

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**  
**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Domaine : Sciences et Technologie*

*Filière : Automatique*

*Spécialité : Automatique et informatique industrielle*

## **THÈME**

*Commande non linéaire d'une turbine éolienne  
connectée à une MSAP*

*Préparé par Melle : MOUAZ Khadidja*  
*Melle : HADJE AHMED Halima*

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Devant les Jury : Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>MrMESLEM Youcef</i>		<i>Président</i>
<i>MrKOUADRIA Selman</i>		<i>Examineur</i>
<i>MrBELABBASBelkacem</i>	<i>Promotion 2018</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mme ZINE Souhila</i>		<i>Encadreur</i>

# **REMERCIEMENT**

*Avant tout nous remercions Allah, maître de l'univers sans lui, nous n'aurons jamais pu congestionner ce travail, et grand salut sur notre prophète Mohamed que le salut soit sur lui.*

*Nous remercions notre promoteur Madame ZINE .SOUHILA. enseignante au sien du département de génie électrique de université de IBN KHALDOUN de Tiaret d'avoir accepté de nous encadrer afin de réaliser notre mémoire de fin d'étude, pour ces précieux conseil, pour son sens de responsabilité et du bon comportement envers son autrui.*

*Nous tenons à remercier à Mr.BOUZID,et Mr.KOUADRIA et Mr.ALLAOUIqui nous aident dans ce travail.*

*Nous tenant à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail, et tout l'ensemble des professeurs du département de génie électrique pour leur soutien et le aide précieuse*

*Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien moral et matériel.*

*Qu'il soit de même pour tous nos ami(e)s dont le soutien indéfectible et leur fidélité en amitié,*

*Merci.*

*Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé, de près ou de loin durant notre travail.*

# *Dédicaces*

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A mes Père et à mes Mère*

*A mes Sœurs, mes Frères et mes Proches,*

*A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir,*

*Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs.*

*H. Halima*

*M. Khadidja*

# SOMMAIRE

---

---

## Liste de figure

## Notation

## Introduction

### Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction	4
I.2 Les principales sources d'énergies renouvelables	4
I.2.1 Génération de la chaleur	4
I.2.1.1. Thermo solaire	5
I.2.1.2. Géothermie	5
I.2.1.3. Biomasse	5
I.2.2 Génération d'électricité	5
I.2.2.1. Photovoltaïque	5
I.2.2.2. Hydraulique	6
I.2.2.3. Energie de mer	6
I.3 Principes et éléments constitutifs de l'éolienne	6
I.3.1 Définition de l'énergie éolienne	6
I.3.2 Descriptif d'une éolienne	6
I.3.3 Principaux composants d'une éolienne	7
I.3.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne	8
I.4 Les différents types d'éoliennes	9

# SOMMAIRE

---

---

I.4.1 Eoliennes à axe vertical	9
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	10
I.5.1 Les avantage	10
I.5.2 Les inconvénients	11
I.6 Conclusion	11
<b>CHAPITRE II : Modélisation et commande de la turbine à vitesse variable</b>	
II.1 Introduction	13
II.1.2 Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne	13
II.1.2.1. Propriété du vent	13
II.1.2.2. Modèle de la turbine	14
II.1.2.3. Loi de BETZ	14
II.1.2.4. Modèle des pales	16
II.1.2.5. Le coefficient de puissance $C_p$	16
II.1.2.6. Modèle du multiplicateur de vitesse	17
II.1.2.7. Modèle de l'arbre	18
II.1.2.8. Résultats de simulation en boucle ouverte	18
II.2. Stratégie De Maximisation De Puissance MPPT	21
II.2.1. Commande de la vitesse de rotation de la machine par (MPPT)	22
II.2.2. Principe de la MPPT	22
II.3. Conception de correcteur de vitesse par PI classique	22

# SOMMAIRE

---

---

II.4. Résulta de simulation de MPPT	25
II. 5. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent	27
II.5.1Généralité Sur la Machines Synchrones à Aimants Permanents	27
II.5.1.1. Description Des Machines Synchrones à Aimants Permanent	27
II.5.1.2. Stator de la machin	27
II.5.1.3. Rotor de la machine	27
II.6. Avantages de la MSAP	27
II.7. Inconvénients de la MSAP	28
II.8. Domaines d’application	28
I.9. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanen	28
II.9.1. Équations électrique	30
II.9.2.Equations Flux statorique:	31
II.9.3 Les équations mécaniques	32
II.10.Transformation de Park	33
II.10.1.1.Equations des Tentions	34
II.10.1.2. Equations des Flux	34
II.11.Modélisation sous la forme d’états de la machine synchrone à aimants permanents	36
II.11.1. Représentation d’état du modèle de la machine synchrone à Permanents dans le repère d-q	36
II.12. Utilisation de la transformation de Laplace	37
II.13. Commande vectorielle de la Génératrice Synchrone à aimants permanent	38

# SOMMAIRE

---

---

II.13.1 Conception de correcteur de courants par PI classique	40
II.14.1.1. Synthèse du régulateur de courant Isd	40
II.14.1.2. Synthèse du régulateur de courant Isq	42
II.15. Résultats de simulation de la commande vectorielle	42
II.16. CONCLUSION	42
<b>CHAPITRE III: Commande par mode glissant</b>	
III.1 .1 Introduction	46
III.1.2 Définition des systèmes à structure variable	46
III.1.3 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement	47
III.1.4 Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente	47
III.1.5 Principe de la commande à régime glissant	47
III.1.6 Les systèmes à structure variable dans le mode glissant	48
III.1.7 Conception des régulateurs à structure variables	48
III.1.7.1 Choix des surfaces de glissement	48
III.1.7.2 Condition d'existence et de convergence :	49
III.1.7.3 Détermination de la loi de commande	49
III.2 Application de la commande par mode de glissement à la MPPT	50
III.2.1. Conception du correcteur de vitesse par mode glissant	50
III.3 Simulation et résultats	51
III.4. Simulation de la cascade (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents)	53

# SOMMAIRE

---

---

III.5 Conclusion 55

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

## Liste des figures

---

---

**Figure I. 1-** Eléments constituant une éolienne.

**Figure I.2 :** Principales composants de l'éolienne à axe horizontal.

**Figure I.3 :** Différentes parties d'une éolienne.

**Figure I.4 :** Eoliennes à axe vertical : rotor de Darrieus (gauche) et rotor de Savonius (droite)

**Figure I. 5 :** Éolienne à axe horizontale.

**Figure II. 1 :** Turbine éolienne

**Figure II.2 :** Répartition des vitesses dans le tube de courant.

**Figure II.3 :** Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$ .

**Figure II. 4:** Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

**Figure II. 5:** Allure de la vitesse du vent

**Figure II. 6:** Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.

**Figure II.7 :** Allure de la vitesse spécifique en boucle ouverte.

**Figure II.8 :** Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.

**Figure II. 9:** Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

**Figure II.10 :** Stratégies de commande de la turbine.

**Figure II.11 :** Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI.

**Figure II.12 :** Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI.

**Figure II.13:** Représentation du Point de fonctionnement optimal de la turbine

**Figure II.14:** Allure du coefficient de puissance avec un régulateur PI

**Figure II.15:** Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur PI.

**Figure II.16** Allure de la vitesse de rotation avec un régulateur PI.

**Figure II.17 :** Structure d'un moteur synchrone à aimants permanents

**Figure II.18** Schéma de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique.

**Figure II.19 :** Les différents couples qui agissent sur le rotor.

**Figure II.20 :** Schéma équivalent de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère.

## Liste des figures

---

---

**Figure II. 21** : Modèle de la MSAP .

**Figure II.22** : Schéma Simulink du modèle de la MSAP dans le repère de Park.

**Figure II.23**: Principe d'orientation du flux.

**Figure II.24** : Schéma de la boucle de régulation du courant.

**Figure II.25**: Allure du couple électromagnétique avec un régulateur PI.

**Figure II.26** : Allure des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  avec un régulateur PI

**Figure II.27** : Allures : tensions et courants de la GSAP avec un régulation PI.

**Figure III.1**: Aspect général d'une commande à structures variables.

**Figure III.1** :Schéma de la structure avec ajout de la commande équivalente

**Figure III.2**: Schéma bloc représentant l'application de la commande SMC à la commande de vitesse de la turbine.

**Figure III.3** : Allure du coefficient de puissance avec un régulateur SMC.

**Figure III.4** : Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur SMC.

**Figure III.5** : Allure de la vitesse de rotation avec le régulateur SMC.

**Figure.III.6** vitesse de rotation en cascade (turbine-GSAP).

**Figure III.8** courant  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  en cascade(turbine-GSAP).

**Figure III.9**vitesse spécifique

## Notations

---

---

$M_0$	Masse d'air traversant l'hélice par seconde ;
$P$	Densité de l'air ;
$s$	Surface balayée par les pales de l'éolienne ;
$V_1$	Vitesse du vent en amont ;
$V_2$	Vitesse du vent en aval ;
$P_m$	La puissance extraite ;
$C_p$	Coefficient de puissance ;
$\Lambda$	vitesse spécifique;
$\beta$	Pitch angle;
$R_t$	Le rayon des pales de la turbine ;
$\Omega_t$	La vitesse de la turbine ;
$C_g$	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;
$C_{aer}$	Couple aérodynamique ;
$G$	Gain du multiplicateur ;
$\Omega$	turbine Vitesse de rotation du générateur (avant le multiplicateur) ;
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur) ;
$J$	Moment d'inertie total sur l'arbre ;
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine ;
$J_g$	Moment d'inertie de la génératrice;
$C_{mec}$	Couple mécanique total ;
$C_{em}$	Couple électromagnétique du générateur ;
$C_g$	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;
$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux;
$V_{as}$	Tension statoriques de l'axe a.
$V_{bs}$	Tension statoriques de l'axe b.
$V_{cs}$	Tension statoriques de l'axe c.
$d$	l'axe directe dans le repère de Park.
$q$	l'axe quadratique dans le repère de Park.
$V_{dq}$	Tension dans le repère de Park.
$[V_{dq}]$	Vecteur de tension statorique.
$\theta$	L'angle électrique.
$\theta_m$	L'angle mécanique.

## Notations

---

---

$[P(\theta)]$	Matrice de passage dans le repère de Park.
$L_s$	Inductance propre statorique.
$M_s$	Inductance mutuelle.
$i_a; i_b, i_c$	Les courants de phase statorique.
$i_d; i_q$	Les courants dans le repère de Park.
$L_d; L_q$	Les inductances cycliques dans le repère de Park.
$B$	inductance magnétique.
$\Phi_f$	Flux magnétique.
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{so}$	Flux statorique dans le repère de Park.
$R_s$	Vitesse de rotation électrique.
$P_a$	puissance instantanée.
$\omega_r$	Puissance mécanique.
$P_{mec}$	Puissance mécanique.
$C_{cem}$	Couple électromagnétique
$P$	Nombre de pôles.

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## Introduction Général

---

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres Afghanes sept siècles A.C. pour moudre du grain. [1]

Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul LaCour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité.

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évoluée. Ceci a permis à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles.

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

Dans notre pays, les énergies renouvelables à leur tête l'énergie éolienne accusent un retard considérable par rapport aux autres nations voisines. Les études qui se font dans le domaine de l'éolien se comptent sur les bouts des doigts.

Le but de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne ; pour ce faire notre choix s'est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).[1]

Ce choix est justifié par l'intérêt que la recherche consacre à ce type de structures vu qu'elles sont décrites comme étant les éoliennes de l'avenir. En effet le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques a fait que l'inconvénient majeur de ces structures à savoir le prix des aimants permanents ne soit plus un obstacle pour construire des éoliennes gigantesques à base de génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP), un objectif qui, des années avant, était impossible vu l'énorme prix des aimants permanents.

## Introduction Général

---

Notre travail consiste en premier lieu de dresser la situation de l'éolien dans le monde, de décrire l'état de l'art de la conversion de l'énergie éolienne à savoir le principe de la conversion de l'énergie cinétique du vent.

Le second chapitre est dédié à l'étude et à la modélisation du système regroupant la turbine et la génératrice synchrone à aimants permanents. Après énumération des hypothèses simplificatrices, un modèle simulink est établi dans le but de vérifier le fonctionnement.

La commande de vitesse et de courant de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents fait l'objet du troisième chapitre. On commence par l'application de la MPPT munie d'un PI pour la turbine et la commande vectorielle pour la génératrice synchrone à aimants permanents. Les résultats de simulation sont analysés et comparés dans un but de montrer l'efficacité des commandes appliquées et les améliorations apportées.[2]

Dans le troisième et dernier chapitre on utilise une commande par mode glissant dans la MPPT(Maximum Power Point Tracking). Les résultats de simulation de la cascade turbine, Génératrice synchrone à aimant permanent sont présentés pour mettre en évidence la validité de la stratégie choisie face aux fluctuations du vent.

Ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume tout le travail.

# **CHAPITRE I**

## **Etat de l'art**

## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que, «Le soleil, le vent, la chaleur de terre, les chutes d'eau ou encore les marées ».

Vus les progrès technologique ces dernières années, ces formes, alternatives de production d'électricité deviennent, pour certaines, compétitives par rapport aux combustibles fossiles en voie de raréfaction (pétrole, gaz, et dans une moindre mesure, charbon et uranium)[ 8].

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée [7].

L'éolien contribue de façon significative à la production de l'énergie électrique pour certains pays et ce grâce à sa maturité. L'éolien pourrait jouer un rôle clef dans l'évolution de la production d'électricité prévention du changement climatique vus qu'elles n'engendrent pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité.

Toutefois, ce déploiement de la filière éolienne ne va pas sans entrainer des problèmes techniques lies a l'insertion et a la gestion de l'éolien sur le réseau électrique.

Entre autres, les difficultés imposées par a variabilité de l'éolien compromettent l'équilibre production-consommation, la qualité de l'énergie et la sureté des réseaux électriques. Le chapitre un mettra en relief l'état de l'art des éoliennes en présentant les quelques projets de recherche et de production intégrant l'éolien en Algérie, quelques orientation sur le développement avenir de ce secteur seront présentés[10].

