}{2} \cdot e_{01}^2 \quad (3.23)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov :

$$\dot{v}(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 + e_1 \cdot \gamma \cdot e_{01} = e_1(\dot{e}_1 + e_{01}) \quad (3.24)$$

En remplaçant l'équation (3.8) Dans (3.24), on obtient :

$$\dot{v}(e_1) = e_1 \cdot \left( \dot{p}_s^{ref} + \frac{3 V_s L_m}{2 L_s} \left( -g w_s i_{rd} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \cdot I_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot v_{rq} - g \cdot \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} V_s \right) + e_{01} \right) \quad (3.25)$$

On tire l'expression de la commande stabilisante backstepping avec action intégral comme suite:

$$v_{rq} = -\frac{3 f_2}{2 f_1} \cdot \dot{p}_s^{ref} + f_2 g w_s i_{rd} + R_r I_{rq} + g f_1 - \frac{2 f_2}{3 f_1} \cdot (k_1 \cdot e_1 + e_{01}) \quad (3.26)$$

Pour assurer la convergence de la fonction énergie de Lyapunov, en remplaçant l'expression (3.26) dans (3.25) on obtient :

$$\dot{v}(e_1) = -k_1 \cdot e_1^2 \quad (3.27)$$

Avec :  $k_1$  constante positive.

### 3.9.2. Commande de la puissance réactive

L'erreur de la puissance réactive :

$$e_2 = Q_s^{ref} - Q_s \quad (3.28)$$

Avec ;

$$\dot{e}_{02} = e_2 \quad (3.29)$$

$$e_{02} = \gamma \cdot \int_0^t e_2(t) \cdot dt, \gamma > 0 \quad (3.30)$$

La fonction énergie de Lyapunov :

$$v(e_2) = \frac{1}{2} \cdot e_2^2 + \frac{1}{2} \cdot e_{02}^2 \quad (3.31)$$

La dérivée de Lyapunov :

$$\dot{v}(e_2) = e_2 \cdot (\dot{e}_2 + e_{02}) \quad (3.32)$$

En remplaçant l'équation (3.16) Dans (3.32), on obtient :

$$\dot{v}(e_2) = e_2 \cdot (\dot{Q}_s^{\text{ref}} + \frac{3 f_1}{2 f_2} (-R_r i_{rd} + g_{w_s} f_2 i_{rq} + v_{rd}) + e_{02}) \quad (3.33)$$

L'expression de la commande stabilisante backstepping avec action intégrale est donnée par :

$$v_{rd} = -\frac{2 f_2}{3 f_1} \dot{Q}_s^{\text{ref}} + R_r i_{rd} - g_{w_s} f_2 i_{rq} - \frac{2 f_2}{3 f_1} \cdot (k_2 e_2 + e_{02}) \quad (3.34)$$

On va remplacer (3.34), dans l'équation (3.33), nous obtenons :

$$\dot{v}(e_1, e_2) = -k_1 \cdot e_1^2 - k_2 \cdot e_2^2 \quad (3.35)$$

Avec  $k_2$  constante positive, ce qui confirme la stabilité du système.

### 3.10. Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK en appliquant les deux commande Backstepping classique (BCS-Classique) et Backstepping avec action intégrale (BCS-Intégral) à un générateur asynchrone à double alimentation dans un système éolien. Les simulations ont été réalisées dans le but d'évaluer les performances du système contrôlé et d'analyser son comportement dans diverses conditions. Les paramètres de la GADA et de la turbine sont donnés dans l'annexe A.

#### 3.10.1. Test 01= fonctionnement à Vitesse du vent constante

Dans le premier test, nous appliquons des échelons de puissance active et réactive de différentes amplitudes aux entrées de référence, tandis que la vitesse du vent est maintenue constante à 10 m/s. Les échelons de puissance active et réactive appliqués sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1. Les échelons des puissances actives et réactives.

