



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Commande électrique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Boudina Abdelhak et Benrahmani Isameddine**

Le : 28juin 2022

## **Commande robuste d'un système éolien par mode glissant**

---

### **Jury :**

Mme. Sabrina Abdeddaim	Pr	U. de Biskra	Président
M. Omar Charrouf	MCA	U. de Biskra	Rapporteur
M. Achour BETKA	Pr	U. de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Commande électrique

Réf. : Entrez la référence du document

---

## Commande robuste d'un système éolien

Le : 28 juin 2022

**Présenté par :**

Abdelhak Boudina  
Isameddine Benrahmani

**Avis favorable de l'encadreur :**

Omar Charrouf

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

**Cachet et signature**

## *Dédicaces*

*Je commencerais, au nom de Dieu le clément, le tout -puissant, le miséricordieux*

*Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude:*

*A ma très chère mère, à qui je dois la réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance.*

*A l'âme de mon chère père, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout -puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.*

*A mes chères sœurs Assia et Salsabil qui n'ont pas cessés de me conseiller, encourager et soutenir, que Dieu les protège et leur offre bonheur et prospérité.*

*A mes chers frères : Nour-Eddine, Sàad, Zouheir et Mahdi pour leurs patiences et leurs soutiens qu'ils n'ont cessé d'apporter au cours de ma formation.*

*A mon chère binôme Issam , pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*Je n'oublie jamais la générosité illimitée de mes amis avec lesquelles j'ai partagé les bons et*

*les durs moments :Mahmoud ,Ramzi , Abdellatif et Anouar.*

*A mes enseignants & professeurs.*

*A tous mes collègues de ma promotion en Commande électrique 2022 et surtout Moussa.*

*A toute ma famille et à tout ceux qui me connaissent je vous aime.*

**Abdelhak**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Les deux personnes les plus chères à mon cœur,*

*mon père et ma mère saadia ,smail,*

*qui m'ont apporté soutien et confort tout au long de mes études.*

*A mes frères et mes sœurs Tous mes amis sans exception.*

*Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant*

*Toutes mes années d'études.*

**ISSAMEDDINE**

### ***Remerciement***

*Avant tout, on commencera de prime abord par louer et glorifier ALLAH, notre dieu le tout puissant, de nous avoir donné, tour à tour, la patience, la force, la santé et la volonté afin de réaliser ce modeste travail.*

*On adresse un vif remerciement à Mr **CHARROUF O**, Professeur d'avoir accepté de nous encadré pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils et orientations durant tout le travail.*

*Nos remerciements vont également à tous nos camarades de la promotion Commande électrique 2022.*

*Nous manifestons beaucoup de gratitude pour nos familles et surtout nos parents qui nous ont encouragés tout le long de nos études.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail.*

# ***LISTES DES FIGURES***

## **Chapitre I :Généralités sur les systèmes éoliens**

Figure .I. 1: Photographie des moulins à vent.

Figure .I.2: Conversion de l'énergie éolienne.

Figure .I.3: éoliennes à axe vertical(a) et à axe horizontal(b).

Figure .I.4: Evolution de la puissance éolienne totale installée dans le monde 2001-2018, avec taux de croissance annuel composé en GW .

Figure .I.5 : Énergie éolienne globale installée dans le monde .

Figure .I. 6: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010).

Figure .I.7: Éléments constituant une éolienne.

Figure .I.8: Eolienne à vitesse fixe.

Figure .I.9: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Figure .I.10: Génératrice synchrone à vitesse variable avec convertisseurs MLI.

Figure .I.11: Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.

Figure .I.12: Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Figure.I.13 Schéma synoptique d'une commande MPPT en vitesse.

Figure.I.14.Allure des zones de commande

## **Chapitre II: modélisation mathématique du système éolien**

Figure.II.1: Système mécanique de l' éolienne.

Figure.II.2 – Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Figure.II.3– Schéma de la turbine éolienne.

Figure.II.4 – Coefficient a aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ).

Figure.II.5 : Schéma représentatif de la GSAP.

Figure.II.6 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

Figure.II.7: Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

Figure.II.8: Modèle de PARK pour la GSAP.

Figure.II.9 : Schéma équivalent d'un convertisseur triphasé.

Figure.II.10. Modèle de bus continu.

### **Chapitre III: Approche De Commande**

Figure.III.1: modélisation de système éolienne command en couple

Figure.III.2: différentes modes pour la trajectoire dans le plan de phase

Figure.III.3: Schéma global de réglage par mode glissant

Figure.III.4: Allure du profil de vitesse du vent

Figure.III.5: Allure du coefficient de puissance vitesse de vent variable

Figure.III.6: puissance de turbine par régulateur PI pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure.III.7: puissance de turbine par régulateur MG pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure.III.8: puissance de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure.III.9: couple de génératrice par deux régulateur pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure. III.10: vitesse de turbine par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure. III.11: courant iq de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent

---

Figure.III.12: courant Id de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent

Figure. III.13: courant statorique Ia de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent

## ***LISTE DE TABLEAUX***

Tableau .A.1:Les paramètres des constituants du système de conversion éolien

## ***LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES***

$\rho$	densité volumique de l'air	$\text{Kg.m}^3$
$S$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	$\text{m}^2$
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne	-
$R$	rayon de la turbine	m
$\lambda$	Vitesse spécifique	-
$\beta$	Angle de calage des pales d'une éolienne	°
$G$	Rapport de multiplicateur	-
$P_{\text{aer}}$	Puissance aérodynamique	
$P_m$	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice	W
$V_v$	vitesse du vent	m/s
$v$	la vitesse du vent en aval de la turbine	
$\Omega_{\text{tur}}$	Vitesse de rotation de la turbine	rd/s
$\Omega_g$	Vitesse de rotation de la génératrice	rd/s
$\Omega_{\text{méc}}$	vitesse de rotation à la sortie du multiplicateur.	rd/s
$\lambda_{\text{opt}}$	Lamda Optimale	-
$J_{\text{tur}}$	inertie de la turbine	$\text{kg.m}^2$
$J_g$	inertie de la génératrice	$\text{kg.m}^2$
$J_T$	inertie totale sur l'arbre	$\text{kg.m}^2$
$f_v$	coefficient des frottements	N.m/s
$C_{\text{méc}}$	Couple mécanique de la génératrice	N.m
$C_{\text{em}}$	couple électromagnétique	N.m
$C_{\text{vis}}$	couple visqueux	N.m
$R_s, R_r$	résistances statorique et rotorique par phase	ohm
$L_s, L_r$	Inductances propres statorique et rotorique	H
$M_s$	Inductances mutuelles entre deux phases statoriques	H
$M_r$	Inductances mutuelles entre deux phases rotoriques	H
$M$	inductance magnétisante	H
$\phi_{ds}$ et $\phi_{qs}$	Flux statoriques diphasés dans un repère tournant	Wb
$\phi_{dr}$ et $\phi_{qr}$	flux rotoriques diphasés dans un repère tournant	Wb
$I_{ds}$ et $I_{qs}$	Courants statoriques diphasés dans un repère tournant	A
$C_{\text{aer}}$	couple aérodynamique	
$C_r$	Couple résistant	N.m
$\omega_s$	Pulsation des grandeurs statoriques	rd/s
$\omega_r$	Pulsation des grandeurs rotoriques	rd/s
$\theta_r$	Angle relatif à la pulsation statorique $\omega_r$	rd
$\theta$	caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator	
$P_s$	Puissance active statorique	W
$\Omega$	Vitesse de rotation de la machine	rd/s

$p$	Nombre de paire de pole de la machine	-
-----	---------------------------------------	---

$V_{ds}, V_{qs}$	Tensions statoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement.	V
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine	-
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine	-
$P_{tur}$	Puissance de la turbine éolienne	W
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>	-
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouvert	-
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée	-
$a_s, b_s, c_s$	correspondent aux trois phases du stator	-
$A_r, b_r, c_r$	correspondent aux trois phases du rotor	-

$K_i$	L'action intégrale du régulateur
$K_p$	L'action proportionnelle du régulateur
$\Omega_{ref}$	Vitesse de référence
$I_{dref}$	Courant d de référence
$I_{qref}$	Courant q de référence
$e_d, e_q$	Composantes de la force électromotrice de compensation
$T_r$	Temps de réponse imposé.
R.MGO1	Régulateur par Mode Glissement d'Ordre 1
$\mathcal{E}(x)$	L'écart entre la valeur estimée et l'état réel

GSAP	Génératrice synchrone à aimant permanent
CC	courant continu
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
PI	Correcteur Proportionnel intégrale
CMG	Commande par mode glissants
CSV	Commande à structure variable
MC	Mode de convergence
MG	Mode de glissement
F.e.m	Force électromotrice
$F_{BO}$	Fonction de transfert en boucle ouverte
$F_{BF}$	Fonction transfert en boucle de fermée
CV	Commande vectorielle
d,q	Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadrature
t	Temps (s)
P et S	Opérateur de la Place $\frac{d}{dt}$