## I.2 Les principales sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables peuvent permettent de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..) [7].

### I.2.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole.

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables:

### **I.2.1.1. Thermo solaire**

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage [ 9 ].

Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [ 7 ].

### **I.2.1.2. Géothermie**

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples [ 12 ].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement [9]:

- la haute (>180°C).
- moyenne (>100°C).
- basse (>30°C).
- très basse énergie (<30°C).

### **I.2.1.3. Biomasse**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois-énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage [9].

## **I.2.2 Génération d'électricité**

Il y a une autre famille d'énergie renouvelable dont leur fonctionnement permet de produire l'énergie électrique directement, on utilisant les panneaux solaires et des éoliennes ou des génératrices hydraulique on obtient ce genre d'énergie renouvelable. Dans ce qui suit on va donner une description brève de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique [ 12 ].

### **I.2.2.1. Photovoltaïque**

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une puissance moyenne de 100 W par m<sup>2</sup> (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire

photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible.[ 7 ].

### **I.2.2.2. Hydraulique**

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment [3]. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable» [1].

### **I.2.2.3. Energie de mer**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [6].

## **I.3 Principes et éléments constitutifs de l'éolienne**

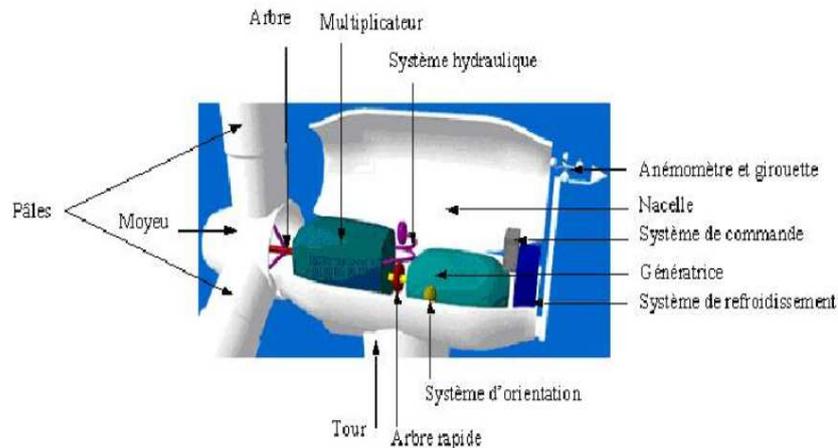
### **I.3.1 Définition de l'énergie éolienne**

C'est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [10].

### **I.3.2 Descriptif d'une éolienne**

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électriques, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de

transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (I.1).



**Figure I. 1-** Eléments constituant une éolienne

Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle.

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/mn. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80 % des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

### I.3.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée de 4 parties :

- La tour : est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [11].

- La nacelle : contient les principaux composants de l'éolienne [12].
- Un rotor : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance

suffisante : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [7].

- Une armoire de commande : comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et tension et d'orientation des pales et de nacelle [11].
- Un multiplicateur de vitesse : l'objective augmente ou diminuant la vitesse [11].

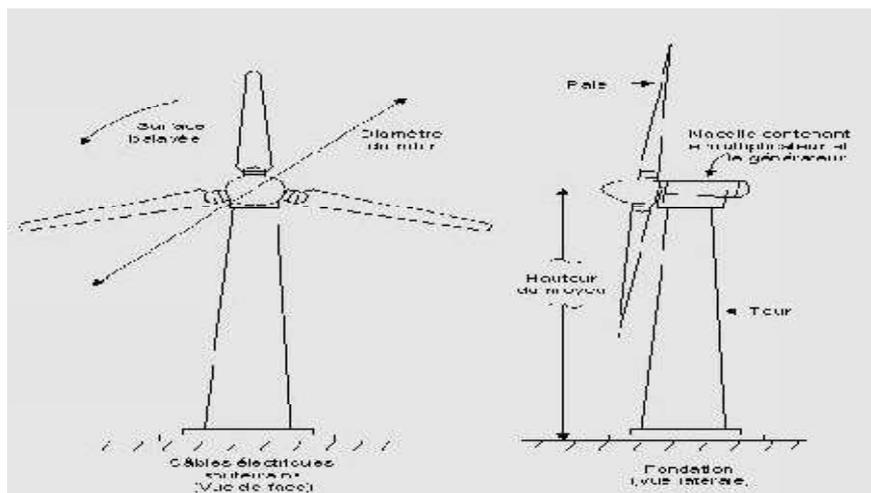


Figure I.2 : Principales composants de l'éolienne à axe horizontal.

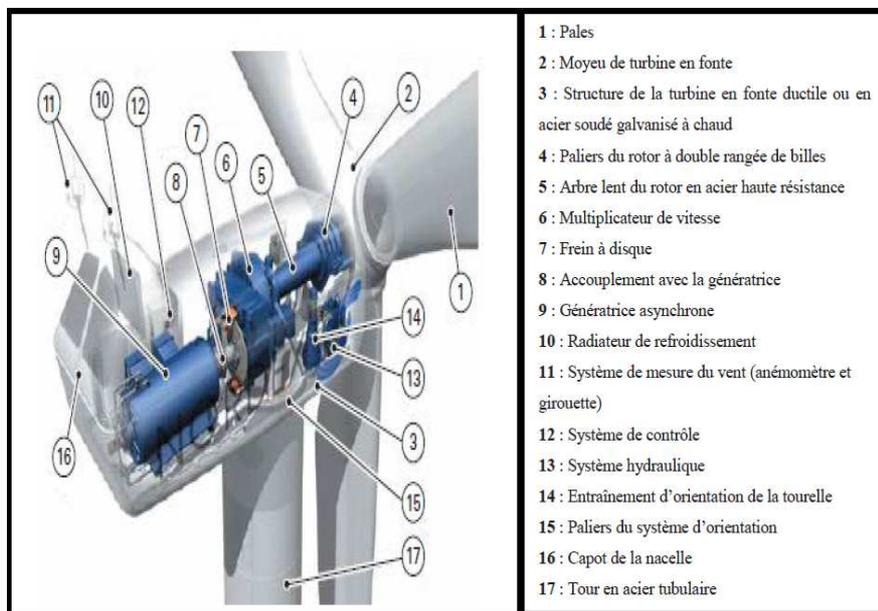


Figure I.3 : Différentes parties d'une éolienne

### I.3.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un

multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au

Point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs. [7].

## **I.4 Les différents types d'éoliennes**

Nous allons décrire 2 type d'éoliennes modernes utilisées, sont [7] :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale.

### **I.4.1 Eoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée

sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts[8 ].



Figure I.4 :Eoliennes à axe vertical : rotor de Darrieus (gauche) et rotor de Savonius (droite)

### I.4.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. [13].



Figure I. 5 : Éolienne à axe horizontale.

## I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

### I.5.1 Les avantage

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable inépuisable, c'est dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier. [14].

• Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, etc. ...[7].

• Une éolienne de 2MW peut produire l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 800 foyers (hors chauffage) et permet d'éviter le rejet annuel de 2000 tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

• Les éoliennes sont souvent installées dans des terrains privés donc les propriétaires reçoivent un paiement pour leur collaboration ce qui augmente leur revenu.[12].

• L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.[7].

• Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable. [14].

• L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple. [7].

• C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables. [14].

### **I.5.2 Les inconvénients**

• L'électricité éolienne dépend d'une source non permanente qu'est le vent.

• Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. [10].

• Sécurité : Il y a peu de chance d'avoir des dégâts ou des morts suite à une cassure ou une fragmentation de l'hélice. Les dangers peuvent aussi être minimisés en éloignant les turbines des zones résidentielles, mais surtout en effectuant des contrôles sérieux lors de la construction des turbines[14].

• La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [15].

## **I.6 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art bref sur l'énergie éolienne, ainsi que les différents concepts de convertisseur d'énergie éolienne en énergie électrique.

Ensuite un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement.

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation et commande de la turbine à vitesse variable**

## II.1 Introduction

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts. A nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est attendu à ce que les systèmes de commande pas simplement gardent la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorer l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante et des techniques de commande différentes pour chaque gamme de vitesse de vent, faible, moyenne ou forte.

La modélisation de la machine synchrone est préméditée aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électriques d'une part et d'autre part l'élaboration des lois de commande. Un modèle basé sur les équations de cette machine est généralement suffisant pour faire la synthèse de la commande .

Dans ce chapitre, nous commençons par la modélisation de la source primaire, le vent, en essayant d'être le plus proche de la réalité, puis les différentes parties mécaniques de l'éolienne seront aussi modélisées sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, deux stratégies de commande différentes seront abordées pour chaque zone de fonctionnement de l'éolienne. Une comparaison des performances de ces deux stratégies nous permettra de choisir la quelle sera utilisée dans le reste de ce document, nous présentons la modélisation du moteur synchrone à aimants permanents, le modèle triphasé et le modèle obtenu à l'aide de la décomposition selon deux axes (transformation de Park).

### II.1.2 Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne

#### II.1.2.1. Propriété du vent

Déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc Le vent est le vecteur Énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, pour la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent [15].

$$V_{\text{vent}} = 6 + 0.2 * \sin(0.1047 * U(1)) + 2 * \sin(0.2665 * U(1)) + \sin(1.2930 * U(1)) + 0.2 * \sin(3.6645 * U(1)) \quad (\text{II.1})$$

### II.1.2.2. Modèle de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  [18 ] (figure II.1).

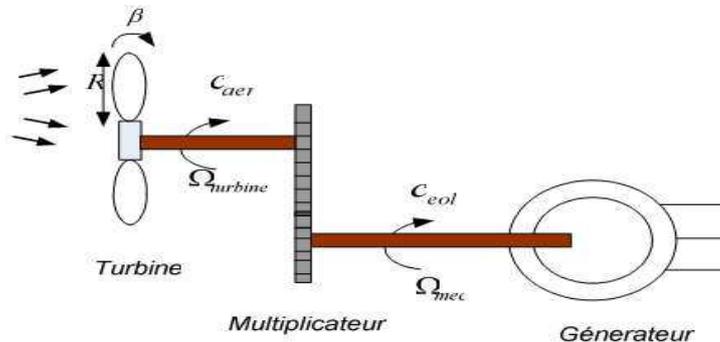


Figure II. 1 : Turbine éolienne

### II.1.2.3. Loi de BETZ [15]

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air mouvement passent par la surface active  $S$  de la voilure

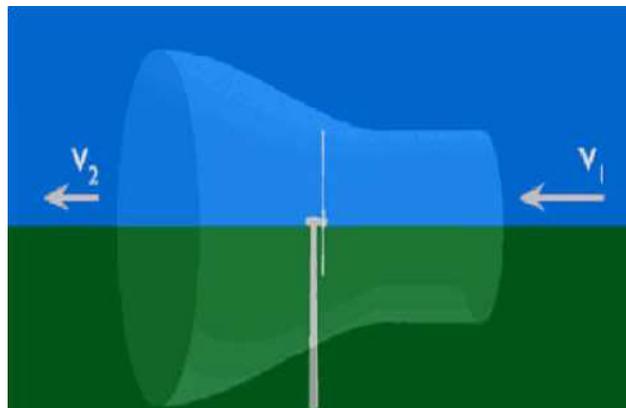


Figure II.2 : Répartition des vitesses dans le tube de courant

On distingue trois facteurs qui déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérer par la turbine : la densité de l'air, la surface balayée par les pâles et la vitesse du vent sont des facteurs climatologiques qui dépendent du milieu. Considérons l'éolien schématisé sur la Figure suivante, sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur, la vitesse  $V_2$  en aval, la vitesse du vent qui traverse l'aérogénérateur est  $V$ . Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II-3 sur lequel on a représenté la vitesse du  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la

vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit :

$$\frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II. 2})$$

La masse d'air en mouvement d densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II. 3})$$

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

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II. 4})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II. 5})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance mécanique totale  $P_{mt}$  correspondante serait alors comme nous avons indiqué dans l'équation (II.6).

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1^3)}{2} \quad (\text{II. 6})$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II. 7})$$

Ce rapport est appelé aussi le coefficient de puissance  $C_p$ , il présente un maximum de  $16/17$  soit 0.59, cette limite théorique est appelé la limite de Betz qui est en fonction du rapport de la vitesse  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  (en degré), tel que :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V_1} \quad (\text{II. 8})$$

Où R est le rayon des pales de l'éolienne Le coefficient Cp est souvent issu de mesure pratique

#### II.1.2.4. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_t = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II. 9})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II. 10})$$

Son Couple aérodynamique  $C_{aero}$  est donné par l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II. 11})$$

#### II.1.2.5. Le coefficient de puissance Cp

Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient  $C_p(\lambda, \beta)$ , puis qu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de pale  $\beta$ ).

Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature, ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

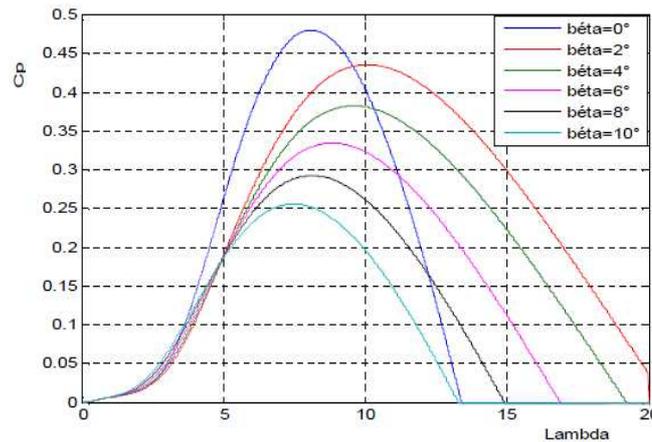
L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( C_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II. 12})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 13})$$

**Tableau II. 1** : valeurs des 6 coefficients C1 à C6 de la turbine.

Coefficient	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Valeur	0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

**Figure II.3** : Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$ 

La Figure II.3 représente la variation des valeurs de  $C_p$  en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$ , et l'angle d'inclinaison des pales  $\beta$ , on remarque que ces valeurs atteignent leurs max si  $\beta$  est proche de 0 et que  $\lambda$  prend une valeur spécifique appelé valeur optimale  $\lambda_{opt}$ .