Temps (S)	$P_s^{ref}$ [W]	Temps (S)	$Q_s^{ref}$ [VAR]
$0 < t < 0.3$	-5 00000	$0 < t < 0.5$	-5 00000
$0.3 < t < 0.6$	-10 00000	$0.5 < t < 1$	+5 00000
$0.6 < t < 1$	-15 00000		

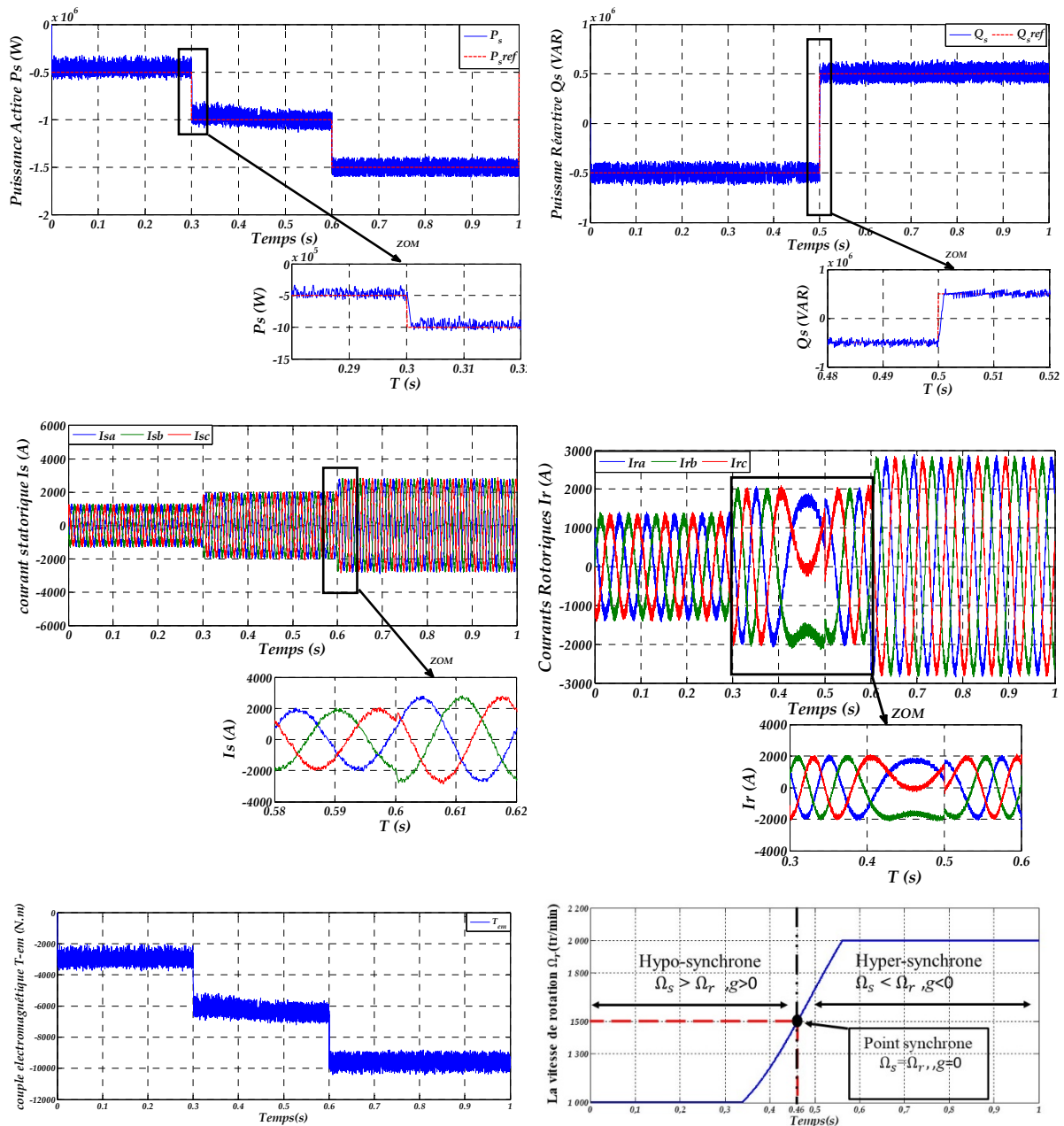


Figure 3.2. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique (test de fonctionnement à Vitesse du vent constante)

La figure 3.2 présente les résultats de simulation pour une vitesse du vent fixe. On remarque que les puissances active et réactive sont découplées avec de bonnes performances. Les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive, avec un temps de réponse rapide et une erreur presque nulle.

Le courant statorique généré par la GADA présente une allure quasi-sinusoïdale. Le courant rotorique est également quasi-sinusoïdal et Le couple électromagnétique a le même comportement que la puissance active.