## Sommaire

Dédicaces	
Remercient	
Listes Des Figure	
Liste De Tableaux	
Liste Des Notations Et Symboles	
Sommaire	
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens .....	4
I.1 Introduction:.....	4
I.2. Généralités sur l'énergie éolienne.....	4
I.2.1. Historique :.....	4
I.2.2. Définition de l'énergie éolienne :.....	5
I.2.3.Principe de fonctionnement de l'éolien:.....	5
I.2.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne: .....	6
I.2.5.Différentes types d'éoliennes :.....	7
I.2.5.1. Les éoliennes à axe vertical: .....	7
I.2.5.2.Les éoliennes à axe horizontal: .....	8
I.2.6. Énergie éolienne en quelques chiffres :.....	8
I.2.6.1 Dans le monde : .....	8
I.2.6.2.En Algérie : .....	9
I.2.7.Principales composantes d'une éolienne:.....	10
I.2.7.1. Les pales: .....	11
I.2.7.2. La nacelle :.....	11
I.2.7.3. Le système d'orientation:.....	12
I.2.7.4. Le mât (ou tour): .....	12
I.2.8.Déférents technologies des éoliennes:.....	12
I.2.8.1. L'éolien à vitesse fixe:.....	12
I.2.8.2. L'éolien à vitesse variable: .....	13
I.2.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable: 14	
I.2.9.1. Système utilisant une génératrice synchrone: .....	14
I.2.9.2. Système utilisant une génératrice asynchrone: .....	15
I.2.9.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation(MADA):.....	15
I.3. types de commande d'un système éolien .....	17

I.3.1. la commande en vitesse.....	17
I.3.2. la commande en couple.....	18
I.4. Conclusion: .....	19
Chapitre II : modélisation mathématique du système éolien .....	20
II.1.Introduction : .....	21
II.2. Modélisation d'une turbine éolienne.....	21
II.2.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine : .....	21
II.2.2. Modélisation de la turbine : .....	23
II.2.3. Modèle du multiplicateur: .....	25
II.3.Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent : .....	26
II.3.1.Hypothèses simplificatrices : .....	27
II.3.3.Passage au repère de Park : .....	28
II.4. Modélisation du convertisseur CA/CC:.....	32
II.6.Conclusion : .....	35
Chapitre III : Approche de commande:.....	36
III.1. Introduction : .....	37
III.2. Commande MPPT en couple du system éolienne:.....	37
III.3.Commande vectorielle de la GSAP par régulateur PI:.....	38
III.3.1. Principe de la commande vectorielle.....	38
III.3.2. Découplage : .....	39
III.3.2.1. Découplage par compensation:.....	39
III.4. Commande vectorielle de la MSAP par régulateur glissant (CMG) : .....	41
III.4.1. Systèmes à Structures Variables:.....	41
III.4.1.1 Conception de la commande par mode glissant : .....	42
III.4.1.1.1 Choix de la surface de glissement:.....	42
III.4.1.1.2 L'établissement des conditions d'existence:.....	43
III.4.1.1.3 Synthèse de la loi de commande par mode glissant:.....	43
III.4.2. Application de la commande par mode glissant à la GSAP:.....	45
III.4.2.1 Pour la commande du composant direct de courant statorique:.....	45
III.4.2.2 Pour la commande de la composante en quadratique du courant statorique:.....	46

---

III.5. Introduction:.....	47
III.6. Résultats de simulation :.....	47
III.6.1. Résultats mécaniques :.....	49
III.6.2. Résultat éclectique:.....	51
III.7. Conclusion:.....	53
IV. Conclusion générale.....	55
BIBLIOGRAPHIE.....	56
ANNEXE.....	61
Résumé	

# *Introduction Générale*

## Introduction Générale

L'énergie que nous utilisons chaque jour dans le monde provient principalement des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) qui existent parce qu'il est moins coûteux et facilement accessible, mais avec son utilisation excessive et permanente, de nombreux problèmes se sont posés, notamment le climat et le réchauffement climatique causé par l'émission de dioxyde de carbone [01]

Le besoin croissant en énergie électrique et la disparition progressive des ressources fossiles a incité les chercheurs à réfléchir aux ressources énergétiques durables et Plus respectueux de l'environnement. Ces ressources sont les éléments de base de la nature : le vent, le soleil et l'eau. Ces substitutions sont appelées "Energies Renouvelables".

La production d'électricité est liée aux énergies renouvelables telles que : Énergie solaire. Énergie hydraulique . Biomasse . énergies Géothermique surtout produite par l'énergie éolienne, il joue un rôle essentiel dans la production d'énergie classiques. Ce dernier est utilisé depuis des siècles et développé en conséquence

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable, ce type de fonctionnement permet de diminuer le coût de production d'électricité par des aérogénérateurs et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à concevoir à étudier un système d'éolien basé sur une machines synchrones Nous proposons des techniques de contrôle PI et Mode Glissant. comme stratégie de contrôle de ces appareils .On vise par cette étude de montrer une technique de contrôle robuste vis à vis des perturbations externes causées par les variations de la vitesse de vent.

Le travail présenté dans ce mémoire est structuré autour de trois grands chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des Informations générales sur les systèmes éoliens Il expliquera comment ce système et ce contrôle fonctionnent

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation mathématique du système éolien Afin de mieux connaître le système, nous nous occuperons de son modèle

mathématique en simplifiant les hypothèses, ce qui nous permettra d'obtenir une forme simplifiée de contrôle du système.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous passons en revue et commentons l'approche de contrôle de suivi du point de puissance maximale avec contrôle de couple pour faire une commande robuste en concevant des contrôleurs par mode glissant via le programme Matlab/Simulink

Finalement, Nous terminerons avec une conclusion générale représentant les avantages de commande robuste par rapport la commande simple

***Chapitre I :***  
***Généralités sur les systèmes***  
***éoliens***

## **Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens**

### **I.1 Introduction:**

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies, notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique qui est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [02, 03].

### **I.2. Généralités sur l'énergie éolienne**

#### **I.2.1. Historique :**

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moulin du grain (figure I.1). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à «Poul-La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, environ 1 million d'aérogénérateurs fonctionnaient dans le monde. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [04].



**Figure I. 1: Photographie des moulins à vent. [14]**

### **I.2.2. Définition de l'énergie éolienne :**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [05].

### **I.2.3.Principe de fonctionnement de l'éolien:**

Le fonctionnement général de l'éolien est illustre par la figure (I.2) Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique [06].

- La génératrice convertit, enfin l'énergie mécanique en énergie électrique, transmise ensuite directement ou indirectement au réseau électrique.

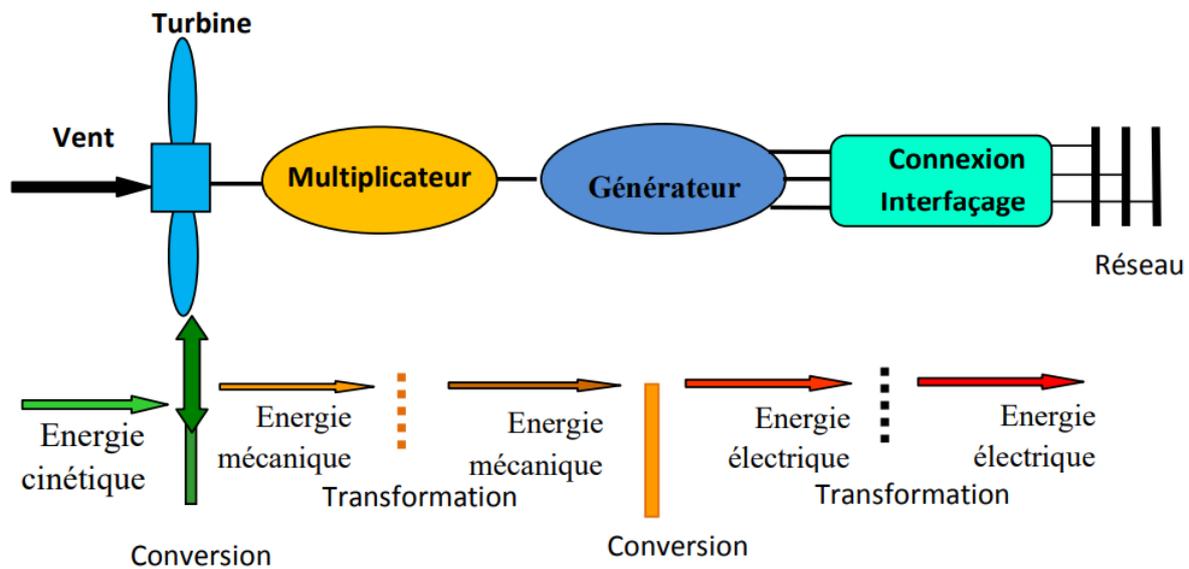


Figure I.2: Conversion de l'énergie éolienne [07]

#### I.2.4. 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 inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

##### ✓ a. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [08] :

- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat ;
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie ;
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

##### ☒ b. Inconvénients

- La nature stochastique du vent à une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau ;

- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés ;
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe ;
- Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue ;
- Les oiseaux : les éolienne, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par le mauvais temps ou la nuit [09].

### I.2.5. Différentes types d'éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles: celle à axe vertical et celles à axe horizontal. La figure I.3 montre les deux familles d'éoliennes:



a : éoliennes à axe vertical



b : éoliennes à axe horizontal.