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda_{optimal}$ , il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent.

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient  $\lambda$  varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée. Le fonctionnement à vitesse variable permet de maximiser la puissance extraite du vent mais cela nécessite la mise en œuvre d'une interface d'électronique de puissance à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statorique, mais cela entraîne un coût supplémentaire.

### II.1.2.6. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur sert à augmenter la vitesse de rotation de l'arbre qui est lié au rotor de la génératrice pour que cette dernière soit suffisamment rapide pour produire de l'électricité, car la vitesse de rotation de la turbine est trop lente.

Avec :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.14)$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.15)$$

### II.1.2.7. Modèle de l'arbre mécanique

Ainsi, l'équation mécanique de ce modèle, ramenée sur l'arbre du générateur, se simplifie sous la forme suivante

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.16)$$

Avec :

$$f = \frac{f_{turbine}}{G^2} + f_g \quad (II.17)$$

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.18)$$

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (II.5) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. L'ensemble des modèles de la turbine (pales, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique) ont été simulés sous un logiciel MATLAB/ Simulink.[16].

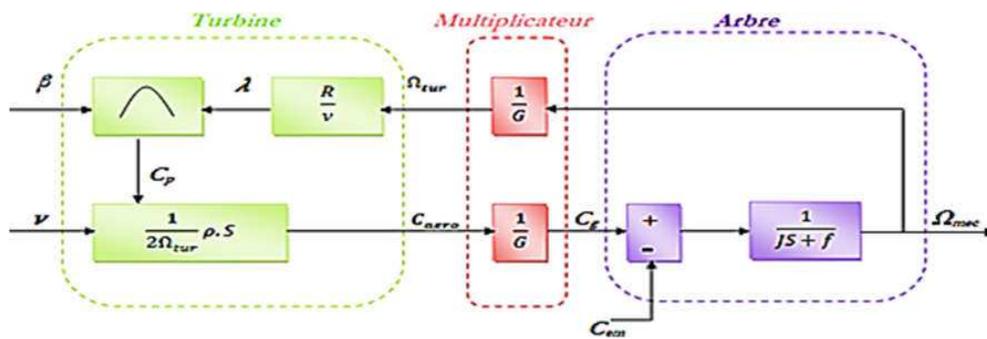


Figure II. 4: Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

### II.1.2.8. Résultats de simulation en boucle ouverte

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10kW dont les paramètres sont définis

dans l'annexe A. Ils sont réalisés en boucle ouverte afin d'observer le comportement de la turbine face aux fluctuations du vent.

La Figure (II.5) présente le profil du vent de valeur moyenne de (6.5 m/s) appliqué à la turbine. Cette valeur a été estimée dans le sud-ouest de l'Algérie.

- Les Figures (II.6 et II.7) montrent l'évolution du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique au cours du temps. On constate qu'ils ne sont pas maintenus à leur valeur nominale ( $C_p \text{ nom} = 0,48$ , et  $\lambda \text{ nom} = 8.1$ ) et qu'ils varient avec la variation du vent.
- D'après la Figure (II.8), la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre. On note aussi un grand écart entre la vitesse mécanique et sa valeur de référence.
- Les performances dynamiques obtenues montrent que la puissance extraite n'est pas optimisée.

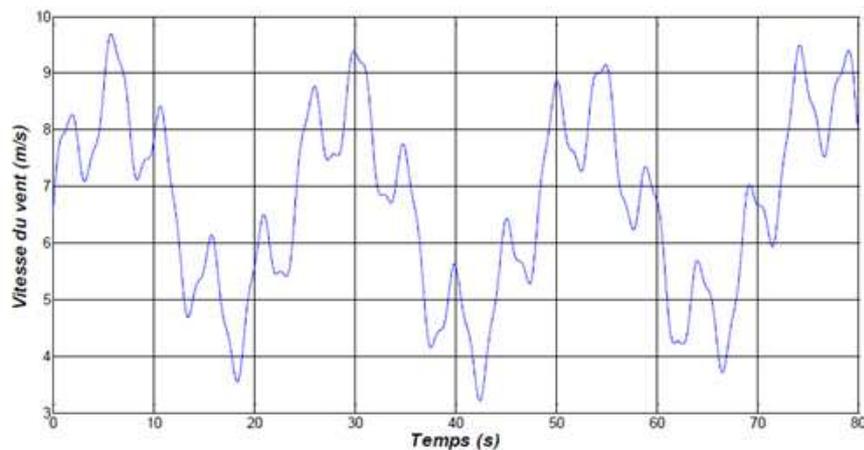


Figure II. 5: Allure de la vitesse du vent.

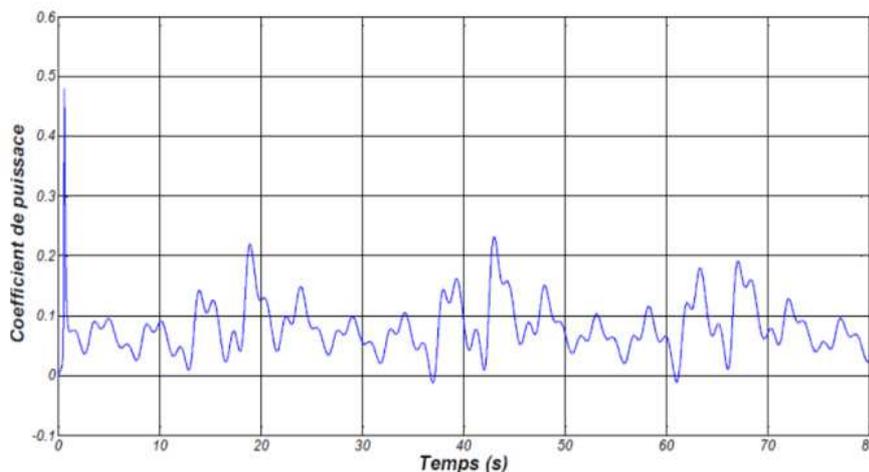


Figure II. 6: Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.

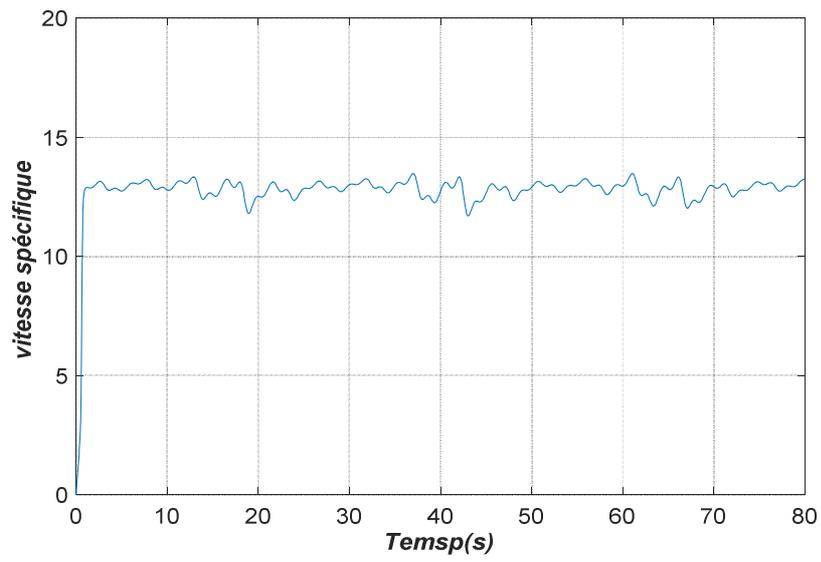


Figure II.7 Allure de la vitesse spécifique en boucle ouverte

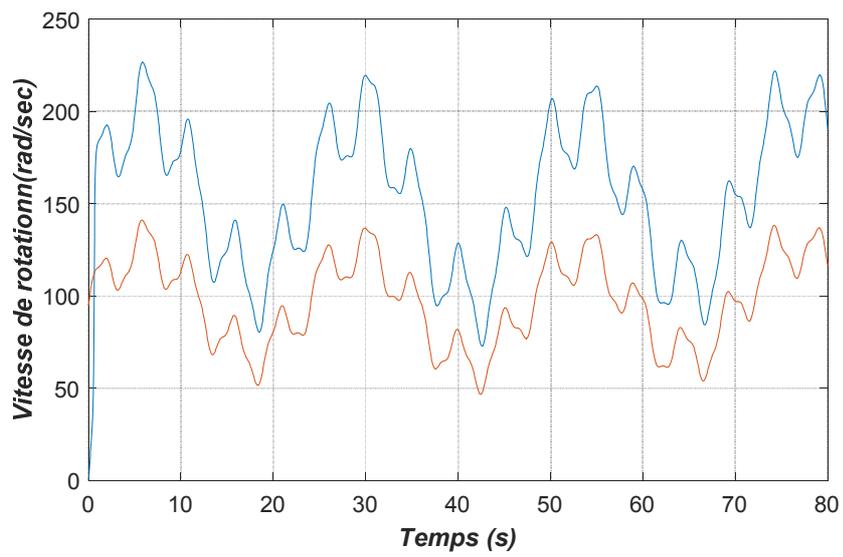


Figure II.8 :Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.

## II.2. Stratégie De Maximisation De Puissance MPPT

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, telle qu'illustré sur la Figure II.9[17]:

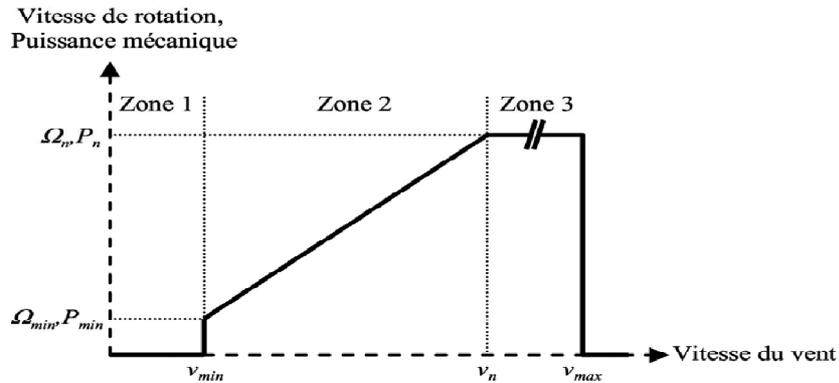


Figure II. 9: Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

- Zone 1 : La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne, à cet effet la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.

- Zone 2 : Le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois le démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ .

- Zone 3 : Le vent atteint des vitesses élevées, supérieures à la vitesse nominale et la vitesse de rotation ainsi que la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, la valeur maximale de  $C_{pmax} = 0.48$  est atteinte pour  $\beta = 0$  et  $\lambda = 8.1$  (figure (II.5)). Cette valeur particulière de  $\lambda$  est définie comme étant la valeur nominale  $\lambda_{nom}$

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [19],[20]:

- Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.
- Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

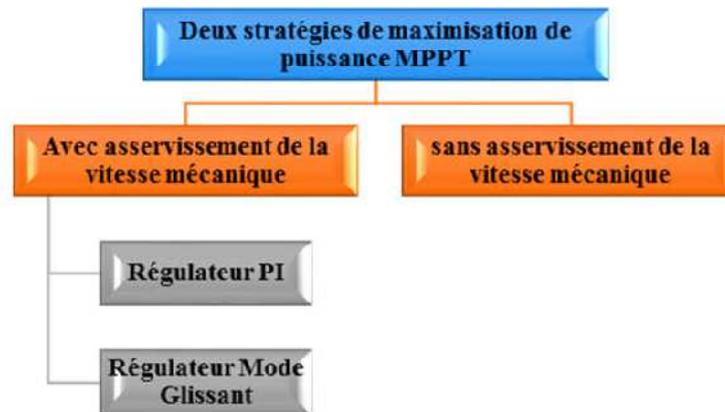


Figure II.10 : Stratégies de commande de la turbine

### II.2.1. Commande de la vitesse de rotation de la machine par (MPPT)

Le but de la méthode MPPT est d'extraire un maximum de puissance en prenant en compte la variation de la vitesse du vent.

Pour contrôler la vitesse de la GSAP, la référence optimale de la vitesse exprimée a été utilisée. Cette référence est obtenue à partir de la technique de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

### II.2.2. Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine, on s'intéresse au sens de variation de la grandeur. Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. On le déduit à partir de l'équation [15].

### II.3. Conception de correcteur de vitesse par PI classique

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour atteindre les objectifs de commande, une boucle de vitesse avec un régulateur proportionnel intégral est utilisée. On supposera pour notre étude que la machine électrique et son variateur sont idéaux, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence

$$C_{em} = C_{emref} \quad (19)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande

peuvent être imaginés. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien, le couple électromagnétique et le couple des frottements visqueux

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (\text{II.20})$$

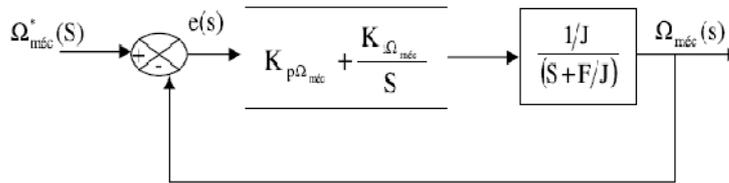
$C_{em}$  : couple produit par la génératrice ;

$C_g$  : couple issu du multiplicateur ;

La structure de commande consiste à régler le couple qui apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence par la relation suivant:

$$C_{emref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{II.21})$$

Le calcul du régulateur est basé sur la dynamique en boucle fermée, en utilisant le principe de la compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est représentée par le schéma bloc suivant



**FigureII.11** : Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{P\Omega_{mec}}}{S} \left( S + \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{P\Omega_{mec}}} \right) \quad (\text{II.22})$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{P\Omega_{mec}}} \quad (\text{II.23})$$

La fonction de transfère en boucle fermée est la suivante :

$$G(s) = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p/J}{K_p/J + s} \tag{II.24}$$

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{ref}} = \frac{1}{\frac{J}{K_{P\Omega_{mec}}} + S + 1} \tag{II.25}$$

La fonction de transfert du système du premier ordre s'écrit comme suite :

$$G(s) = \frac{1}{1+\tau s} \tag{II.26}$$

Avec :

$$\tau = \frac{J}{K_{P\Omega_{mec}}} \tag{II.27}$$

Le régulateur de la vitesse  $\Omega_{mec}$  est :

$$\begin{cases} K_{P\Omega_{mec}} = J \\ K_{i\Omega_{mec}} = \frac{F}{\tau} \end{cases} \tag{II.28}$$

A partir des expressions de la turbine éolienne présentées dans le chapitre précédent, on déduit le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse mécanique.