### 3.10.2. Test 02= fonctionnement à Vitesse de vents variable

Dans le test de fonctionnement à vitesse variable, la référence de puissance réactive est maintenue à zéro et la puissance active de référence est établie par la stratégie MPPT. La figure 3.3 représente les résultats de la simulation pour la commande par BCS-classique.

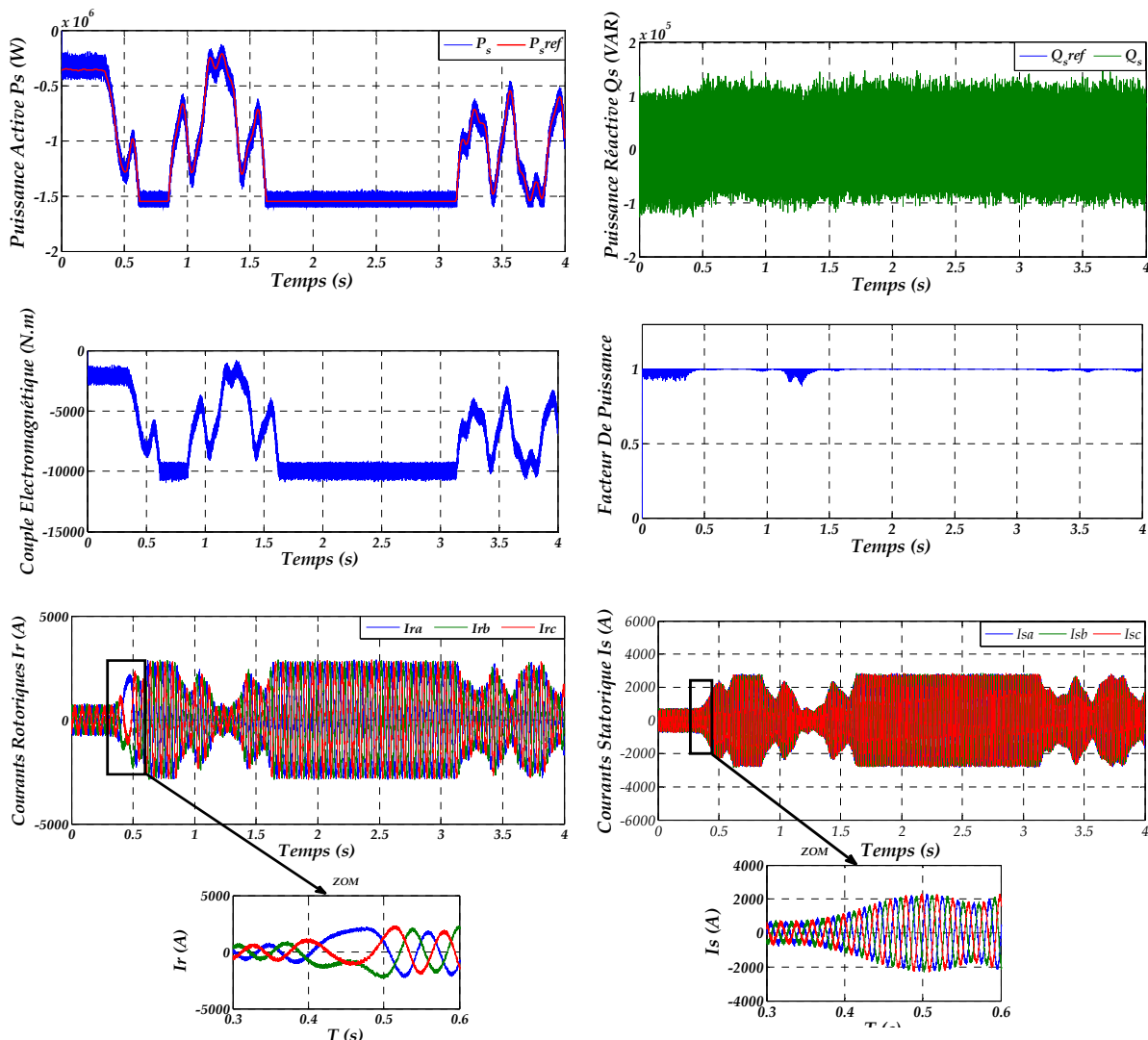


Figure 3.3. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique (test fonctionnement à Vitesse variable)

- La puissance active statorique  $P_s$  suit précisément la référence générée par la turbine éolienne. Cela signifie que le générateur convertit efficacement l'énergie éolienne en puissance active électrique.
- Le facteur de puissance est maintenu à une valeur unitaire ( $F_p = 1$ ), ce qui signifie que la puissance réactive est nulle.
- Les courants dans le système sont directement proportionnels à la puissance active. Ainsi, lorsque la puissance active augmente, les courants augmentent également.
- En ce qui concerne le courant rotorique, il montre une transition du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone de la MADA en fonction du profil de vent appliqué à la turbine éolienne.