**Figure I.3: éoliennes à axe vertical(a) et à axe horizontal(b) [07].**

#### I.2.5.1. Les éoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs [10]

**I.2.5.2. Les éoliennes à axe horizontal:**

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal.

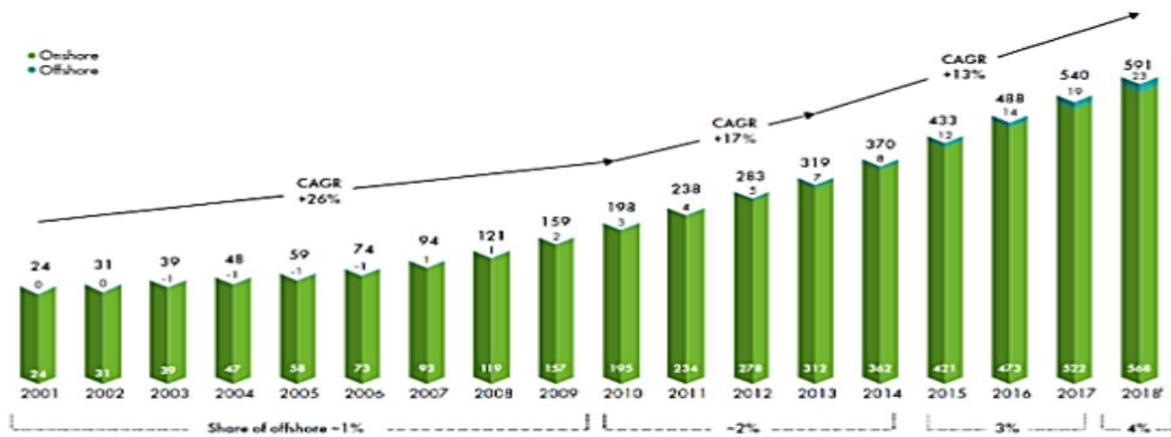
**I.2.6. Énergie éolienne en quelques chiffres :****I.2.6.1 Dans le monde :**

Partout dans le monde, la conjonction de l'instabilité des marchés des énergies fossiles et l'impératif de protection de l'environnement et de réduction des émissions de gaz à effet de serre imposent une révision des stratégies énergétiques. Les énergies renouvelables disposent d'atouts essentiels pour prendre la première place dans les bouquets énergétiques des pays [11].

L'énergie éolienne, productrice d'électricité, est la source d'énergie qui a le plus progressé dans le monde ces dernières années.

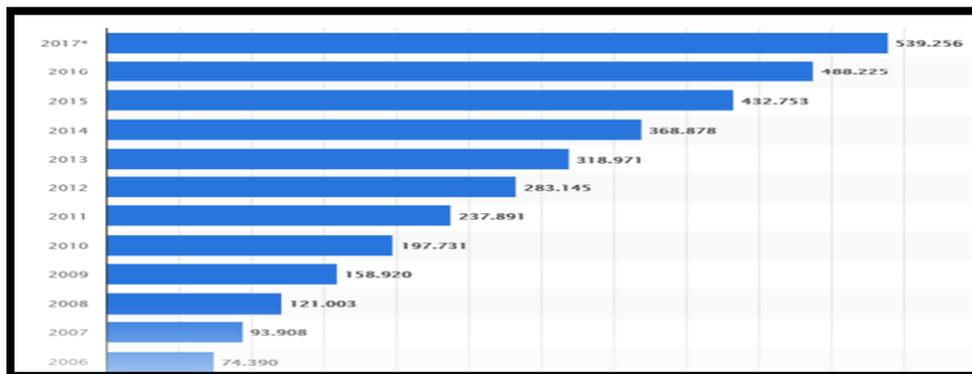
En 2017, la puissance totale installée en énergie éolienne dans le monde a augmenté de 51 GW pour atteindre un total de 539.2 GW à la fin de l'année, comme le démontre la (figure 2.1) [03]. En 2018, l'énergie éolienne a couvert plus de 8% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 591'000 MW. Comme il est montré sur la (figure.I.4) [11].

Selon les prévisions du Global Wind Energy Industry (GWEC), la capacité mondiale éolienne pourrait atteindre 817 GW en 2021, soit 51.6 % de plus qu'en 2017 [12].



**Figure I.4: Evolution de la puissance éolienne totale installée dans le monde 2001-2018, avec taux de croissance annuel composé en GW [11].**

Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien dans le monde, notamment dans les pays émergents tels que le Brésil, l'Inde ou encore le Mexique. Leaders mondiaux La Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde, l'Espagne et le Royaume-Uni sont les six pays qui dominent le marché mondial de l'éolien. La Chine est toujours le marché le plus important avec plus de 210'000 MW d'énergie éolienne. Les taux de croissance les plus élevés sont actuellement enregistrés dans la région d'Asie [11].

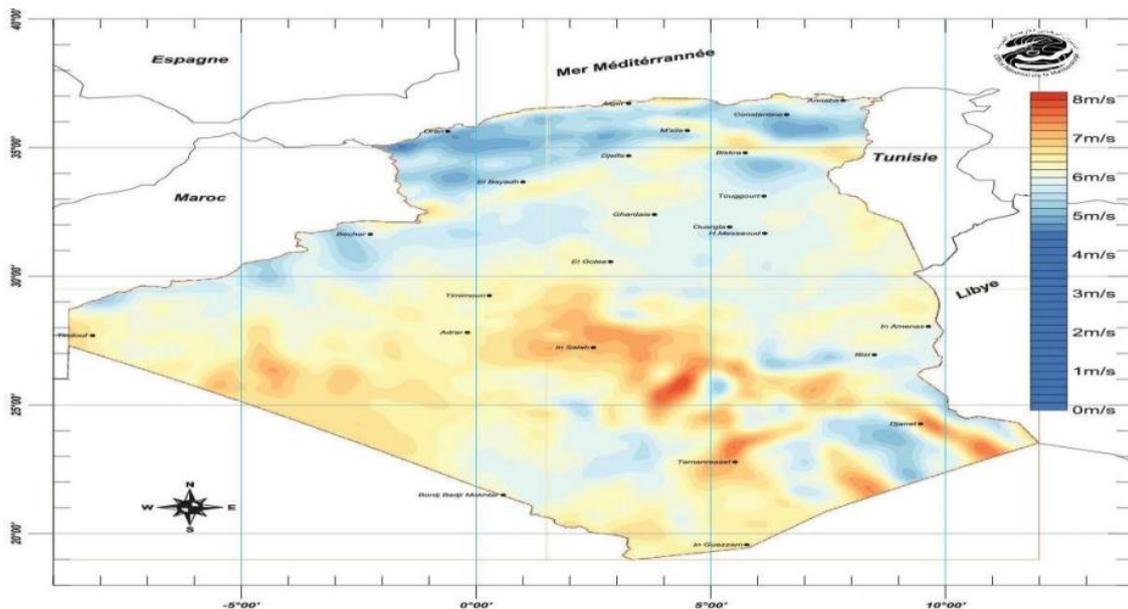


**Figure I.5 : Énergie éolienne globale installée dans le monde [13]**

### I.2.6.2. En Algérie :

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (IN AMGUEL) [14].

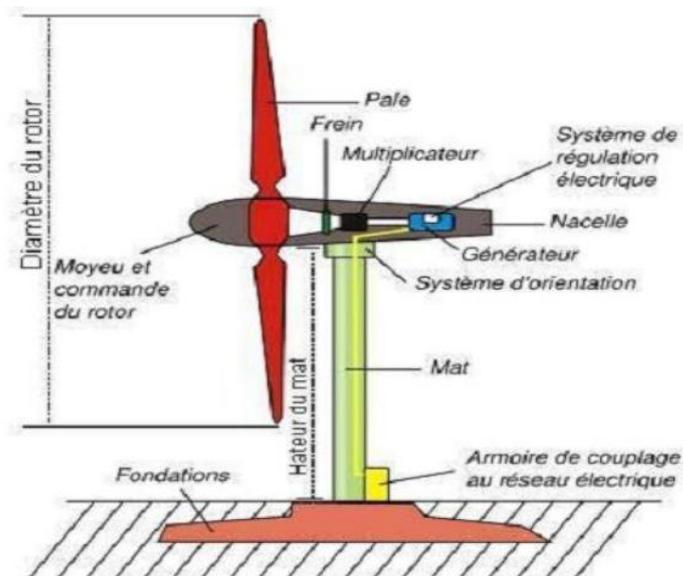
Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de TEBESSA, BISKRA, M'SILA et EL BAYADH (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s) [14]..



**Figure I. 6: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [14].**

### I.2.7.Principales composantes d'une éolienne:

Le système éolien est généralement constitué des éléments principaux Comme le montre dans la figure I.2 [07].



**Figure I.7: Eléments constituant une éolienne [07]**

### **I.2.7.1. Les pales:**

Sont un dispositif aérodynamique (surface portante) en matériaux composites à base de fibres de verre, de plastique ou de bois. Leur conception est le fruit d'études aérodynamiques diverses. Les pales sont fixées à un moyeu pour former le rotor. Elles sont destinées à tourner autour de l'axe du rotor dès la présence de vent suffisant [07] .