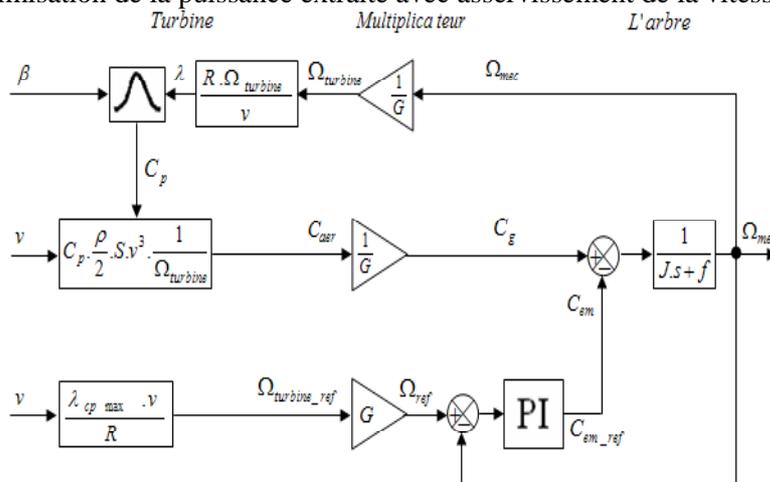


Figure II.12 : Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI.

Avec PI : le régulateur de vitesse.

La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  (pour  $\beta$  égal à  $0^\circ$ ) permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$ . (Figure III.13). Elle est donnée par

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{cpmax} v}{R} \quad (II.29)$$

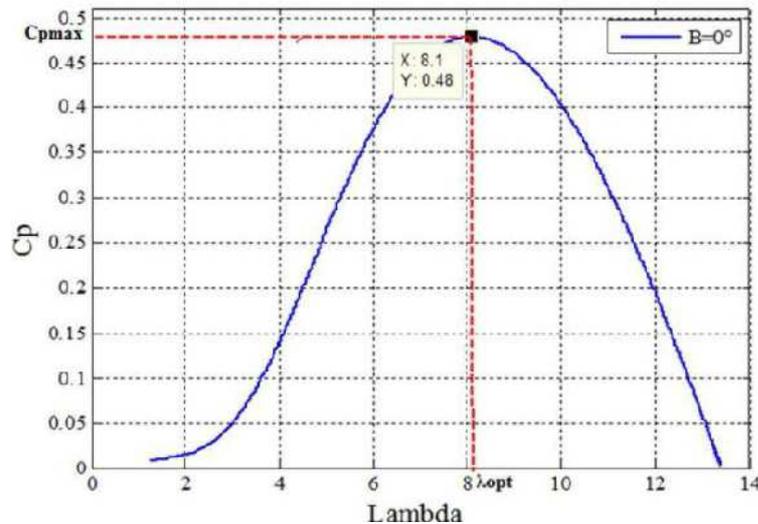


Figure II.13: Représentation du Point de fonctionnement optimal de la turbine

## II.4. Résultats de simulation de MPPT

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10KW dont les paramètres sont définis dans l'annexe A. Ils sont réalisés dans la Zone 2 afin d'exploiter le maximum d'énergie du vent disponible, cette énergie est maximisée en réglant le coefficient de puissance  $C_p$ , qui dépend de la vitesse de la génératrice ou encore du ratio de la vitesse  $\lambda$ .

Les Figures (II.(14, )) montrent que l'application de la commande MPPT permet de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur nominale égale à 0.48

Les Figures (II.(15)) montrent l'évolution de la vitesse spécifique au cours du temps, on constate que cette vitesse oscille légèrement autour de la vitesse spécifique nominale ( $\lambda_{nom}=8.1$ ) avec la variation du vent et garde cette valeur dans le but d'augmenter la production. Cette variation se voit considérablement atténuée avec l'application de régulateurs,

D'après la Figure (II.16) la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre, on constate aussi que la vitesse

mécanique suit parfaitement sa valeur de référence, ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée. Néanmoins un zoom sur ce graphe montre qu'il existe une erreur entre la vitesse de rotation et sa référence, cette différence est exprimée par l'équation  $e_r = \Omega_{ref} - \Omega_{mec}$  où l'erreur tend vers zéro

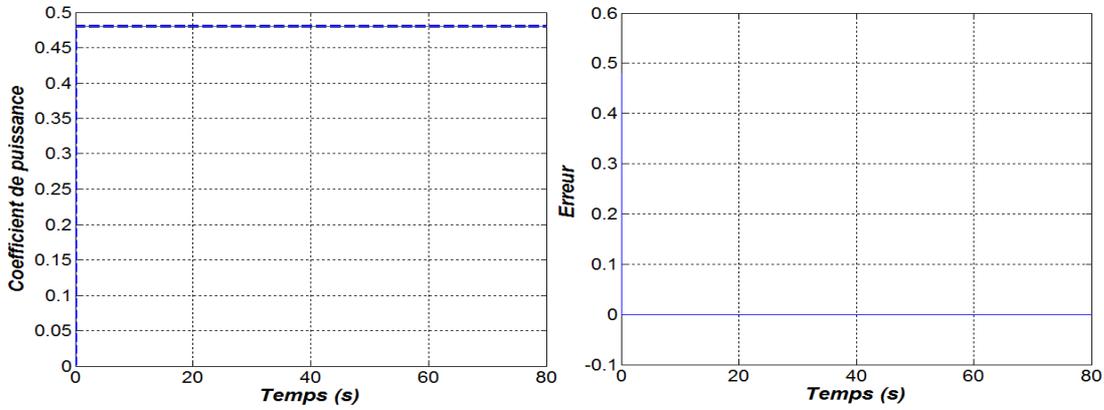


Figure II.14: Allure du coefficient de puissance avec un régulateur PI.

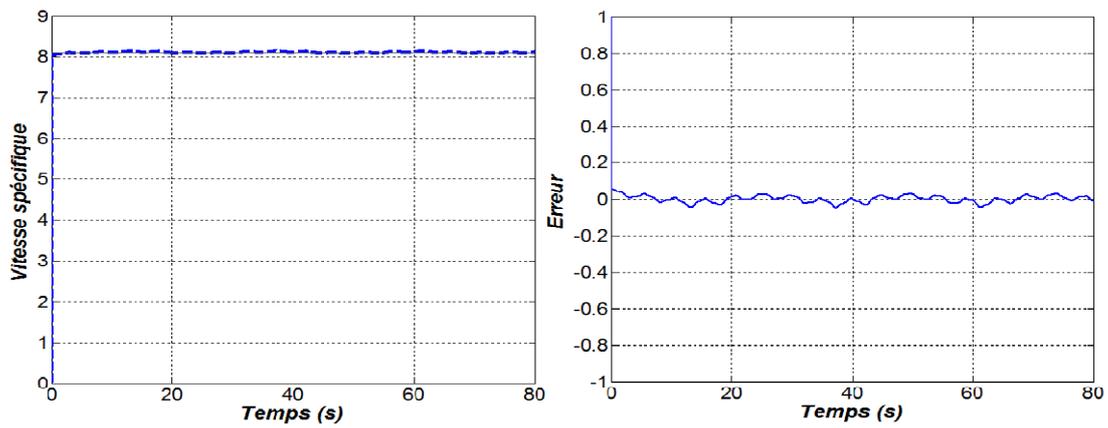


Figure II.15: Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur PI.

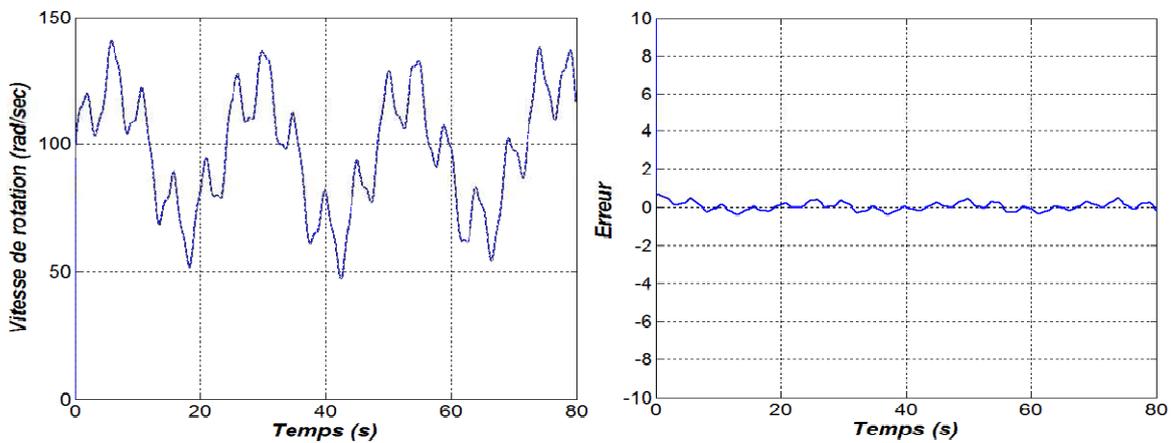


Figure II.16 Allure de la vitesse de rotation avec un régulateur PI.

## **II.5. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent**

### **II.5.1 Généralité Sur la Machines Synchrones à Aimants Permanents**

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont des machines à courant alternatif autopilotées, la caractéristique essentielle de ces machines est que leurs vitesse de rotation est l'image exacte de la fréquence d'alimentation [21].

#### **II.5.1.1. Description Des Machines Synchrones à Aimants Permanent**

La machine synchrone à aimants constitue d'une partie fixe (stator) et une partie mobile (rotor)

#### **II.5.1.2. Stator de la machine**

Le stator est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribue triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales.

Ce bobinage est représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de  $120^\circ$  [23].

#### **II.5.1.3. Rotor de la machine**

Le rotor se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [24].

## **II.6. Avantages de la MSAP**

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines : [25]

- Puissances massiques importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Supporter des surcharges et un bon comportement en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

### II.7. Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.

### II.8. Domaines d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant des centaines des watts (servomoteur) à plusieurs méga watts (système de propulsion des navires) [25].

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme [26] :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- les propulsions des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins,
- les machines-outils,

### I.9. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent [8] : Les hypothèses simplificatrices usuelles adoptées dans la modélisation de la machine, données dans la majorité des références, sont [27] :

- Résistance des enroulements invariables avec la température,
- Effet de peau négligeable,
- Absence de la saturation dans le circuit magnétique,

- Machine alimentée par un système de tensions triphasées sinusoïdales et
- Parfaite symétrie de construction,
- Répartition spatiale sinusoïdale, le long de l'entrefer, des forces magnétomotrices,
- Entrefer d'épaisseur uniforme et effet d'encoche négligeable,
- Pertes ferromagnétiques (par hystérésis et courant de Foucault) négligeables.

Ces hypothèses signifient que les comportements électrique et magnétique sont supposés linéaires.

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse  $(f/p)$  de tours par secondes.

Avec  $f$  : fréquence d'alimentation des bobinages statorique, et  $p$  : le nombre de paires de pôles.

Le rotor composé de  $p$  aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que celle du champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (II.30)$$

## II.10. Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents

La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est donnée sur la figure (II.18).

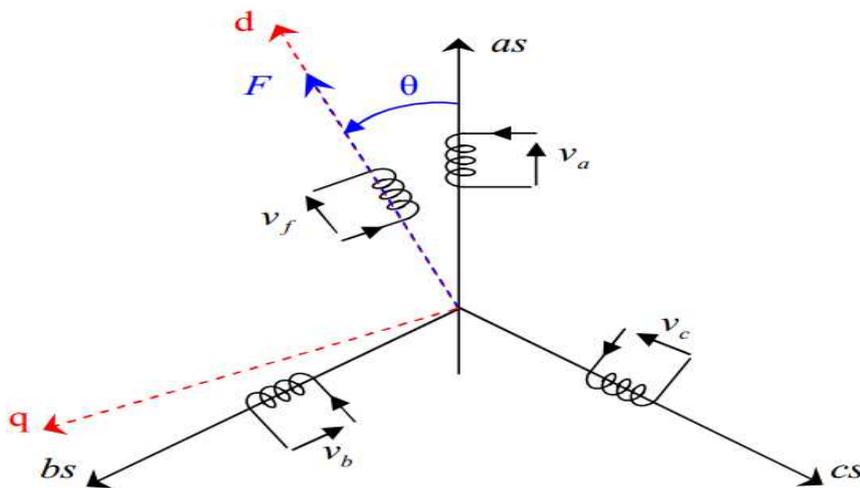


Figure II.18 Schéma de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

- ❖ Equations électriques ;
- ❖ Equations magnétiques ;

❖ Equations mécaniques.

### II.10.1. Équations électrique :

Les équations électriques dans un repère

$$\begin{cases} V_a = R i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (II.31)$$

Avec :

R: Résistance d'un enroulement statorique,

$i_{abc}$ : Les courants des phases statorique a, b, c,

$\varphi_{abc}$  : Les flux totaux à travers les bobines statorique,

$V_{abc}$  : Les tentions des phases statoriques.