### 3.10.3. Test 03= Robustesse

Dans ce test, nous varions les paramètres de la MADA en réduisant de 10 % les valeurs de  $L_S$  et  $L_R$  afin d'évaluer la capacité et les performances du système malgré les perturbations externes ou les variations des conditions de fonctionnement. La figure suivante illustre les résultats de simulation pour les commandes BCS-Classique et BCS-Intégrale.

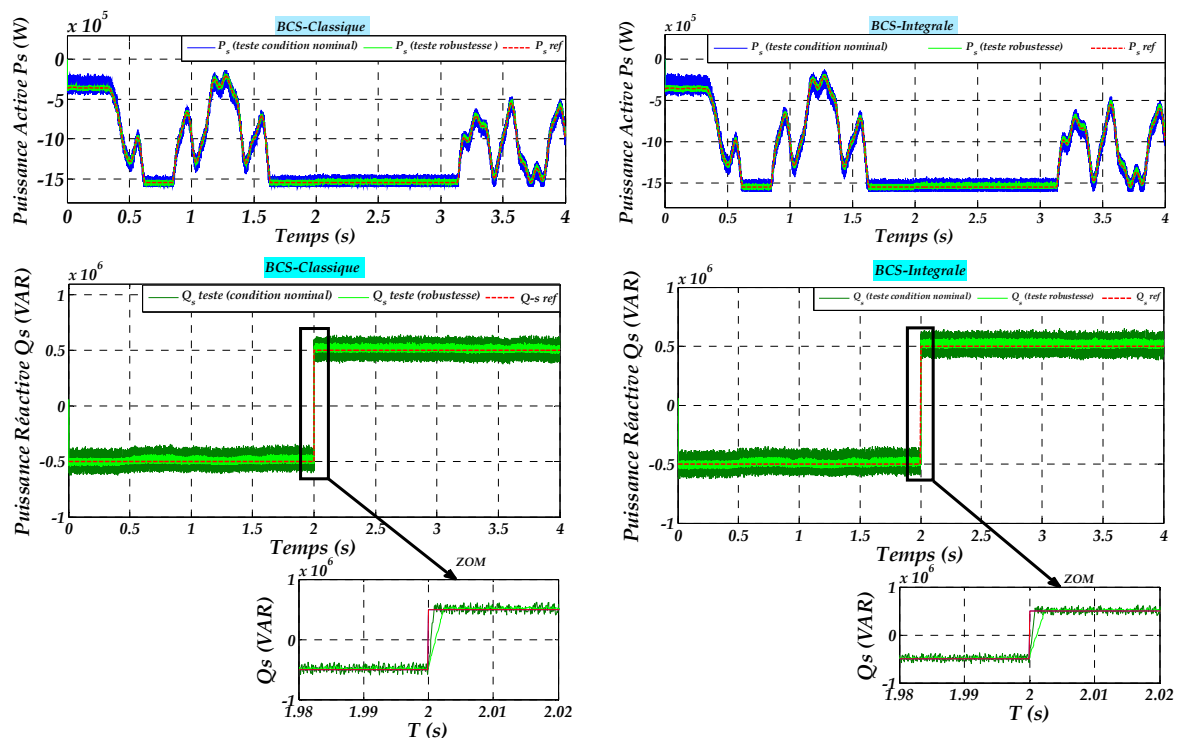


Figure 3.4. Commande en puissances de la MADA par la méthode BCS-classique et BCS-Intégrale (test robuste)

Ces résultats de simulation démontrent l'efficacité et la robustesse des commandes Backstepping Classique et Intégrale dans des conditions contraintes et des variations de conditions de fonctionnement, Le découplage entre la puissance active et réactive est toujours maintenu ce qui confirme la robustesse de la commande proposée. Nous pouvons résumer les résultats de simulation dans le tableau suivant :

Tableau 3.2. La comparaison entre la commande BCS-Classique et BCS-Intégrale.