### **I.2.7.2. La nacelle :**

C'est l'enveloppe qui protège la boîte d'engrenages, le générateur et les autres composants contre l'action des éléments de dégradation. Elle renferme:

Un moyeu pourvu d'un système qui lui permet d'orienter les pales afin de réguler leur vitesse de rotation.

- Un rotor, qui transforme l'énergie cinétique reçue des pales en énergie mécanique de rotation.
- Des freins permettant d'arrêter les pales pour les cas de vitesses de vent très fortes qui pourraient endommager l'éolienne ou la rendre incontrôlable.
- Un multiplicateur, qui est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. Il permet de réduire le couple et/ou d'augmenter la vitesse de rotation.
- Un générateur assurant la production électrique en transformant l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il fonctionne comme un alternateur (produisant du

courant alternatif) ou une dynamo (produisant du courant continu). De nos jours, l'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

- Un système de régulation électrique servant à ralentir le rotor du générateur en cas de surrégime.
- Un système de refroidissement à huile, à eau ou à air, destiné au multiplicateur et au générateur [15].

### I.2.7.3. Le système d'orientation:

C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter les pales de l'éolienne face au vent (dans l'axe du vent) et de les verrouiller [07] .

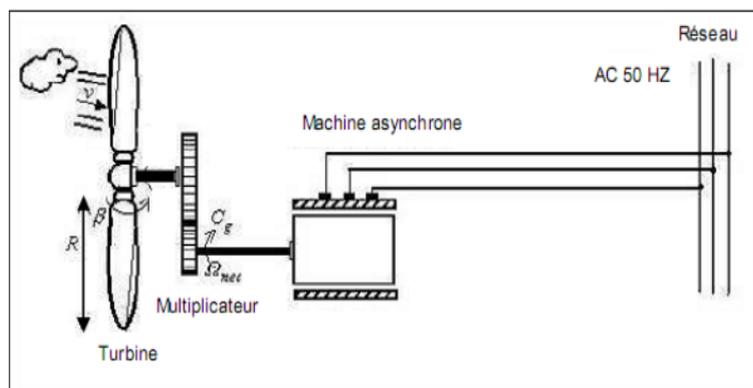
### I.2.7.4. Le mât (ou tour):

C'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante car plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le coût de la structure augmente aussi. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre du rotor [07]. .

## I.2.8. Différentes technologies des éoliennes:

### I.2.8.1. L'éolien à vitesse fixe:

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (Seules les génératrices asynchrones figure I.8 sont utilisées dans ce cas) [16].



**Figure I.8: Eolienne à vitesse fixe.**

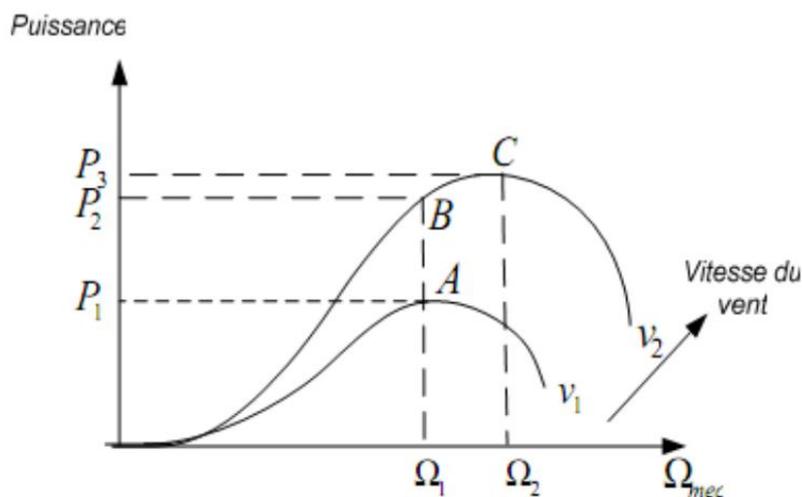
Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance

électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $\Omega_s = 1500$  tr/min, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [17].

### I.2.8.2. L'éolien à vitesse variable:

Dans cette cas, une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [16], [18]. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de la puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

Au niveau de la turbine, on donne sur la figure I.9 la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.



**Figure I.9: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [07] .**

Pour une vitesse de vent  $v_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on obtient une puissance nominale  $p_1$  (point A). Si la vitesse de vent passe de  $v_1$  à  $v_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $p_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette

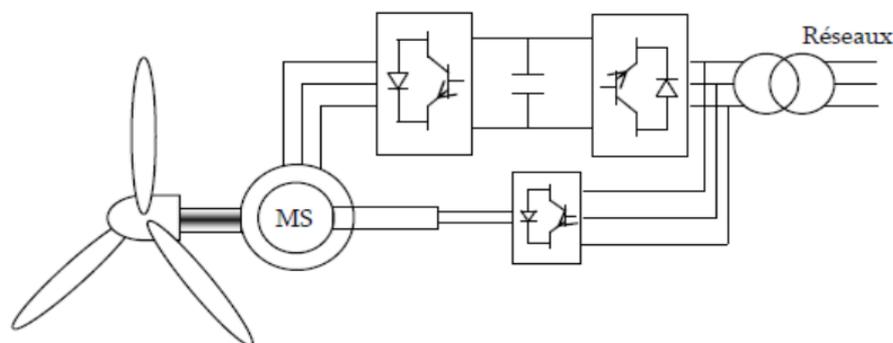
caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieur  $\Omega_2$ , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. Des systèmes éoliens à vitesse de rotation variable vont permettre d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine [19], [17].

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans les éoliennes de grandes puissances : la machine asynchrone à cage, la machine synchrone et la machine asynchrone à rotor bobiné [07].

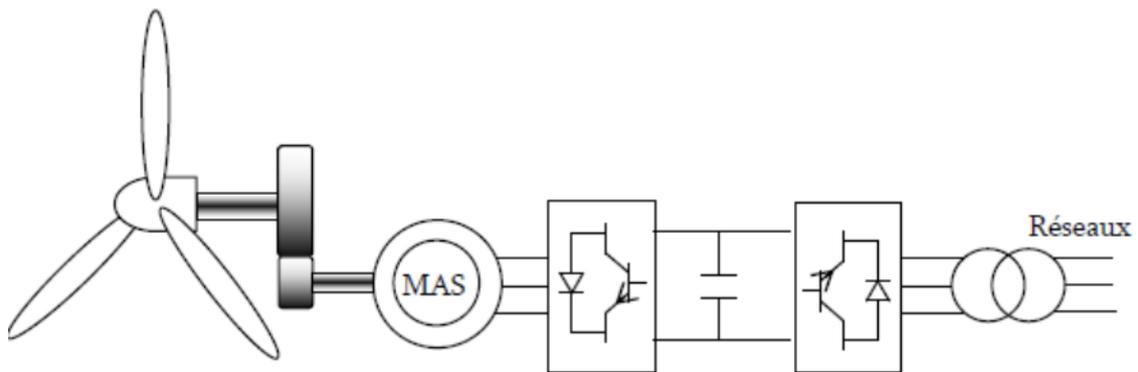
### I.2.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable:

#### I.2.9.1. Système utilisant une génératrice synchrone:

Le majeur inconvénient dans les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné est le rotor ou l'inducteur bobiné nécessite un système bagues lisses balais ou un système à diodes tournantes sans contact comme dans les alternateurs classiques de production pour amener le courant continu. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice figure I.10, permet de contrôler la puissance générée par celle ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent [20], [21].



**Figure I.10: Génératrice synchrone à vitesse variable avec convertisseurs MLI.**

**I.2.9.2. Système utilisant une génératrice asynchrone:****Figure I.11: Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable [07].**

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu [16].

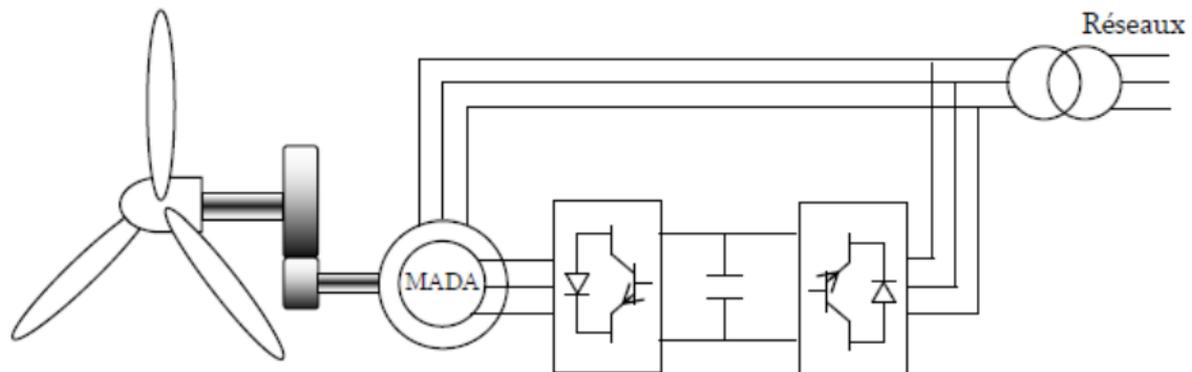
**I.2.9.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation(MADA):**

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. Cette configuration est étudiée à travers plusieurs travaux

En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du générateur, les pertes dans les semi conducteurs sont faibles [07].