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatial sinusoïdale de l'induction, les flux induits par le aimants dans les trois phases statorique a,b,c sont donnés par

$$\begin{cases} \varphi_{fa} = \varphi_{\max} \cdot \cos(\theta) \\ \varphi_{fb} = \varphi_{\max} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_{fc} = \varphi_{\max} \cdot \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.32)$$

Le flux produit dans chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes. Comme exemple, pour la phase `a`, le flux `φ<sub>a</sub>` est la somme des termes:

Du stator:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Avec :

$R_s$ : la résistance des phases statorique

$[V_a \ V_b \ V_c]$  : Vecteur tensions des phases statorique.

$[i_a \ i_b \ i_c]$  : Vecteur courants des phases statorique.

$[\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]$  : Vecteur flux des phases statoriques.

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

$R_s$ : Résistance par phase statorique

### II.10.2. Equations Flux statorique:

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sf}][i_f] \quad (II.35)$$

La matrice  $[L_s]$  est une matrice carrée d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans  $[L_{s0}]$  et les termes variables dépendent de  $\theta$ , que nous regroupons dans  $[L_{s2}(\theta)]$  posons:

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (II.36)$$

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\pi) \\ \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\pi) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

Avec :

$[M_{s0}]$ : Inductance mutuelle entre deux phases statorique

$[L_{s0}]$ : Inductance propre d'une phase statorique.

$\theta$  : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\theta}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

$[M_{sf}]$  : La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

### II.10.3 Les équations mécaniques

Les seules pièces mobiles d'une (MSAP) sont le rotor et son roulement, et la robustesse et la fiabilité de cette machine est une conséquence directe de sa structure peu compliquée. A cet effet, l'application de la deuxième loi de Newton dans cette approche définit aisément. La dernière équation mécanique du modèle de système d'équations fondamentales de la MSAP

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \quad (II. 40)$$

$$C_f = F_r \Omega \quad (II. 41)$$

Avec :

$\Omega = \frac{\omega}{p}$  : Vitesse mécanique de rotation de la machine;

$C_r$ : Couple résistant;

$C_{em}$ : Couple électromagnétique; Couple de frottement;

$J$  : Moment d'inertie;

$p$ : Nombre de paires de pôles;

$\Omega$ : Vitesse électrique du rotor; Coefficient de frottement.

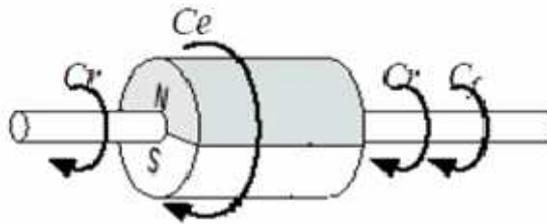


Figure II.19 : Les différents couples qui agissent sur le rotor

## II.11. Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasée équilibré à une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes d-q, à condition que le champ où les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservés [28], [26],

Dans le repère classique il y a trois axes (as, bs, cs) orientés suivant les axes des trois enroulements statorique de la machine. Habituellement, l'axe as est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (Fcorrespondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrones à aimants permanents  $\theta$  donne la position du rotor par rapport au stator.

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à  $\pi/2$  dans l'espace et alimentés par des courants à  $\pi/2$  dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes d et q, où dans le cas de la MSAP (figure II.20) l'axe d est orienté suivant le rotor (suivant la direction de l'aimantation).

Pour passer du système triphasé, abc, au système biphasé, dq, ( réciproquement) il faut utiliser les transformations suivantes [29] [30]:

La matrice  $P[\theta]$  de PARK est donnée sous la forme suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Son inverse  $[P(\theta)]^{-1}$  est définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

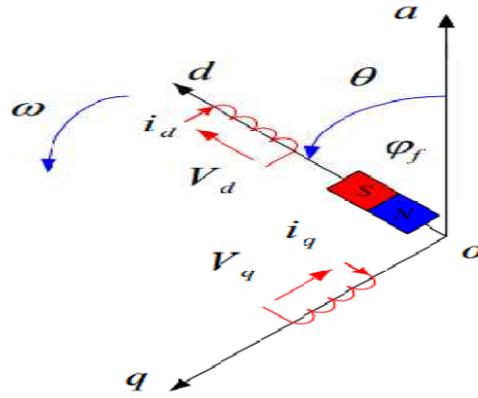


Figure II.20 :Schéma équivalent de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère

### II.11.1.1. Equations des Tensions

En appliquant la transformation de Park au système ,on aura:

$$[V_{dq}] = [P(\theta)][U_{abc}] = [P(\theta)][R][c] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (\text{II. 44})$$

Ensuite, en se basant sur transformation de Park inverse et le système (II.45) on obtient

$$[V_{dq}] = [T_\theta][R][T_\theta]^{-1} [i_{dq}] + [T_\theta] \left( \frac{d}{dt} [T_\theta]^{-1} \right) [\varphi_{dq}] + [\varphi_{dq}] \quad (\text{II. 45})$$

À l'aide de (II.41) on obtient les équations statorique de la machine exprimées dans le référentiel de Park lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} * \varphi_q \\ V_q = R \cdot i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} * \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

### II.11.1.2. Equations des Flux

D'après les équations (II.46) et la transformation de Park et Park inverse nous avons

$$\begin{cases} [\varphi_{dq}] = [T_\theta][\varphi_{abc}] = [L][i_{abc}] + \varphi_f \\ [\varphi_{dq}] = [T_\theta][L][T_\theta]^{-1} [i_{abc}] + \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II. 47})$$

D'où

$$\begin{cases} \varphi_d = l_d * i_d + \varphi_q \\ \varphi_q = l_q * i_q \end{cases} \quad (\text{II. 48})$$

$L_d, L_q$ : Inductances d'axes directe et en quadrature. La machine étant supposée à pôles lisses, ce qui signifie que  $L_d = L_q$

En tenant compte des équations du flux, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - P \Omega L_q i_q \\ V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + P \Omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Le calcul de couple Électromagnétique de la machine synchrone a aimant permanent se base sur la connaissance de la puissance instantanée  $P(t)$ , que s'exprime par :

$$P(t) = V_a * i_a + V_b * i_b + V_c * i_c \quad (\text{II.50})$$

Dans le référentiel de Park, cette puissance s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{II.51})$$

En remplaçant les courants et les tensions dans cette expression par leurs similaires dans

Le système(d, q), La puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park

Devient

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ P \omega_r \left( (L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q \right) + R (i_d^2 + i_q^2) + \left( i_d L_d \frac{di_d}{dt} + i_q L_q \frac{di_q}{dt} \right) \right] \quad (\text{II.52})$$

Cette puissance est compose de :

Puissance perdue par effet joule :

$$p_j = \frac{3}{2} R (i_d^2 + i_q^2) \quad (\text{II.53})$$

- La variation d'énergie magnétique emmagasinée :

$$P_{em} = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (\text{II.54})$$

La variation d'énergie magnétique emmagasinée :



$$X = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} Y = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_d}{L_q} p \omega_r \\ -\frac{L_d}{L_q} p \omega_r & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{L_d}{L_q} p \omega_r \end{bmatrix} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

L'équation mécanique est donné par

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} + F_r \Omega = C_e - C_r \\ C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q] + \Phi_m I_q \\ \Omega = \frac{\omega}{p} \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

### II.13. Utilisation de la transformation de Laplace

On applique la transformation de Laplace sur (II.59) (II.61) on trouve

$$\begin{cases} s_{i_q} = -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P \Omega i_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ s_{i_q} = -\frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_q}{L_d} P \Omega i_d - \frac{\varphi_f}{L_q} P \Omega + \frac{1}{L_q} V_q \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

$$i_d \left[ s + \frac{R}{L_d} \right] = \frac{L_q}{L_d} P \Omega i_q + \frac{1}{L_d} V_d \quad (\text{II.63})$$

$$i_d = \frac{P \Omega i_q L_q + V_d}{L_d s + R} \quad (\text{II.64})$$

Avec la même méthode on trouve  $i_q$

$$i_q = \frac{-P \Omega i_d - \Phi_f P \Omega + V_d}{L_q s + R} \quad (\text{II.65})$$

L'équation de mouvement devient

$$\begin{cases} j\Omega.s + F_r\Omega = C_e - C_r \\ \Omega = \frac{C_e - C_r}{j.s + F_r} \end{cases} \quad (\text{II. 66})$$

Avec :

$$C_e = \frac{3}{2}P[(L_d - L_q)I_dI_q + \Phi_f I_q] \quad (\text{II. 67})$$

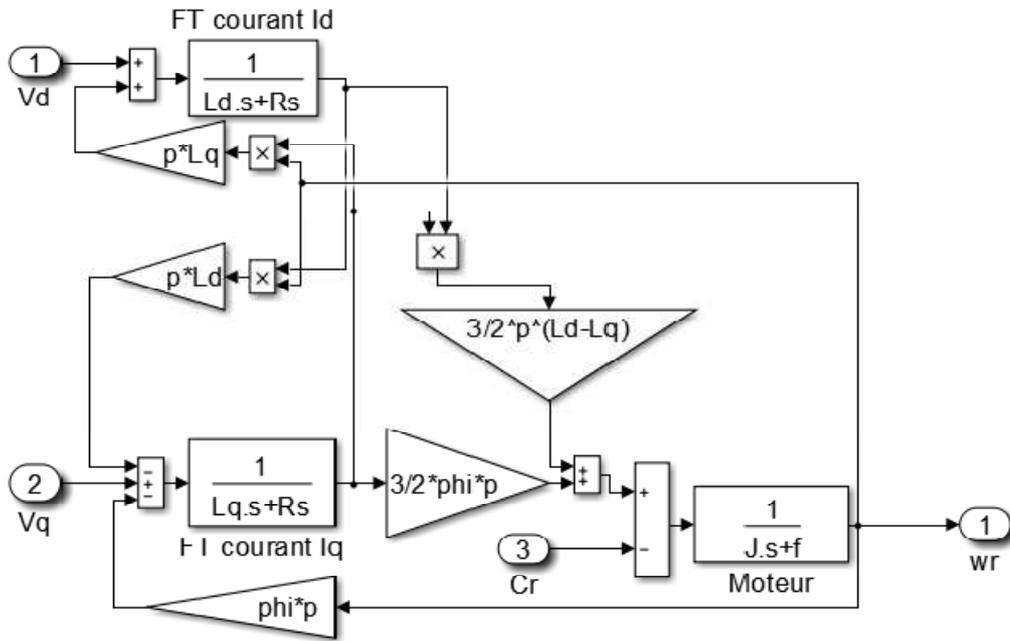


Figure II.22 : Schéma Simulink du modèle de la MSAP dans le repère de Park

### II.14. Commande vectorielle de la Génératrice Synchrones à aimants permanents

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatives [10]. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes ( $i_{qs}$ ) commande le couple et l'autre ( $i_{ds}$ ) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [33].

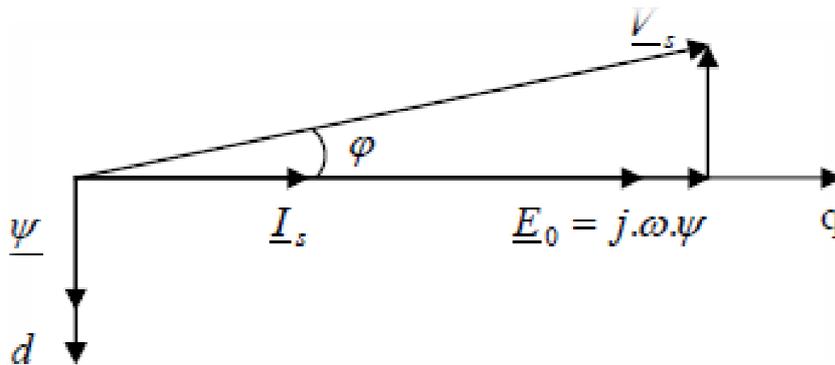
Dans le cas de la GSAP , la commande vectorielle permet d'appliquer les tensions de réglage nécessaires à ces bornes pour avoir le couple demandé, [34], nécessitant ainsi le contrôle des courants [35].

Cette commande est basée sur un pilotage vectoriel classique avec capteur de position [33], [34]. Le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique  $p\Omega$ . Un autre champ magnétique tournant est appelé la réaction de l'induit est produit par les enroulements de stator. La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.68})$$

Où  $p$  est le nombre de paires de pôles de la machine. La commande vectorielle classique consiste à aligner un des deux axes du repère de Park, généralement l'axe direct  $d$  selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation [33], [34]. Dans le cas des machines à rotor lisse, la commande la plus fréquemment utilisée consiste à simplifier le contrôle en imposant au courant direct une valeur nulle. Ce choix peut être justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe  $d$  [34]. Dans ces conditions, la composante en quadrature du courant est une image du couple. Le couple est contrôlé par la composante en quadrature,  $i_{qref}$  est donc proportionnel au couple demandé.

La spécificité de cette commande fait que l'angle entre le vecteur force électromotrice et le de courant est nul. Alors, le facteur de puissance  $\cos \phi$  reste proche de un, comme le montre la figure



**Figure II.23:** Principe d'orientation du flux.

La commande vectorielle revient alors à contrôler les deux composantes  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  du courant statorique en imposant les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  qui conviennent. Par conséquent, il suffira d'imposer les tensions de référence  $V_{sd\_ref}$  et  $V_{sq\_ref}$ .

A l'aide des régulateurs, l'obtention des tensions de référence permet de maintenir les courants direct et en quadrature au voisinage de leurs valeurs de référence  $i_{sd\_ref}$  et  $i_{sq\_ref}$ .

**II.14.1 Conception de correcteur de courants par PI classique**

D'après le modèle de la GSAP

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} + P \Omega_{mec} L_q L_{sq} \\ V_{sq} = R_S i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + P \Omega_{mec} L_d L_{sd} + \sqrt{\frac{2}{3}} \Phi_f P \Phi_{mec} \end{cases} \quad (II.69)$$

On remarque que les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  sont couplés. Les termes  $P \Omega_{mec} L_d i_{sq}$  et  $P \Omega_{mec} L_q i_{sd}$  correspondent aux termes de couplage entre les axes d et q.