	<i>BCS-Classique</i>	<i>BCS-Intégral</i>
Temps de réponse	$1.8 \pm 5(ms)$	$0.7 \pm 5(ms)$
Erreur statique	6.65 %	5.99 %
Dépècement	0	0
Robustesse	++++	+++++
THD	6.90%	5.98%
Suivi référence	Oui	Oui
Simplicité	Complicé	Complicé

### 3.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la conception des deux approches de commande non linéaire : BCS- Classique et BCS- Intégrale. Chacune de ces approches présente des avantages et des limitations, et le choix doit être fait en fonction des exigences spécifiques du système à contrôler. Les simulations réalisées sur le logiciel MATLAB/SIMULINCK ont permis une meilleure compréhension des performances et des caractéristiques de ces deux contrôleurs dans des conditions contraintes et des variations des conditions de fonctionnement.

---

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Le travail traité dans ce mémoire consiste en la modélisation et le contrôle d'un aérogénérateur basé sur la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice. Le but est d'établir les stratégies de contrôle nécessaires au bon fonctionnement de l'éolienne.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à l'établissement des généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne en donnant un aperçu des différents types d'éoliennes existantes et de leurs différentes configurations, à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Ce chapitre aborde également les différents types de conversion électromécanique, en se concentrant sur les machines asynchrones à double alimentation.

Dans le deuxième chapitre nous avons abordé la modélisation du système de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. En premier lieu nous avons modélisé la partie mécanique (la turbine, le multiplicateur, et l'arbre mécanique) et nous avons présenté la stratégie MPPT (Techniques d'extraction de maximum de la puissance), puis en second lieu nous avons modéliser la partie électrique à savoir la MADA et les deux convertisseurs, un onduleur de tension à MLI côté rotor (CCM) et un redresseur à MLI de courant côté réseau (CCR) reliés entre eux par un bus continu.

Dans le troisième chapitre, on a proposé d'étudier la commande d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique du Backstepping. Nous avons d'abord proposé un aspect théorique de cette commande, et exposé les étapes permettant d'établir la commande qui assurent la stabilité du système non linéaire et des résultats plus performants et un fonctionnement robuste. Nous l'avons ensuite appliquée à la machine asynchrone à double alimentation, elle permet de remplacer les régulateurs PI, les résultats de simulation montrant bien que, cette commande offre de très bonnes performances, minimise l'erreur statique ainsi que les ondulations et un bon suivi des références de la machine soumis à différents régimes de fonctionnement.

Cette stratégie de commande présente des inconvénients tel que le choix de gain, l'algorithme du calcul et la limitation des valeurs de la commande.

En termes de perspectives, nous souhaitons poursuivre ce travail en :

- Appliquant des techniques d'optimisation pour calculer les paramètres de commande.



- Utilisant des techniques de commande hybride telles que le Backstepping-logique flou ou le Backstepping-mode glissant.
- Explorant d'autres techniques de commande non linéaire telles que le Backstepping prédictif, le MRAC (Model Reference adaptative Control), le MRAS (Model Référence Adaptive Systeme), etc.

Ces approches visent à améliorer les performances, la stabilité et l'efficacité des systèmes de commande.

## Annexe A- Paramètres du système éolien

### ► A.1 - Paramètres de la turbine éolienne [1] :

Tableau A.1 : Paramètres de la turbine éolienne

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Rayon du rotor $R$	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse $G$	90
Coefficient de frottement visqueux $f_v$	0.0024 N.m.S <sup>-1</sup>
Vitesse du vent de démarrage $v_d$	4m/s
Vitesse du vent d'arrêt $v_m$	25m/s
Moment d'inertie total $J$	1000kg.m <sup>2</sup>

### A.2 - Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation [1]

Tableau A.2 : paramètres de la MADA de 1.5 MW

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Puissance nominale $P_n$	1.5MW
Courant nominal $I_n$	1900A
Tension nominale statorique $V_s$	398/690V
Fréquence nominale rotorique $f$	50Hz
Tension rotorique $V_r$	225/389V
Résistance statorique $R_s$	0.012Ω
Résistance rotorique $R_r$	0.021Ω
Inductance statorique $L_s$	0.0137H
Inductance rotorique $L_r$	0.0136H
Inductance mutuelle $L_m$	0.0135H
Tension dus continu $U_{DC}$	1200V
Inertie totale $J$	1000Kg.m <sup>2</sup>
Nombre de paires de pôles $P$	2