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone:

le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [22].



**Figure I.12: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [07].**

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau voire (figure I.12), [ 21], [23].

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur coté machine, et transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En effet, si nous considérons que la MADA fonctionne à puissance nominale pour un fonctionnement en mode hyper-synchrone avec un glissement maximal égal à 30%, nous avons donc au maximum 25% de la puissance nominale de la machine transitant par les convertisseurs. Ceci permet de dimensionner les convertisseurs pour une puissance comprise entre 25 et 30% de la puissance nominale de la machine [24].

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance [07].

### I.3.types de commande d'un système éolien :

**I.3.1. La commande en vitesse :** Comme l'objectif de la technique MPPT est atteindre un fonctionnement assurant une puissance maximale, il est possible d'imposer à la génératrice synchrone de fonctionner à une vitesse de référence qui poursuit le point de puissance maximale sur la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne. Le calcul de cette vitesse est possible à partir de la valeur de la puissance optimale donnée par :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_{p\max} \quad (\text{I.1})$$

$C_{p\max}$  correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance.

En reprenant l'équation (I.2), on peut écrire la vitesse de référence de la turbine ainsi:

$$\Omega_{\text{turbine-ref}} = \frac{\lambda_{op} V}{R} \quad (\text{I.2})$$

Où  $\lambda_{op}$  est la vitesse réduite spécifique qui correspond au point  $C_{p\max}$  sur la courbe

Caractéristique de la voilure de l'éolienne.

En remplaçant la vitesse du vent à partir de l'équation (I.2) dans l'équation (I.1), la puissance maximale extractible du vent peut s'écrire sous la forme :

$$P_{\max} = K \Omega_{\text{turbine-ref}}^3 \quad (\text{I.3})$$

$$K = \frac{0.5 \pi \rho C_{p\max} R^5}{\lambda_{op}^3} \quad (\text{I.4})$$

En multipliant la vitesse de la turbine de référence par le gain du multiplicateur, la vitesse de la turbine de référence devient :

$$\Omega_{\text{ref}} = G \cdot \Omega_{\text{turbine-ref}} \quad (\text{I.5})$$

Cette méthode de contrôle illustrée par la figure 3.4 régule la vitesse de rotation du générateur afin de maintenir la vitesse spécifique à une valeur optimale à laquelle la puissance capturée est maximale. Elle nécessite à la fois la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine, en plus de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure de la turbine.

Cette méthode n'est pas très favorable, vu la nécessité de deux mesures pour commander l'éolienne. Une mesure erronée de la vitesse du vent par l'anémomètre peut conduire à une dégradation de la puissance captée selon cette technique [25].

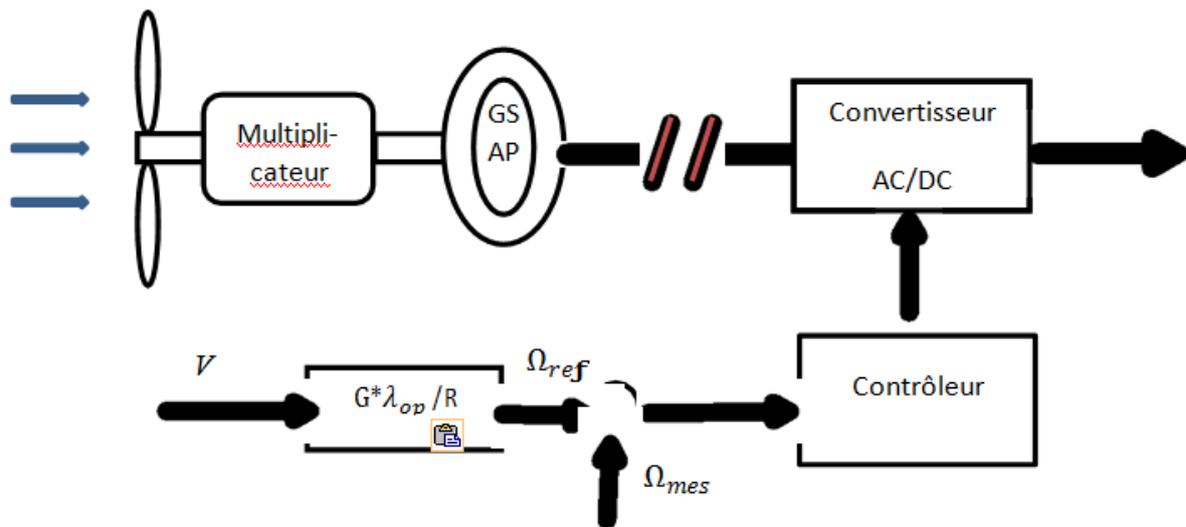


Figure.I.13: Schéma synoptique d'une commande MPPT en vitesse.

### I.3.2. Commande en couple

Comme pour la commande en vitesse, nous utiliserons la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure éolienne pour la commander en couple. Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [26]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_f \quad (I.6)$$

En négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_f = 0$ ) et en considérant que le couple dynamique développé étant nul en régime permanent, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (I.7)$$

En reprenant les équations (I.3),( I.7),( I.8) et (I.9) et en les regroupant, on peut écrire le couple électromagnétique de la GSAP sous cette forme :

$$C_{em} = \frac{C_p \rho \pi R_t^5}{\lambda^3} \frac{1}{2} \frac{1}{G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (I.8)$$

Afin d'imposer à la GSAP de fonctionner à un couple optimal, il est remarquable à partir de l'équation (I.8) qu'il faut maintenir la valeur du couple au point de fonctionnement correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{p-max}$  pour la valeur optimale de la vitesse réduite spécifique  $\lambda_{op}$ .

Le couple électromagnétique de référence à imposer s'écrira comme suit :

$$\text{avec} \quad C_{em-ref} = K_{op} \Omega_{mec}^2 \quad (I.9)$$

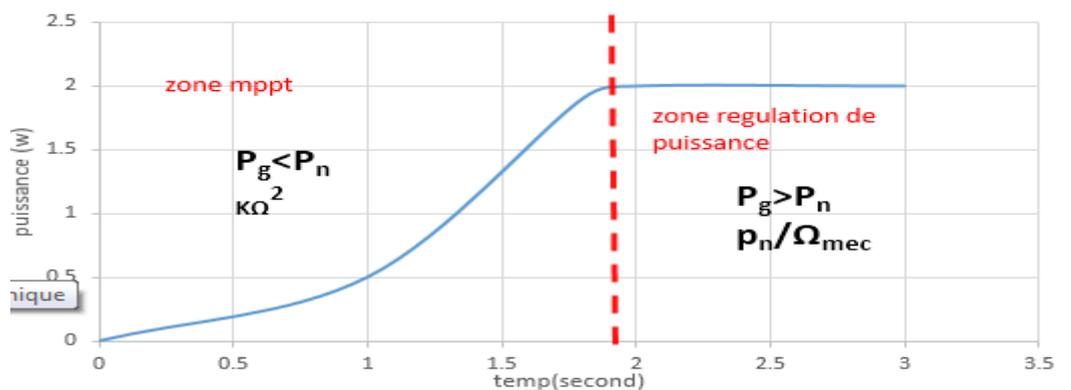
$$K_{op} = \frac{C_{p-max} \rho \pi R_t^5}{\lambda_{op}^3} \frac{1}{2} \frac{1}{G^3} \quad (I.10)$$

Cette loi de commande, en plus de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne, ne nécessite qu'une seule grandeur à mesurer ou à estimer : la vitesse mécanique du générateur synchrone à aimants permanents  $\Omega_{mec}$ . Toutefois cette loi de commande ne peut être appliquée que pour le fonctionnement en Zone II. Si la puissance capturée dépasse la puissance nominale de l'éolienne  $P_g$  (Zone III), il faut concevoir une seconde loi de commande qui limiterait la puissance de l'éolienne à sa valeur nominale. Le couple électromagnétique de référence s'écrira alors :

$$C_{em-ref} = P_n / \Omega_{mec} \quad (I.11)$$

Avec  $P_n$  la puissance nominale de la génératrice synchrone (2 kW pour notre cas)

La stratégie de commande à puissance de référence désirée est illustrée par le tableau suivant:



**Figure.I.14.Allure des zones de commande**

Alors qu'en Mode I, le couple électromagnétique de référence permet un fonctionnement en mode MPPT dans la zone II de fonctionnement de la turbine éolienne, Le Mode II est actionné quand la turbine bascule en Zone III permettant à la GSAP de fonctionner à sa puissance nominale.

#### **I.4. Conclusion:**

Dans ce chapitre, on a mis le point sur les systèmes éoliens, leurs définitions, ses avantages et ses inconvénients et leur principe de fonctionnement ainsi que différents types d'éoliennes et finalement, les stratégies de commande dédiées aux éoliennes

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation.

*Chapitre II*  
**modélisation mathématique  
du système éolien**

## II.1.Introduction :

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

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande) [26].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation mathématique du système éolien.