L'effet du couplage du contrôle des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  peut être observé en régime transitoire de la régulation. Considérés souvent comme étant des perturbations internes, les termes de couplage sont généralement compensés par les régulateurs des courants en régime permanent grâce aux intégrateurs. Toute fois leur réaction étant souvent lente, il est envisageable de compenser les termes de couplage par une méthode de découplage, qui consiste à ajouter des termes identiques tout en opposant les signes à la sortie des correcteurs des courants de telle sorte que les boucles internes de régulation d'axe d et q soient complètement séparées,

Avec :

$$e_d : P \Omega_{mec} L_d i_{sq}, e_q : P \Omega_{mec} L_q i_{sd} \quad (II.70)$$

**II.14.1.1. Synthèse du régulateur de courant Isd**

Pour la régulation du courant, on utilise un régulateur PI, qui comporte une action proportionnelle qui sert régler la rapidité de la régulation et une action intégrale qui sert éliminer l'erreur statique entre la grandeur mesurée et la grandeur de référence. Le dimensionnement du régulateur PI est basé sur la dynamique en boucle fermée par la technique d'imposition de pôle.

En prenant en compte les équations de la machine associées au découplage par compensation, la boucle de régulation d'axe d se présente alors sous la forme du schéma donné sur la (Figure II.24). On note que la structure de la boucle de courant d'axe d est quasiment identique à celle de l'axe q.

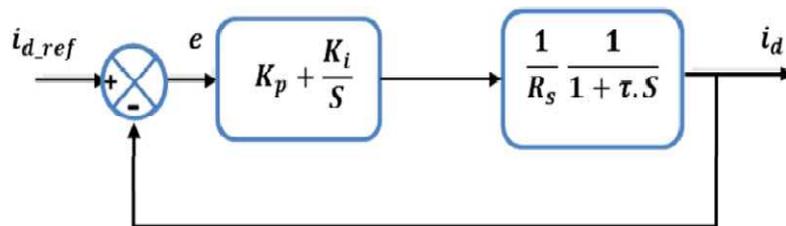


Figure II.24 : Schéma de la boucle de régulation du courant.

La dynamique de la machine relative à la partie électrique est égale à:

$$A(s) = \frac{1}{L_d s + R_S} = \frac{b}{a + b} \quad (II.71)$$

Ou

$$a = \frac{R_S}{L_d} \quad \text{et} \quad b = \frac{1}{L_d}$$

La constante de temps en boucle ouverte est :

$$\tau_{isd\_BO} = \frac{1}{a} \quad (II.72)$$

$$t_{isd\_BO} = 3\tau_{isd\_BO} = \frac{3}{a} \quad (II.73)$$

Par compensation on trouve :

$$\frac{K_{i\_isd}}{K_{P\_isd}} = a \quad (II.74)$$

La fonction de transfert du régulateur devient : t :

$$\frac{i_{sd}}{i_{sd}^*} = \frac{K_{P\_isd} * b}{K_{P\_isd} * b + s} \quad (II.75)$$

Avec une constante de :

$$\tau_{isd\_BF} = \frac{1}{K_{P\_isd} * b} \quad (II.76)$$

Et un temps de réponse :

$$t_{isd\_BF} = 3\tau_{isd\_BF} = \frac{3}{K_{P\_isd} * b} \quad (II.77)$$

On impose généralement un temps de réponse en boucle fermée plus rapide que celui du courant en boucle ouverte, on trouve :

$$t_{isd\_BF} = \frac{\tau_{isd_{B0}}}{h} \quad (\text{II. 78})$$

h:coefficient supérieur à 1

Ce qui permet de déterminer :

$$K_{p_{isd}} = \frac{3}{t_{risd_{FB}^*b}} \quad (\text{II. 79})$$

et

$$K_{p_{isd}} = aK_{p_{isd}} \quad (\text{II. 80})$$

#### II.14.1.2.Synthèse du régulateur de courant $I_{sq}$

De la même manière que le réglage précédant on trouve :

$$t_{isd\_BF} = \tau_{isd\_B0}/h \quad (\text{II.81})$$

$$K_{isq} = \frac{3}{t_{risq\_BF}^*b} \quad (\text{II.82})$$

$$K_{p_{isd}} = aK_{p_{isd}} \quad (\text{II.83})$$

### II.15. Résultats de simulation de la commande vectorielle

L'application du couple d'entraînement  $C_m$  respectivement à -10 et -20 N.m, a pour effet l'augmentation du courant  $i_{sd}$  en manifestant un couple électromagnétique  $C_{em}$  qui tend à s'opposer au couple d'entraînement  $C_m$ , une fois que ces deux couples sont égaux  $C_{em}=C_m$ , le régime établi sera atteint comme le montre les figures (II.25)

D'après les figures (II. 26), le courant en quadrature est à l'image du couple, et que le courant direct est nul. Les courants obtenus sont au voisinage de leurs références ce qui prouve l'efficacité de la commande vectorielle.

Les tensions et les courants du stator sont illustrés dans les Figures (II. 27). A partir du zoom sur les deux tracés, on peut constater que les signaux sont sinusoïdaux. L'amplitude des tensions lors de l'application du couple nominal est de l'ordre de 60V. Sachant que le courant  $i_{sd}$  est égal à 0, et que  $I_{sq}=2*C_{emref}/(3*P*\Phi_f)$ , donc l'amplitude du courant  $i_{sq}$  donne l'amplitude des courants statorique qui en résulte.

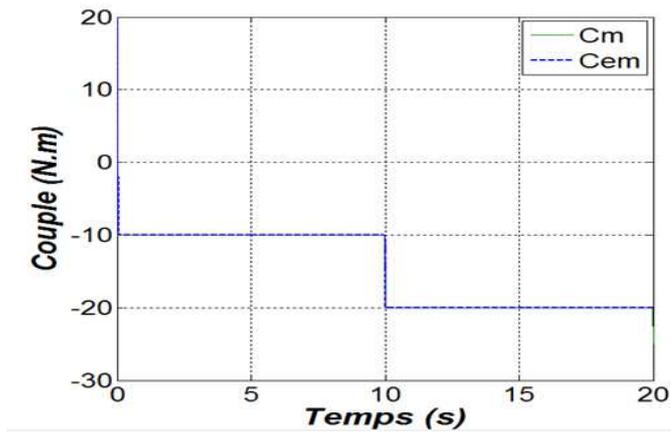


Figure II.25: Allure du couple électromagnétique avec un régulateur PI.

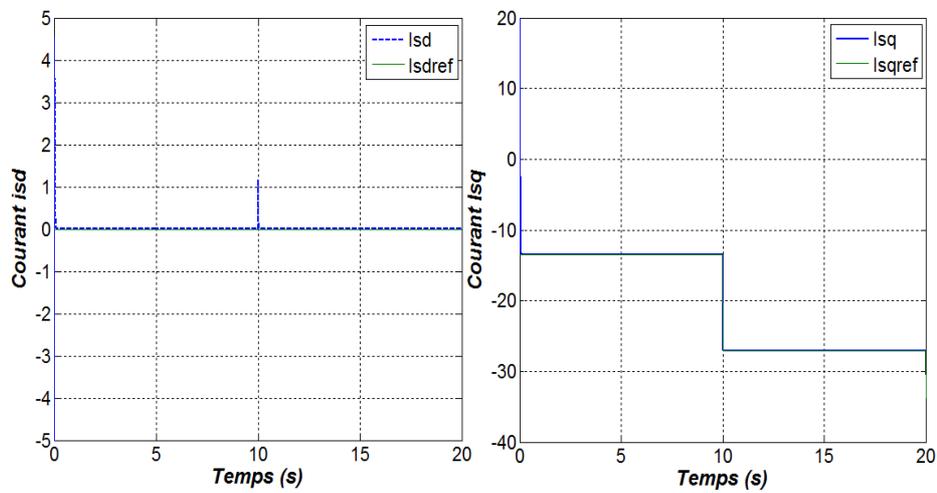


Figure II.26 : Allure des courants isd et isq avec un régulateur PI.

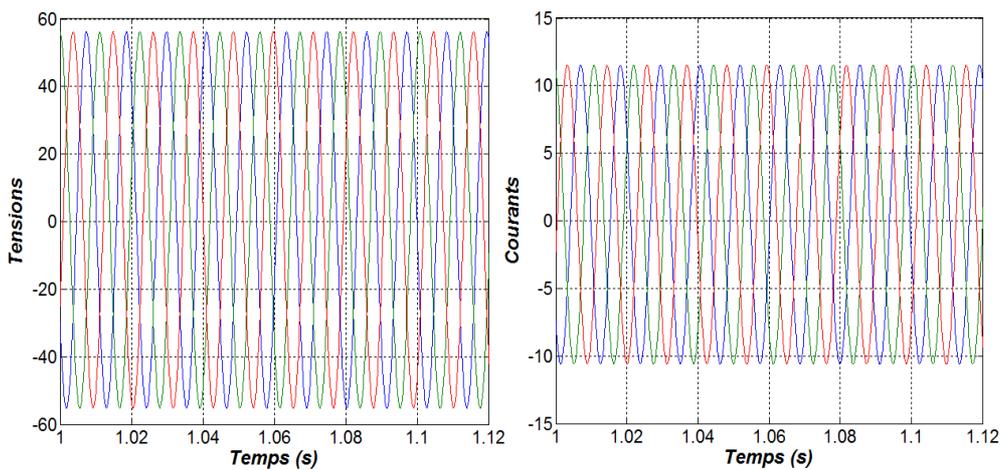


Figure II.27 : Allures : tensions et courants de la GSAP avec un régulateur PI.

## **II.16.Conclusion**

A travers ce chapitre, les modèles de deux parties essentielles du système de conversion éolienne ont été établis, la première partie représente la turbine et l'arbre de la génératrice. Quant à la deuxième partie, elle concerne la machine synchrone à aimants permanents en fonctionnement génératrice. La modélisation des deux parties a permis de constater que le modèle de la turbine était très influencé par la variation du vent et que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents correspondait à un système multi variable et fortement couplé, c'est pour cette raison que le recours à des stratégies de contrôle devient nécessaire, ce qui sera l'objet du troisième chapitre

# **CHAPITRE III**

## **Commande par mode glissant**

### III.1 Introduction

La commande par mode glissant, en raison de sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et des perturbations externes, peut être appliquée aux systèmes non linéaires incertains et perturbés [17][18]. Il s'agit de définir une surface dite de glissement en fonction des états du système de façon qu'elle soit attractive. La commande globale synthétisée est composée de deux termes : le premier permet aux trajectoires d'évoluer vers la surface, le second permet le maintien et le glissement le long de celle-ci. [36] [37]

Les lois d'adaptation des paramètres ajustables ont été synthétisées à partir de l'étude de stabilité. La commande globale ainsi construite permet d'assurer de bonnes performances de poursuite. Cependant, la présence de la fonction signe, dans la commande par mode glissant, provoque un phénomène de broutement qui consiste en des variations brusques et rapides du signal de commande, ce qui peut exciter les dynamiques non modélisées en hautes fréquences du processus et l'endommager. Plusieurs solutions ont été présentées dans la littérature. [35] [38] ont introduit une bande de transition autour de la surface de glissement permettant de transformer la fonction signe en saturation, et ainsi d'éliminer le broutement.

De nombreux systèmes réels et notamment les machines électriques présentent en plus des perturbations extérieures (variation de charge manipulée), des non linéarités (exemple : frictions, hystérésis) et des perturbations paramétriques.[38]

Dans le cas des lois de commande utilisant les régulateurs de type PID, les résultats obtenus sont bons pour des systèmes linéaires à paramètres constants, mais pour des systèmes non linéaires, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la vitesse et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

L'utilisation des algorithmes robustes vis-à-vis de ces non linéarités et de ces perturbations est donc souhaitable aussi bien en régulation qu'en poursuite de trajectoire. Une solution réside dans les commandes à structure variable à régime glissant.

### III.2 Définition des systèmes à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, à cause de la commutation (variation discontinue) du système et de son contrôleur (ou observateur). Cela est principalement dû aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun des sous-systèmes pris seuls.

### III. 3 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement

La théorie du mode glissant est le prolongement de l'étude des systèmes à structure variable. Les premiers travaux concernant ces systèmes de commande ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov, puis par d'autres chercheurs comme Utkin à partir des résultats des études du mathématicien Filipov.[39]

Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications. Aux Etats-Unis, cette théorie fut introduite par Slotine et au Japon par Young, Harasma et Hashimoto. Il a fallu attendre les années 80, pour que les systèmes de commande soient parmi les techniques de contrôle non linéaire les plus efficaces et les plus robustes.

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes :

- **Structure par commutation au niveau de l'organe de commande** : Cette structure de commande est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse.
- **Structure par commutation au niveau d'une contre-réaction d'état** : c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.
- **Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente"**. Cette dernière structure est retenue pour la suite dans notre étude.

#### III.4 Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Cette structure présente l'avantage de pré positionné l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.[40][41]

Le principe de cette commande est illustré sur la Figure III

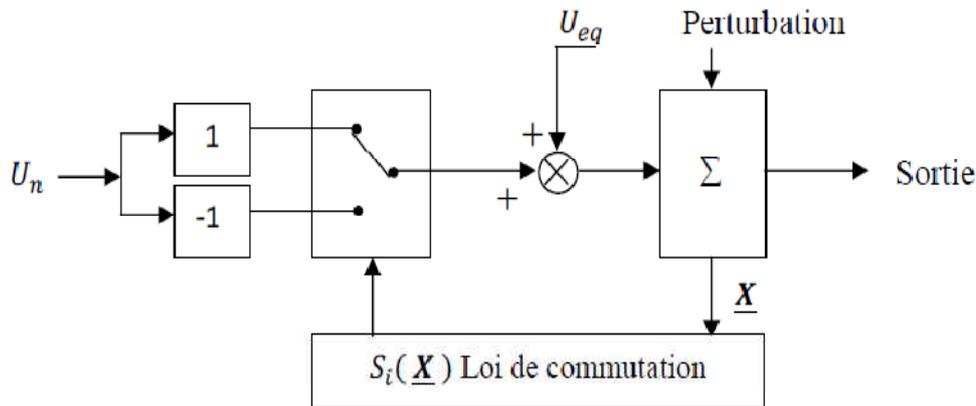


Figure III.1: Schéma de la structure avec ajout de la commande équivalente

### III.5 Principe de la commande à régime glissant

L'idée de base est d'attirer les états du système dans une région correctement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région. La commande par régime glissant est divisée en trois parties:[41][42]

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions de la convergence.
- La détermination de la loi de commande.