## Annexe b- Synthèse du régulateur PI pour le contrôle MPPT

### REGULATEUR PI

Dans notre travail, nous utilisons un régulateur PI pour contrôler la vitesse de rotation. L'objectif est d'éliminer l'erreur statique, réduire le temps de réponse et maintenir la stabilité du système. La vitesse souhaitée est déterminée en fonction de l'équation mécanique. La structure du régulateur de vitesse est illustrée dans la Figure B.1

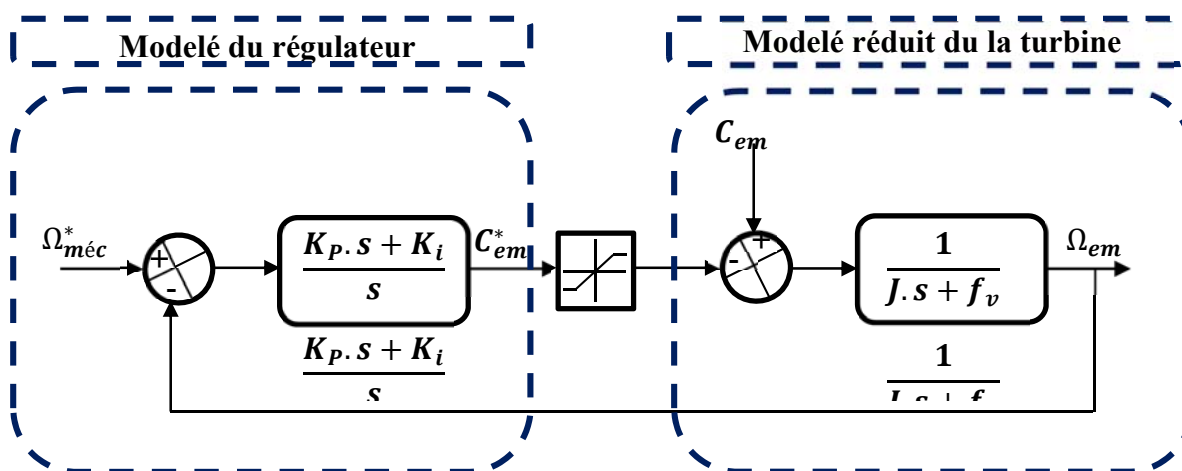


Figure B.1. Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

On peut écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_{em} = H(s) \cdot \Omega_{em}^* + M(s) \cdot C_{em} \quad (b - 1)$$

Où  $H(s)$  est fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$H(s) = \frac{K_{P\Omega} \cdot s + K_{i\Omega}}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{P\Omega}) \cdot s + K_{i\Omega}} \quad (b - 2)$$

Et  $M(s)$  est la fonction de la perturbation :

$$M(s) = \frac{s}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{P\Omega}) \cdot s + K_{i\Omega}} \quad (b - 3)$$

Afin de réduire l'effet des interférences ( $C_{em}$ ), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le

---

gain ( $KK_{P\Omega}$ ) Un autre gain est choisi de telle sorte qu'il ait une fonction de transfert du second ordre, avec des coefficients d'ondulation et d'amortissement naturels, déterminés comme suit

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \\ \xi = \frac{f_V + K_P}{J \cdot 2\omega_n} \end{cases} \quad (b - 4)$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_i = \omega_n^2 \cdot J \\ K_p = 2\xi \cdot J \omega_n - f_V \end{cases} \quad (b - 5)$$