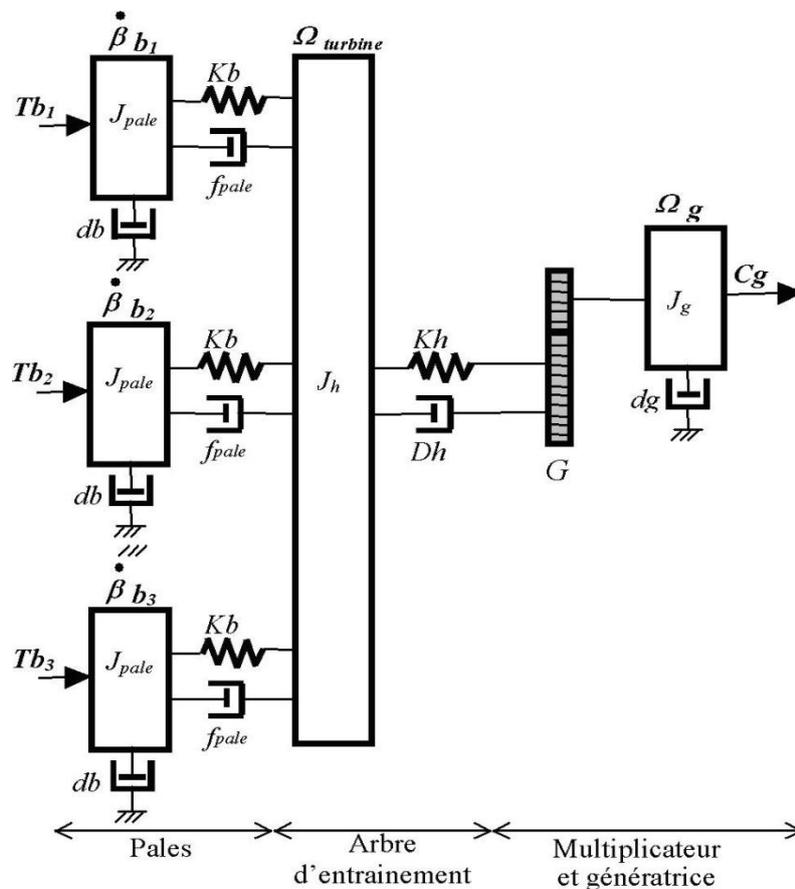
Dans un premier temps, en détaillant la modélisation de la turbine ensuite la modélisation de la GSAP (génératrice synchrone à aimant permanent)

La dernière partie de ce chapitre sera concentré sur la modélisation de convertisseur AC/DC.

## II.2. Modélisation d'une turbine éolienne

### II.2.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est reliée à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure II.1).



**Figure II.1 : Système mécanique de l'éolienne**

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie  $J_{pale}$
- la même élasticité  $Kb$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$ . Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [27].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

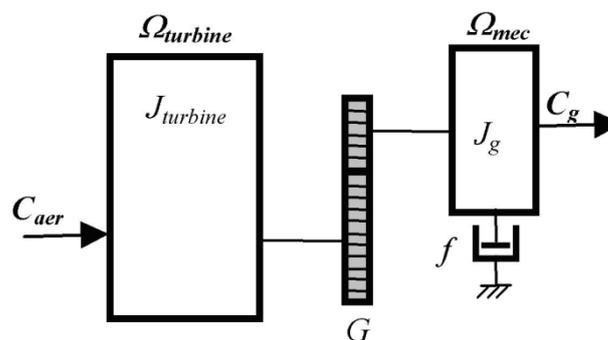
- son inertie  $J_h$
- son élasticité  $Kh$
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $Dh$

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie  $J_g$
- un coefficient de frottement  $dg$

Le rotor donne un couple ( $C_g$ ) à la génératrice électrique et  $\Omega_{mec}$  vitesse de rotation de génératrice.

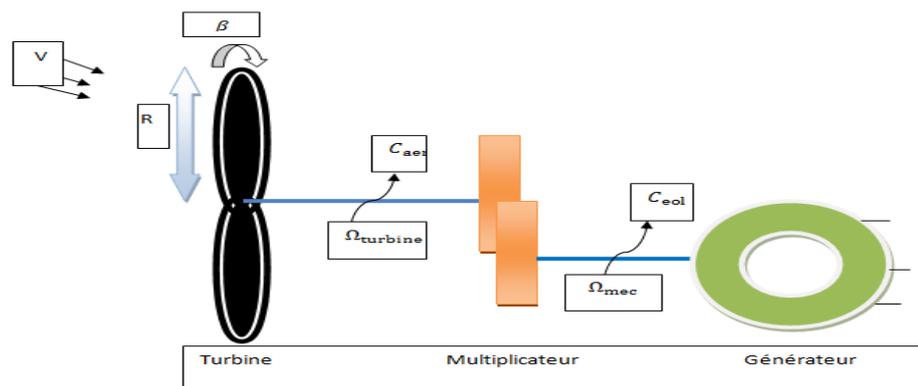
On considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales est égalité de toutes les forces de poussée ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ) l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure II.2) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [28]



**FIG. II.2 – Modèle mécanique simplifié de la turbine**

### II .2.2. Modélisation de la turbine :

on étudie ici turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (FIGII.3).



**FIG. II.3 – Schéma de la turbine éolienne**

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [29] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.1})$$

ou

- $\rho$  est la densité de l'air (approx.  $1.22 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ \text{C}$ ).
- $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- $v$  est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

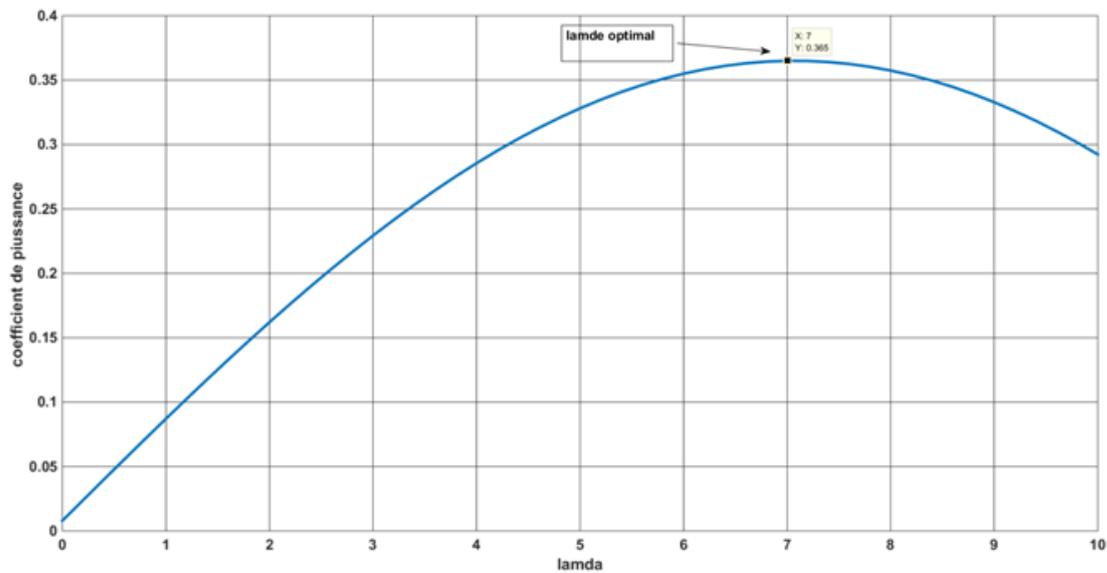
$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [29,30]. La figure (II.4) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (\text{II.3})$$

Où  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.



**FIG. II.4 – Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ )**

A partir de relèves réalisées sur une éolienne de 2 KW, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [31] :

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.4})$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.5})$$

### II.2.3. Modèle du multiplicateur:

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice

(FIG II.3).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.6})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.7})$$

### II.2.4. Equation dynamique de l'arbre :

l'inertie  $J_{\text{turbine}}$  est rapport de la masse de la turbine éolienne et des pales du rotor sur leur arbre. Le modèle mécanique propre à l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée par le multiplicateur du rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.8})$$

L'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2000W, une pale a une longueur de 2.3667m [32]. L'équation dynamique permet de déterminer l'évolution de la couple mécanique total ( $C_{\text{mec}}$ ) à partir de la vitesse mécanique appliquée au rotor :

$$C_{\text{mec}} = J \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{\text{em}}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{\text{vis}}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$

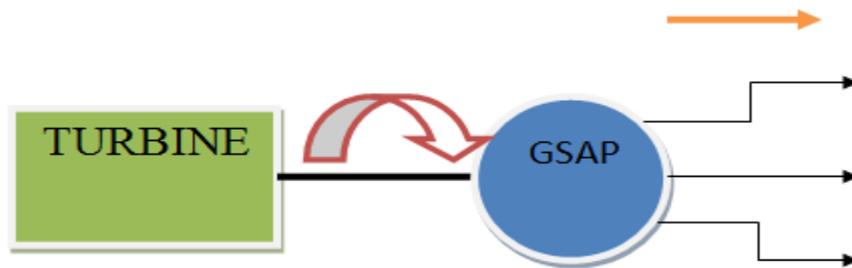
$$C_{\text{mec}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{II.10})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{\text{vis}} = f \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II.11})$$

### II.3. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent :

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (GSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. [33]



**FIG II.5 : Schéma représentatif de la GSAP**

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique et traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce cela permet d'étudier au manière dynamique , statique et d'utiliser ce modèle dans les simulations.