### III.6 Les systèmes à structure variable dans le mode glissant

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation.

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{X}, t)\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) \quad (\text{III.1})$$

Où  $\mathbf{X}$  : est le vecteur d'état,  $\mathbf{f}$  et  $\mathbf{g}$  : sont des fonctions non linéaires, et  $\mathbf{u}$  est l'entrée de commande.

### III.7 Conception des régulateurs à structure variables

#### III.7.1 Choix des surfaces de glissement :

En générale, pour un système défini par l'équation d'état précédente Il faut choisir " m " surfaces de glissement pour un vecteur  $[\mathbf{U}]$  de dimension " m ". Le chercheur J.J. Slotine a proposé une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de consigne[42]

$$S = e(x) + \lambda_1 \frac{d}{dt} e(x) + \lambda_2 \frac{d^2}{dt^2} e(x) + \lambda_3 \frac{d^3}{dt^3} e(x) + \dots + \lambda_m \frac{d^m}{dt^m} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Avec

X: variable à réguler.

$e(x)$  : l'écart de la variable à réguler =  $x_{\text{ref}} - x$

$\lambda_i$  : ( $i=1 \dots m$ ) : Constantes positives.

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $S(X)=0$ , pour un choix convenable du paramètre  $\lambda$ . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence

### III.7.2 Condition d'existence et de convergence :

Les conditions de convergence permettent aux variables à contrôler du système de converger vers la surface de glissement en régime permanent. Il s'agit donc de formuler une fonction scalaire positive  $V(x)$  appelée fonction de Lyapunov pour les variables d'état du système et de choisir ainsi une loi de commande  $u$  qui fera décroître cette fonction.

$$(\dot{V}(x) < 0) \quad (\text{III.3})$$

En définissant la fonction de Lyapunov:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.4})$$

Sa dérivée sera :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III.5})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer la condition suivante :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.6})$$

Cette condition est nécessaire pour d'une part estimer les performances de la commande, et d'autre part assurer la robustesse et garantir la stabilité du système non linéaire global [35], [42].

### III.7.3 Détermination de la loi de commande

Une fois la surface de glissement choisie, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre (origine du plan de phase) tout en assurant la condition d'existence du mode de glissement [35], [42].

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structures variables est que la commande doit commuter entre les extremums de la loi de commande  $U_{max}$  et  $U_{min}$ .

$$u(x, t) = \begin{cases} u^+_i(x, t) & \text{si } S(x) < 0 \\ u^-_i(x, t) & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Le rôle de ces lois de commande est de faire en sorte que chaque vecteur d'état  $x$ , se trouvant en dehors de la surface de glissement régie par la condition  $S(x)=0$ , est attiré vers la même surface, en un temps fini. Une fois la surface atteinte, le mode de glissement a lieu, et les dynamiques désirées du système sont effectives. De ce fait, le système devient insensible aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes.

Il existe plusieurs types de systèmes de commandes à structures variables dont la plus fréquemment utilisée et qui a fait l'objet de notre travail est appelée commande équivalente.

La structure du contrôleur à structure variable dans ce cas est donnée par l'équation :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{III. 8})$$

Elle est constituée de deux parties, une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante, représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est très importante dans la technique de commande non linéaire, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures.

Où :

$U_{eq}$ : correspond à la commande de linéarisation proposée par Fillipov et Utkin (commande équivalente), permettant d'avoir la trajectoire de l'écart sur la surface de glissement de la variable à contrôler et obtenue en imposant  $S(x)=0$ .

$U_n$ : Commande d'atteignabilité.

## III.8 Application de la commande par mode de glissement à la MPPT

### III.8.1. Conception du correcteur de vitesse par mode glissant

Pour contrôler la vitesse, la surface de glissement est inférieure ou égale à 0, la surface de glissement  $S(\Omega)$  est donnée comme suite:

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega_{mec} \quad (\text{III. 9})$$

En dérivant l'équation de la surface, on obtient:

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega_{mec} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant l'équation (III.9) dans l'expression (III.10) trouve:

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} \frac{C_g - C_{em}}{J} + \frac{B}{J} \Omega_{mec} \tag{III.11}$$

$$S(\Omega) = S(\Omega) = 0$$

$$\Omega_{ref} \frac{C_g - C_{em}}{J} + \frac{B}{J} \Omega_{mec} = 0 \tag{III.12}$$

On obtient

$$\begin{cases} U_{eq} = C_g - J \Omega_{mref} \\ U_n = U_{max} \operatorname{sgn}(S(\Omega)) \end{cases} \tag{III.13}$$

La commande proposée est détaillée dans la Figure (III.2) :

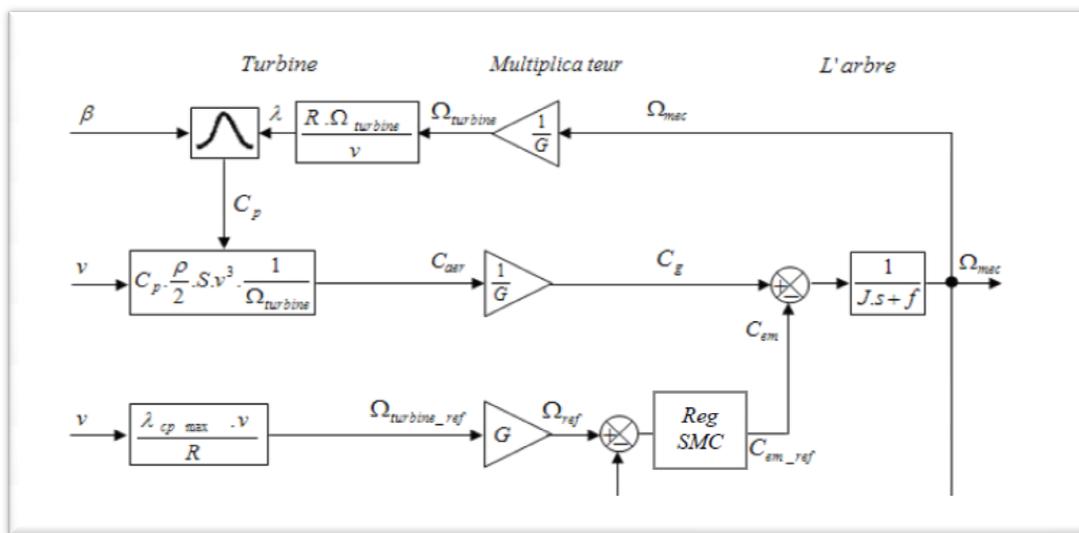


Figure III.2: Schéma bloc représentant l'application de la commande SMC à la commande de vitesse de la turbine

### III.9 Simulation et résultats

- Les Figures (III.3) montrent que l'application de le SMC est plus stable et coïncident avec leur référence et l'erreur est pratiquement égale à zéro.
- Les Figures (III.4) montrent l'évolution de la vitesse spécifique au cours du temps, on constate que cette vitesse oscille légèrement autour de la vitesse spécifique nominale ( $\lambda_{nom}=8.1$ ) avec la variation du vent et garde cette valeur dans le but d'augmenter la production. Cette variation se voit considérablement atténuée avec l'application SMC.
- La performance dynamique obtenue SMC est meilleure, ce qui met en évidence l'efficacité du réglage par les commandes avancées par rapport au réglage par PI classique, ceci est confirmé par les allures des vitesses et de l'erreur Figure (III.5).

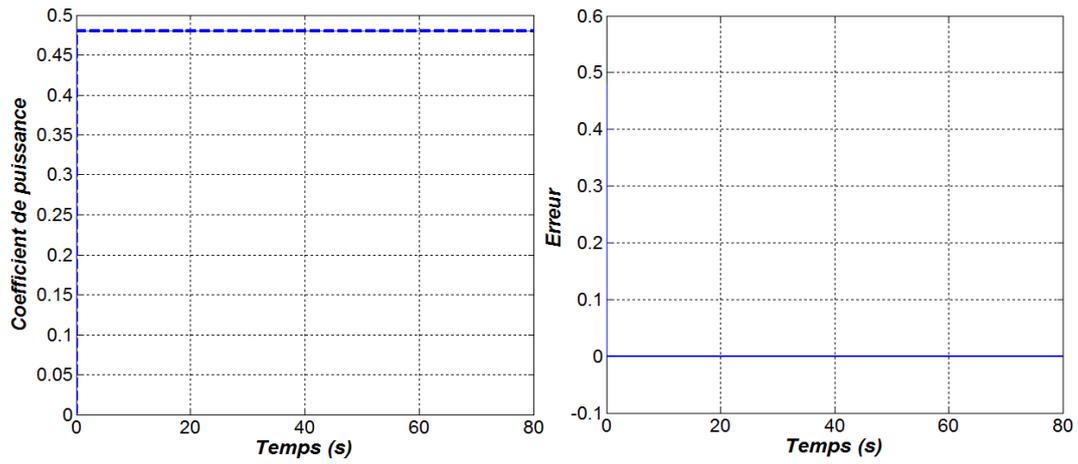


Figure III.3 : Allure du coefficient de puissance avec un régulateur SMC

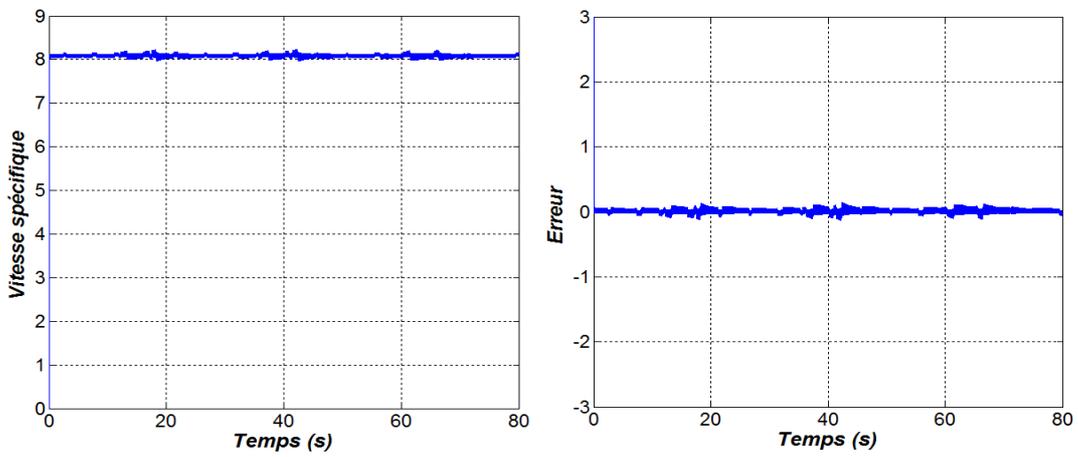


Figure III.4 : Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur SMC.

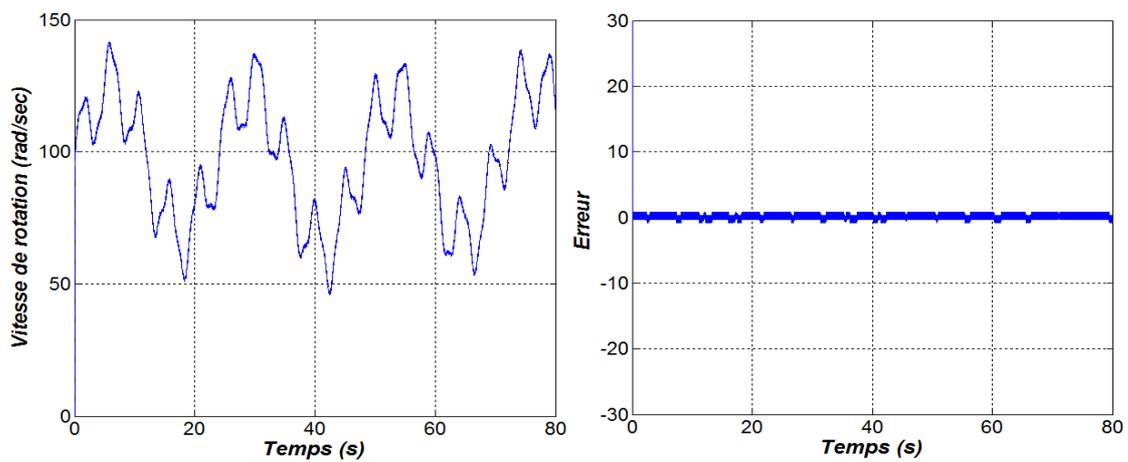


Figure III.5 : Allure de la vitesse de rotation avec le régulateur SMC

### III.10. Simulation de la cascade (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents)

L'application des différentes méthodes de commande pour la turbine et la génératrice, a permis d'obtenir des performances dynamiques assez satisfaisante. On retient en particulier l'application du mode synergétique qui s'est démarquée par une bonne précision et un meilleur temps de réponse. Ceci nous a conduits à l'appliquer au système (turbine, génératrice synchrone à aimants permanents).

Les points suivants ont été remarqués :

- Le coefficient de puissance ainsi que la vitesse spécifique sont maintenus à leur valeur optimale.
- Un bon suivi de consigne traduit par une superposition entre les courbes de la vitesse réelle de la GSAP et de sa référence (figure (III.6)), et une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement.
- les courants  $i_{sd}$  et  $t_{sd}$  de la figure (III.7) confirment le fonctionnement de l'algorithme de la commande appliquée. L'allure du courant  $est_{sd}$  de même forme que celle du couple  $Cem$ .