Dans notre étude nous avons choisi :  $\xi=1$  et  $\omega_n=100$

---

## Références Bibliographiques

- [1] M. Lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, Déc 2008.
- [2] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Ecole National Supérieur d'Arts et Métiers, Centre Bordeaux, France, 18 Déc 2003.
- [3] B. Madani, « Commande par Backstepping d'une MAS Triphasée », Mémoire De Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA ,2012.
- [4] T. Belhouli, « Etude et contrôle des aérogénérateurs à base des machines asynchrones double alimentées connectées à un réseau électrique autonome », Mémoire de Magister, Université de Bejaia ,2013.
- [5] M. Touati, « Étude d'une génératrice éolienne connectée au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université de Batna, Janvier 2015.
- [6] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2010.
- [7] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles et insulaires », Thèse de Doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Déc 2005.
- [8] B.A. ASMA, Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Universite Hadj Lakhdar Batna,2016.
- [9] B. Meriem, Contributione à la Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran,2013,2014
- [10] T. Ghennam, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», Thèse de Doctorat, l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger,2011
- [11] R. Aubrée, « Stratégies de commande sans capteurs et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Angers, Novembre 2014.
- [12] H. Nfaoui, « Caractéristiques du gisement éolien marocain et optimisation d'un système aérogénérateur/groupe électrogène pour l'électrification des villages isolés », Thèse de Doctorat, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc, Déc 2004.
- [13] I. Attoui, « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne » , Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2015
- [14] H. Bennani, « Machine asynchrone à double alimentation, les lois de commande en régime permanent », Mémoire d'ingénieur, Université de Laval, Québec, 2011.
- [15] H.M. Amine, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électrique, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif,2012
- [16] Y. Bekakra, Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation MADA par différentes techniques avancées, Mémoire de Magister Centre Universitaire d'El-Oued,2010
- [17] Abderrahim, (2015). Amélioration de la qualité d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecté au réseau électrique (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [18] Y. DJERRIRI, \_ Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle.; Thèse de Doctorante Electrotechnique, Université Djilali Liabés, Sidi Bel-Abbes, Algérie, octobre 2015.

- 
- [19] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [20] L. Khelfat, L. Maataoui, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire De Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2017.
- [21] Z. Tir, « Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade», mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [22] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne- Machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [23] A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [24] [http://electronique1.blogspot.com/2011/02/machine-asynchrone-doublealimentation\\_6420.html](http://electronique1.blogspot.com/2011/02/machine-asynchrone-doublealimentation_6420.html), Consulté Avril 2023.
- [25] S.LOUAREM : Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique connecté à un système éolien utilisant les systèmes FACTS, thèse doctorat de UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1
- [26] ARAMA Mohamed Amin. Dr. ARAMA Fatima Zohra : Commande non linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation, thèse de doctorant de l'Université Ahmed Draïa Adrar2020/2021
- [27] TAMAARAT Azzouz : Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation/Mémoire de magister UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER - BISKRA - 15/03/2009
- [28] A. Kaddour : Mme BELAID Sofia Contribution à l'étude de systèmes autonomes à base de machines asynchrones à rotor bobiné, Université A. MIRA-BEJAIA/ Année Universitaire : 2020/2021
- [29] A. BOYETTE: Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Université Henri Poincaré, Nancy 1, décembre 2006
- [30] G. Buche : Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/Simulink, thèse de doctorant, Centre régional associé de Grenoble, 2001.
- [31] Y. Elbia: Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté, thèse de doctorant, Université Hadj Lakhdar, BATNA, 2009. Ft.y
- [32] B. Cherif : Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation. Mémoire Magister. Université Mohamed Khider – Biskra. 19/11/2012
- [33] A. Dendouga : contrôle des puissances active et réactive de la machine a doublé alimentation (MADA), thèse Université de Batna,10/02/2010
- [34] ] Z. Dekali, « Contribution à la commande d'un simulateur HIL d'éolienne et d'une génératrice asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université Aboubakr-Belkaïd Tlemcen (2021)
- [35] O. brahimi et M. W mechernene, « Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une chaîne éolienne », Mémoire master Université AboubekrBelkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE le 06 /07/2017
- [36] C. Ahmed, A. Bekri, H. Gouabi, and H. Ali, "Non-Linear Back-Stepping Control Optimized by Genetic Algorithm for the Control of a Wind Turbine Generator (DFIG)", International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X Volume-7, Issue-6, Jun.-2019, <http://ijieec.org.in>
-