[ 34]

### **II.3.1.Hypothèses simplificatrices :**

Le modèle mathématique de la machine synchrone électrique obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L' effet d' encochage est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.[35]

### **II.3.2.Équations électriques de la GSAP :**

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_a \\ \mathbf{v}_b \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix} = [-\mathbf{R}_s] \begin{bmatrix} \mathbf{i}_a \\ \mathbf{i}_b \\ \mathbf{i}_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II -12})$$

$[\mathbf{v}_a \ \mathbf{v}_b \ \mathbf{v}_c]^t$  : tension de phases statoriques.

$[\mathbf{i}_a \ \mathbf{i}_b \ \mathbf{i}_c]^t$  : Vecteur courant de phases statoriques.

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^t$  : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$R_s$  : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

### II.3.3. Passage au repère de Park :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on a change le repère (3axe → 2axe). Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor (FIG II.8).

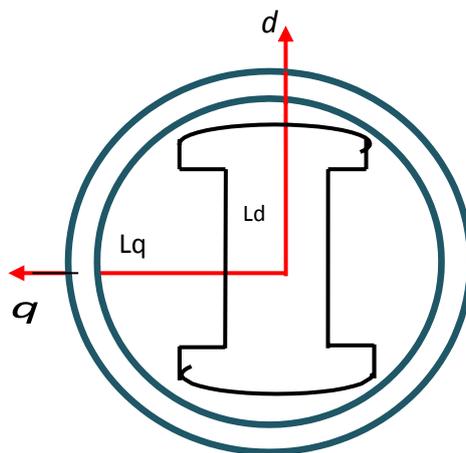
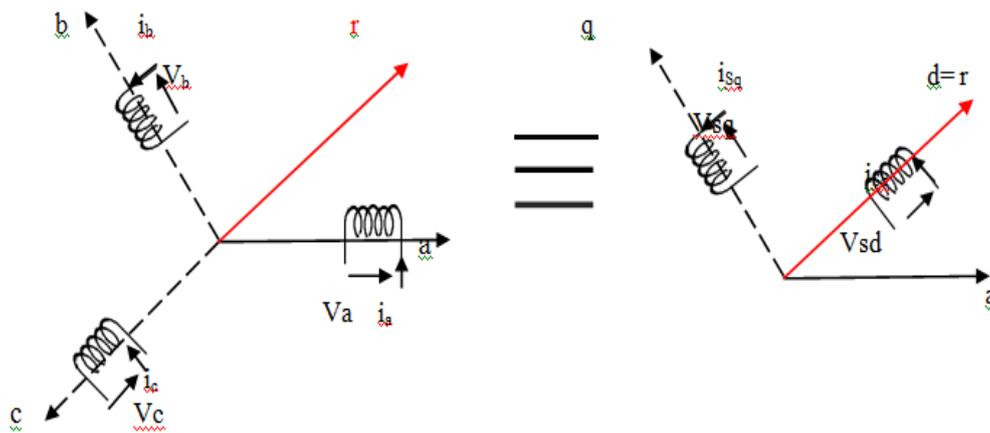


FIG II.6 : Représentation de la GSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine[35].



**FIG II.7: Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park**

A l'aide de transformation de Park on passe de grandeurs réelle ( $v_a, v_b, v_c$ ) et ( $i_a, i_b, i_c$ ) leurs composantes ( $v_0, v_b, v_c$ ) et ( $i_0, i_b, i_c$ )

La matrice de Park s'exprime par :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II -13})$$

La transformation inverse de Park et donne par :

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (\text{II -14})$$

### II.3.4. Equations magnétiques:

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\psi_d$  et  $\psi_q$  sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II -15})$$

$L_d$  et  $L_q$  sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de  $\theta$ .

$\psi_f$  représente le flux des aimants.

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park (FIG II.10), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents peut s'écrire comme suit:

$$\begin{cases} v_d = -R_S I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ v_q = -R_S I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{II -16})$$

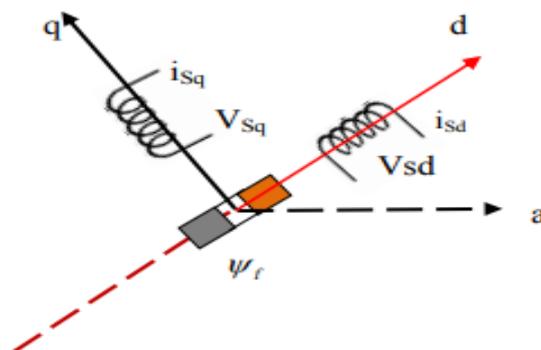


FIG II.8: Modèle de PARK pour la GSAP

### II.3.5. Expression du couple électromagnétique:

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [35] :

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dw_e}{d\theta_e} \quad (\text{II -17})$$

$w_e$  : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$  : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II -18})$$

En remplaçant  $V_d$ ,  $V_q$  par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s(i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)] \quad (\text{II -19})$$

$\frac{3}{2} [-R_s(i_d^2 - i_q^2)]$  : Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator [35].

$\frac{3}{2} (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt})$  : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [35].

$\frac{3}{2} [\frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)]$  : Représente la puissance électromagnétique. Sachant que :

$$P\Omega = w \text{ et } P_{em} = C_{em}\Omega \quad (\text{II -20})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (\text{II -21})$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [35]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \Psi_f] \quad (\text{II -22})$$

### II.3.6 .Equations mécaniques:

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II -23})$$

Avec :

$C_m$  : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f\Omega$  : Le couple de frottement.

$J$  : Moment d'inertie total de la machine.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

#### II.4. Modélisation du convertisseur CA/CC:

On considère un fonctionnement idéalisé caractérisé par [36] :

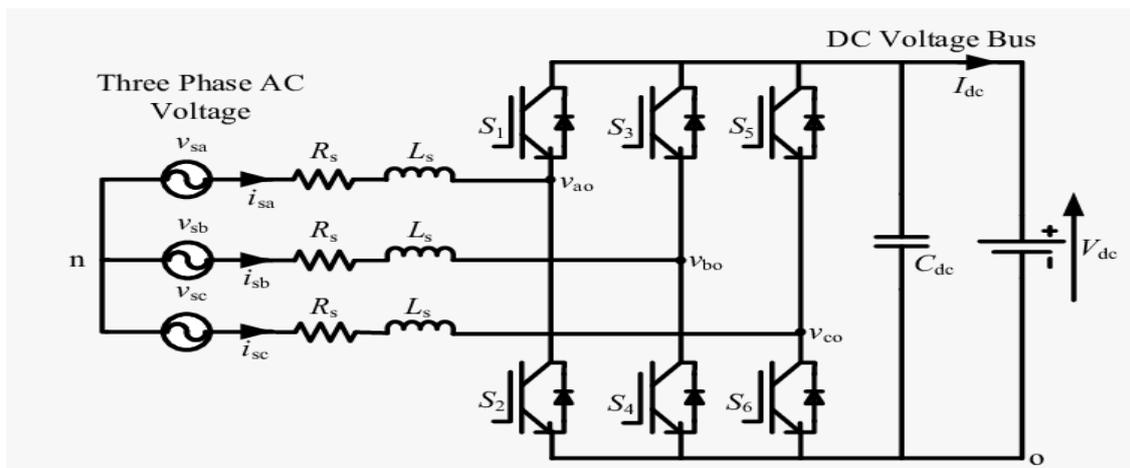
- des interrupteurs parfaits : la commutation des interrupteurs (IGBT) est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes.
- des sources parfaites : la tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

L'objectif de la modélisation est redresse le courant alternatives vers courants continus .

Comme le montre la FIG II.09, le convertisseur délivre, en sortie, deux niveaux de tensions,  $-V_{dc}/2$  et  $+V_{dc}/2$

en fonction des états des interrupteurs. En se basant sur le principe de commutation de l'IGBT, on définit la fonction de commutation de phase  $s_k$  ( $k = a, b, c$ ). Sachant que deux interrupteurs dans le même bras ne peuvent être fermés ou ouverts en même temps, on peut écrire la définition suivante [36] :

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{IGBT plus haut est fermé} \\ 0 & \text{IGBT plus haut est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$



**FIG II.9 : Schéma équivalent d'un convertisseur triphasé**

Après avoir appliqué la loi de Kirchhoff au circuit, l'équation de maille en sortie de l'onduleur peut être écrite comme suit :

$$L_f^{abc} \frac{di_g^{abc}}{dt} = V^{abc} - R_f^{abc} i_g^{abc} - v_0^{abc} \quad (\text{II.25})$$

Avec  $V^{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ ,  $i_g^{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ ,  $v_0^{abc} = [V_{a0} V_{b0} V_{c0}]^T$

$$R_f^{abc} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix}, \quad L_f^{abc} = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix}.$$