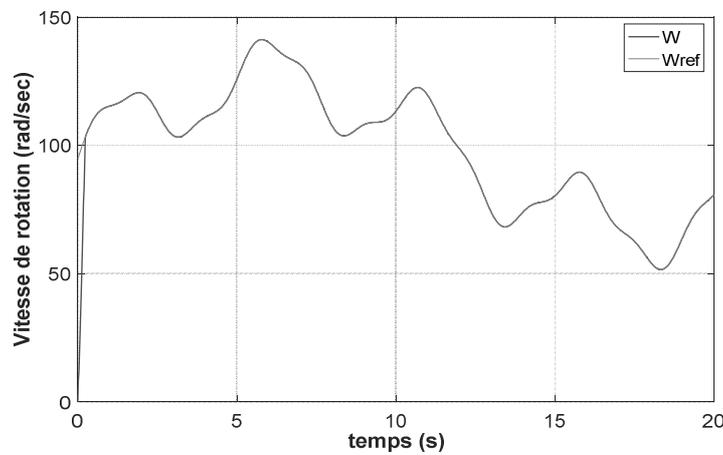
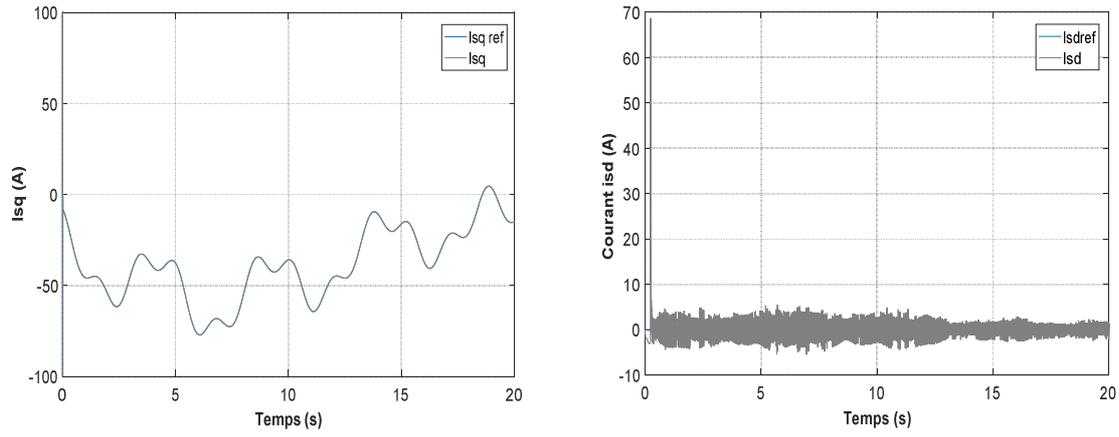
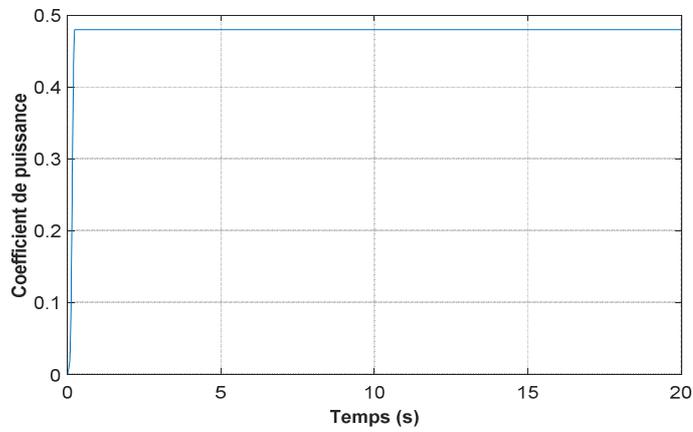


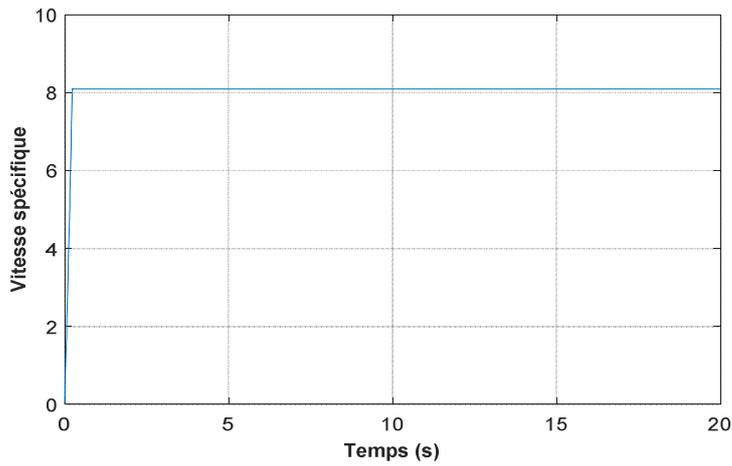
Figure.III.6 vitesse de rotation en cascade (turbine-GSAP)



**Figure III.7** courant isd et isq en cascade(turbine-GSAP)



**Figure III.8**coefficient de puissance



**Figure III.9**vitesse spécifique

### **III.5 Conclusion**

A travers ce chapitre nous avons présenté le principe de commande appliquées à savoir la MPPT pour la turbine et la commande par mode glissant. Les résultats de simulation obtenus par l'application de la commande par mode glissant ont montré l'amélioration apportée.

Et en fin nous avons présenté la simulation de cascade (turbine-GSAP)

# **CONCLUSION**

## **GENERALE**

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier les modes de fonctionnement des machines synchrones à aimants permanents utilisées dans les systèmes éoliens, quelques méthodes de commande optimale à savoir la technique MPPT, ainsi que la commande vectorielle ont été appliquées à notre système.

La première partie de ce travail a été consacrée à des rappels sur les systèmes éoliens et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels ont été suivis par un, d'état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices d'éoliennes.

Dans le but de concevoir le principe de régulation de la vitesse mécanique, une étude aérodynamique de la pale a été faite. Un état de l'art a été présenté des différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Parmi les topologies citées, notre choix s'est porté sur l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables avec commande vectoriel.

Après avoir déduit les principales caractéristiques aérodynamiques de la turbine, les différentes zones de fonctionnement et les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées.

La zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée a été détaillée. Les algorithmes de maximisation de puissance ont été validés par des résultats de simulation qui ont montré leurs inconvénients et leurs avantages.

L'étude a permis de réaliser une modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation est basée principalement sur l'approche qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Tout cela a été conçu autour d'une GSAP.

La modélisation du système de conversion éolienne traite deux parties essentielles ; la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice, la deuxième partie, inclue la machine synchrone à aimants permanents. Le modèle de la GSAP, basé sur des équations différentielles périodiques, est simplifié par la transformation de PARK.

L'objectif principal de notre travail consiste d'un côté à l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" avec régulateur PI pour la turbine, et d'un autre coté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents. Pour améliorer cette extraction et afin d'avoir un meilleur rendement, une nouvelles stratégie de commande avancée ( Mode Glissant,) a été appliquée et des essais de simulation sont effectués et commentés. Les résultats de simulations ont donné des performances dynamiques très satisfaisantes avec un bon suivi confirmé par la superposition des courbes de la vitesse réelle de la GSAP et de sa référence. Les meilleures performances ont été obtenues avec le mode Glissant.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## Bibliographie

---

- [1] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] Communication à l'académie des technologies pour un progrès résonné de Bernard Tardie« Rapport énergie hydraulique éolienne », novembre 2005.
- [3] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.
- [4] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [5] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, « Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998.
- [6] « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur - document ».
- [7] R REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE Faculté des Sciences de L'ingénieur Département d'Electrotechnique, 04 /07/2009.
- [8] Commission of the European Communities, « Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future. », Brussels, 10.1. 2007. COM (2006) 848 final.
- [9] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [10] M. Maliki, S. Belarbi, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret »,
- [11] S. Maghsel, « Contribution a la modélisation et la commande d'un turbin éolienne »
- [13] S. Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de Magister, École nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009 »,
- [14] B. Belkacem, « Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local »,
- [15] S. Talb, N. Zegrane, « Commande par Mode Glissant d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice asynchrone à Double Alimentation »
- [16] H. C. BEN DJOUDI and M. A. ARARIA, « Stratégies de Commande DTC-SVM appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Mémoire de Master Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2016

## Bibliographie

---

- [17] 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, 2003.
- [18] A. MOUALDIA, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Ecole Nationale polytechnique d'Alger, 2014
- [19] S. Al AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées à un réseau de distribution moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille; Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [20] A. GAILLARD, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010
- [20] G. Bartolini, A. Ferrara and E. Usai, "Chattering avoidance by second-order sliding mode control ", IEEE Transactions on Automat Control, vol. 43, no. 2, pp. 241-246, 1998.
- [21] B. Multon: « Les Machines Synchrones Autopilotées » ; Notes de Cours ; Ecole
- [22] A. Kaddouri, "Etude d'une commande non-linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Doctorat, Université de Laval, Québec, Novembre 2000.
- [23] M.Ezzat, « commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimant Permanents. Automatique / robotique » . Ecole centrale de Nantes. Français . 2011
- [24] A. Ameur, " Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants", Thèse de magistère, Université de Batna, 2005.
- [25] D. Lahouel, " Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Thèse de magistère, Université de Batna, 2009
- [26] F. benchabane " Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering" Mémoire de magister, université de Biskra, 2005.
- [27] K. Yahia, " Estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé", Thèse de magistère, Université de Biskra, 2005.
- [28] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, " Modélisation des Machines Electriques ", Presses de L'Université de Batna ,1997 .
- [29] Leila Parsa, " Performance Improvement Of Permanent Magnet AC Motors». Thèse Is of Doctoral, University of Science and Technology, Tehran, Iran, May 2005.

## Bibliographie

---

- [30] A. Saiad "Commande à structure variable d'un système d'entraînement électrique" Mémoire de Magister, université de Batna, 2002.
- [31] W. Belmenaouar « Commande dynamique en mode glissant de la machine à aimants permanents alimentée en tension » mémoire de master, université m'hamedbougara – boumerdes, 2017
- [32] N. Bounasla and K. E. Hemsas, "Second order sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor", STA 14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control, Tunisia, 2013
- [33] : **A. Aoufi**, "Utilisation d'observateurs à modes glissants pour le contrôle direct découplé et le contrôle vectoriel d'une machine asynchrone à cage", Thèse de magistère Université de Biskra, 2011.
- [34] : **S. Rezgui** "Commande de machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel", Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine Algérie, 2009 Algérie, 2009.
- [35] : A. Davigny, «Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, 2007, Université de Lille
- [36] : **N. Bounasla** « .Commande Par Mode de Glissement D'ordre Supérieur de La Machine Synchrones à Aimants Permanents » thèse de Magister en Electrotechnique 2014
- [37] : **A. Massoum**, "Contribution à la commande singulièrement perturbée d'une machine synchrone à aimants permanents : commande à structure variable (CSV); commande neuro-floue", Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbès, 2007.
- [38] : **V. Bregeault**, "Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants", Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2010.
- [39] : **G. Grellet**, and G. Clerc, "Actionneur électriques, principes, modèles, commande" Eyrolles, 1997
- [40] : **H. Amrous**, "Commandes adaptatives d'une machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [41] : **I. Deghboudj**, "Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur", Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013..

# **ANNEXES**

<b>Paramètres de la GSAP</b>		
<b>Element</b>	<b>SINIFICATION</b>	<b>VALEUR</b>
RS	résistanc statorique	0.18 $\Omega$
Ld=Lq	Inductance statorique	2mH
$\Psi_f$	Flux des aimants permanents	0.123wb
Pgsap		10kw
J	Moment d'inertie	kg.m <sup>2</sup>
P	Le nombre de pair de pole	4

<b>Paramètres de la turbine</b>		
<b>Elements</b>	<b>SINIGNIFICATION</b>	<b>VALEUR</b>
R	Rayon des pales	3mm
P	Masse volumique	1.22
Jtur	Moment d'inertie	0.48kg. m <sup>2</sup>
Cpropt=0.48	Coefficient de la Puissance optimal	0.48kg. m <sup>2</sup>
$\lambda_{opt}$	ration optimal	8.1
Ptur		10kw

ملخص: هذا العمل هو معاهدة التحكم لاخطي لطاقة الرياح لربط مولد المغناطيس الدائم GSAP. طاقة الرياح اصبحت من الطاقات الاكثر تنافسية وذلك يرجع الى التأثيرات الايجابية على البيئة والتطور الاقتصادي والتحكم في سرعة التوربين وقد استعملنا عدة تقنيات في هذا النظام منها MPPT و منظم PI و في مولد المغناطيس الدائم GSAP يستعمل منظم جديد PI انزلاقي. وفي النتائج المتحصل عليها من المحاكات تاكيد كفاءة تطبيق الاستراتيجية المستعملة في التعامل مع نظام لا خطي الهدف من هذا النظام هو تحسين كفاءة تحويل طاقة الرياح وتحسين نوعية الطاقة الكهربائية المنتجة. وفي الاخير نلاحظ تحسن في استخدام منظم الانزلاق.

( PI par mode glissant)

## Résumé

*Ce travail traite la commande non linéaire d'une éolienne connectée à une GSAP. L'énergie éolienne est devenue une des énergies les plus compétitives, du fait de son impact positif sur l'environnement, son développement économique, et l'abondance des nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables. L'objectif des systèmes de conversion d'énergie éolienne est d'augmenter l'efficacité, améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, et extraire l'énergie optimale pour différentes vitesses de vent. On applique des techniques de commande usuelles, telles que la MPPT muni d'un régulateur PI à la turbine et la commande vectorielle à la génératrice synchrone à aimant permanent. On introduit de nouveaux régulateurs (Pi par mode glissant). Les résultats de simulation confirment l'efficacité de la stratégie appliquée dans le traitement des systèmes non linéaires avec des caractéristiques attrayantes. On note des améliorations apportées avec l'utilisation du régulateur par mode glissant.*

### **Mots clef**

*Turbine, génératrice synchrone à aimant permanent, MPPT, commande vectorielle, commande par mode glissant, régulateur SMC.*