- 
- [37] E. Chetouani, Y. Errami, A. Obbadi, Smail Sahnoun, "Design of Optimal Backstepping Control for a Wind Power Plant System Using the Adaptive Weighted Particle Swarm Optimization ", International Journal of Intelligent Engineering and Systems. Vol.14, No.6. 2021, DOI: 10.22266/ijies2021.1231.12
- [38] B.Salaheddine et S.Mohamed « Commande par Backstepping d'un Moteur à Commutation Electronique », mémoire de fin d'étude,
- [39] Mr Badraoui Mourad, « Etude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone », République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique.
- [40] A.R. Benaskeur, « Aspects de l'application du backstepping adaptatif a la commande décentralisée des systèmes non linéaires », Thèse à l'Université Laval. Février 2000
- [41] Z.Bellahcene et M.Bouhamida et M. Benghanem et A. LaidanI, « La Commande Intégrale Backstepping Appliquée à un Hélicoptère à quatre hélices», Article. Laboratoire de Développement des Entraînement Electrique Faculté de Génie Electrique, Département D'Automatique USTO, BP 1505 El Mnaouar (31000, Oran), Algérie Novembre 2012
- [42] M A.W Bouabdelli et L. Ould Mokhtar, « Application de l'onduleur à trois niveaux dans un système éolien à base d'une MADA avec la commande de backstepping», mémoire de fin d'études. Université ibn-khaldoun de tiaret.2017
- [43] ] M. LOUCIF, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –, Tlemcen, 2016
- [44] F. Eshbair, « Modélisation et commande D'un système multi-moteur par la technique de commande backstepping », Université du Québec. Aout 2005
- [45] ] A.Nouari et B.Akkouche , «Commande d'une MSAP dédié à une Éolienne par la méthode de backstepping», Université Akli Mohand Oulhadj Bouira .le 30/09/2018
- [46] E. Chetouani, Y. Errami, A. Obbadi, S. Sahnoun, and B. Wdawa, "Nonlinear Backstepping with Integral Action for Wind Plant Based on Doubly Fed Induction Generator Connected to the Non-Ideal Grid ", Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy,2022. <https://doi.org/10.1007/s40866-022-00130-5>
- [47] N. Elmouhi, A. Essadki, and H. Elaimani, "Robust control of wind turbine based on doubly-fed induction generator optimized by genetic algorithm ", International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) Vol. 13, No. 2, June 2022, pp. 674~688.
-

## Résumé :

### *Commande non linéaire d'un aérogénérateur à base de la machine asynchrone asynchrone à double alimentation*

La demande énergétique mondiale en constante augmentation, l'instabilité, l'incertitude du prix des énergies fossiles et la conscience environnementale renforcée durant ces dernières années ont renouvelé l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie éolienne détient une situation privilégiée grâce à son progrès technologique.

Dans cette mémoire, nous avons d'abord établi la modélisation mathématique du système d'énergie éolienne afin de faciliter l'application du command non linéaire par la technique du Backstepping pour découpler la puissance active et réactive de la GADA avec une grande robustesse. Nous avons amélioré la technique du Backstepping, qui repose sur la fonction de Lyapunov, en ajoutant un gain d'intégration pour réduire l'erreur relative et garantir la stabilité globale du système. Cela a été vérifié par simulation numérique à l'aide du logiciel Matlab / Simulink.

**Mots-clés :** Éolienne, DFIG, Commande par Backstepping, Fonction de Lyapunov, Robustesse.

## Abstract :

### *Nonlinear control of a doubly fed asynchronous generator-based wind turbine.*

The global demand for energy is continuously increasing, and the instability and uncertainty of fossil fuel prices, along with the growing environmental awareness in recent years, have renewed interest in the development of renewable energies. Wind energy holds a privileged position thanks to technological advancements.

In this work, we first established the mathematical formulation of the wind energy system to facilitate the application of non-linear control using the backstepping technique to separate active and reactive powers. We improved the Backstepping technique based on the Lyapunov function by adding an integration gain to reduce relative error and ensure overall system stability. This was verified through numerical simulation using the Matlab/Simulink software.

**Keywords:** Wind turbine, DFIG, Backstepping Control, Lyapunov function, Robustness.

ملخص :

### *التحكم غير الخطي في مولد الرياح المعتمد على آلة التيار الغير متزامنة ذات التغذية المزدوجة*

الطلب العالمي على الطاقة يتزايد باستمرار، وعدم الاستقرار وعدم اليقين في أسعار الوقود الأحفوري وزيادة الوعي البيئي في السنوات الأخيرة قد جدد مصلحة تطوير الطاقات المتجددة، وطاقة الرياح لديها موقع متميز بفضل التقدم التكنولوجي

في هذه المذكرة، قمنا أولاً بإيجاد الصيغة الرياضية لنظام طاقة الرياح لتسهيل تطبيق التحكم غير الخطي بواسطة تقنية باكستيبينغ لفصل القوة النشطة والتفاعلية. تم تحسين تقنية الباكستيبينغ التي تعتمد مبدأ عملها على دالة ليابونوف بإضافة عنصر التكامل لتقليل الخطأ النسبي وضمان الاستقرار الكلي للنظام، وتم التحقق من ذلك بواسطة المحاكاة العددية على Matlab/Simulink برنامج