Où  $v_0^{abc}$  sont les tensions du côté convertisseur au point 0 de puissance, qui peuvent être obtenues en utilisant l'équation suivante :

$$v_0^{abc} = v_N^{abc} + v_{N0} \quad (\text{II.26})$$

Or, l'expression de la tension entre le point 0 et le neutre est donnée comme suit :

$$v_{N0} = \frac{1}{3} \sum_K v_{KN} \quad (\text{II.27})$$

Dans un bras, lorsque l'IGBT supérieur est activé et l'IGBT du bas est désactivé, l'état de l'interrupteur correspond à  $S_{k=1}$ ,  $v_{aN} = V_{dc}$ . Dans le cas contraire, lorsque l'IGBT

supérieur est éteint et l'IGBT inférieur est activé, l'état de l'interrupteur devient:

$\mathbf{S}_k = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{v}_{aN} = \mathbf{0}$ . Par conséquent, on peut écrire

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{s}_a \mathbf{V}_{dc} \quad (\text{II.28})$$

alors que les tensions peuvent être réécrites comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{kN} = \mathbf{S}_k \mathbf{V}_{dc} \\ \mathbf{v}_{N0} = \sum_k \mathbf{S}_k \mathbf{V}_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Si on remplace les termes des équations (II.29) et (II.26) dans l'équation (II.25), on obtient

$$\mathbf{L}_f^{abc} \frac{d\mathbf{i}_g^{abc}}{dt} = \mathbf{V}^{abc} - \mathbf{R}_f^{abc} \mathbf{i}_g^{abc} - \mathbf{V}_{dc} (\mathbf{S}_k - \frac{1}{3} \sum_k \mathbf{S}_k) \quad (\text{II.30})$$

La relation entre la puissance côté continue et la puissance côté alternative peut être écrite comme suit :

$$\sum_k \mathbf{i}_{kg} \mathbf{v}_{kN} = \mathbf{i}_{dc} \mathbf{V}_{dc} \quad (\text{II.31})$$

En combinant les deux équations (II.29) et (II.31), on obtient l'expression du courant de lien CC :

$$\mathbf{i}_{dc} = \mathbf{i}_c + \mathbf{i}_L = \sum_k \mathbf{S}_k \mathbf{i}_{kg} - \mathbf{i}_L \quad (\text{II.32})$$

L'équation (II.32) peut être écrite sous la forme

$$\mathbf{C}_{dc} \frac{d\mathbf{V}_{dc}}{dt} = \sum_k \mathbf{S}_k \mathbf{i}_{kg} - \frac{\mathbf{V}_{dc}}{R_L} \quad (\text{II.33})$$

La détermination de l'inductance de lissage est basée sur la valeur moyenne instantanée de la tension aux bornes de l'inductance. Pour une tension de lien CC ( $\mathbf{V}_{dc}$ ) donnée et une tension phase-neutre  $\mathbf{V}_{an}$  efficace du réseau  $\mathbf{V}_{an}$ , l'inductance peut être calculée selon la relation suivante [37] :

$$\mathbf{L}_f = \frac{0.5 m_d \mathbf{V}_{dc} - \sqrt{2} \mathbf{V}_{an}}{F_Z \Delta I} \quad (\text{II.34})$$

où  $F_z$  est la fréquence d'échantillonnage et  $m_d$  est l'indice de modulation de la MLI. Par ailleurs, la valeur minimale de la capacité du lien CC peut être exprimée par l'équation suivante [38] :

$$C_{dc\_min} = \frac{\sqrt{2}I + \frac{P_r}{V_{dc}}}{2F_z \Delta V_{dc}} \quad (\text{II.35})$$

### II.5. Modèle de bus continu:

Le convertisseur AC/DC est associé généralement à un bus continu formé par une capacité (C) comme indique ce schéma l'équation associant le courant à la tension est comme suit :

$$I_C = C \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$I_C = I_{and} - I_{ch} \quad (\text{II.37})$$

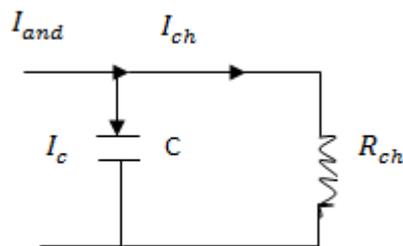


FIG II.10. Modèle de bus continu

### II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la modélisation mathématique du système éolien. Dans le chapitre suivant, nous allons faire une approche de la commande.

# *Chapitre III : Approche de commande*

**III.1. Introduction :**

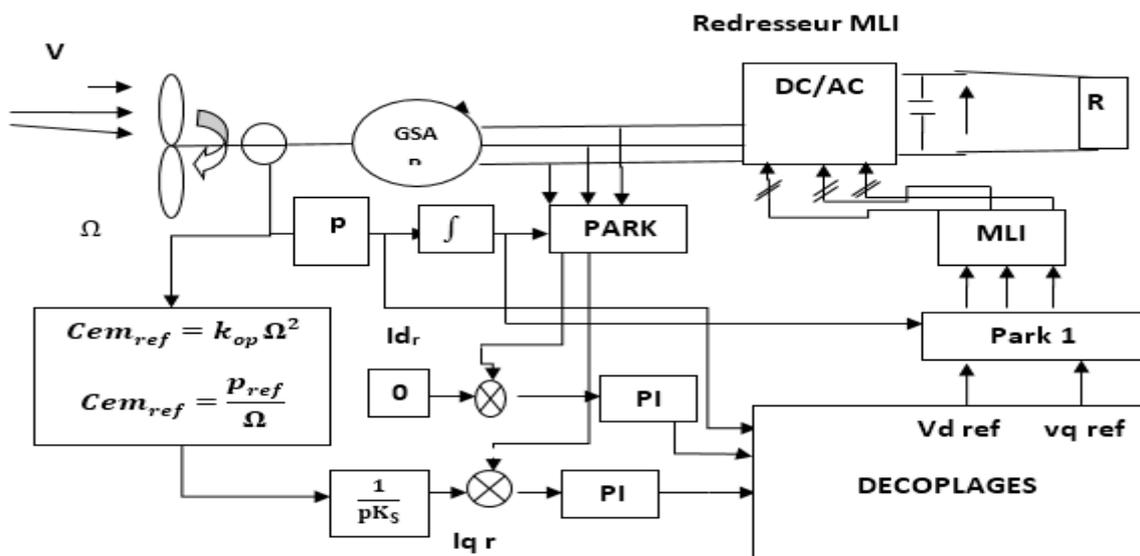
Dans ce chapitre nous proposons une commande du système éolien basé sur le contrôle vectoriel du générateur synchrone alimenté en tension et commandé en courant . Plusieurs systèmes physiques nécessitent, par nature, l’emploi de termes discontinus dans leurs dynamiques. C’est le cas par exemple de systèmes mécaniques avec frottements. Le pivot de cette nouvelle approche était la théorie des équations différentielles à seconds membres discontinus [39]. Donc, on doit faire appel à des lois de commande insensible aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. La commande par mode de glissement est un cas particulier de fonctionnement des systèmes à structure variable qui sera présentée par la suite

**III.2. Commande MPPT en couple du system éolienne:**

Pour maximiser le puissance aérodynamique, il faut garder le coefficient de puissance à sa valeur maximale ( $c_p$ ) max pour ce faire la consigne du courant(  $I_{qref}$  )que contrôle le couple de la GSAP doit prendre la valeur suivante en de depuis de la variation de vitesse de vent comme suit :

$$I_{qref} = k_{op} \Omega \tag{III.1}$$

$$I_{dref} = 0$$



**FIG III.1: modélisation de système éolienne command en couple**

### III.3. Commande vectorielle de la GSAP par régulateur PI

#### III.3.1. Principe de la commande vectorielle

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [40,41].

L'équation (III.16), donnant le couple, montre que celui-ci dépend de deux variables,  $i_d$ ,  $i_q$ , un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [42,43].

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (\text{III.2})$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante  $i_d$  nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant.

On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \psi_f i_q \quad (\text{III.3})$$

Comme le flux  $\psi_f$  est constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$ .

Donc :

$$C_{em} = k_t i_q \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2} P \psi_f \quad (\text{III.5})$$

### III.3.2. Découplage :

Le modèle de la génératrice synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants  $i_d, i_q$  ne sont pas indépendants l'un de l'autre.

Ils sont reliés par des termes non linéaires et  $L_q \omega i_q, L_d \omega i_d$ .

$$\begin{cases} V_d = \left( L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \right) - L_q \omega i_q \\ V_q = \left( L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \right) + \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

#### III.3.2.1. Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande  $e_d, e_q$  telle que [44]:

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Et :

$$\begin{cases} e_d = L_q \omega i_q \\ e_q = \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

On a donc les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont découplés. Le courant  $i_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$  et  $i_q$  ne dépend que  $V_{q1}$ , à partir de l'équation (III.8) les courants  $i_d$  et  $i_q$  s'écrivent de la façon suivante

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + p_1 L_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + p_1 L_q} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre. Les éléments fondamentaux pour la réalisation des régulateurs sont les actions PID (proportionnelle, intégrale, dérivée). L'action intégrale a pour effet de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée. L'action proportionnelle permet le réglage de la rapidité du système. Le système présente donc pour

On retrouve la même boucle de régulation pour le courant  $I_q$

La fonction de transfert en boucle ouverte  $F_{bo}(S)$  est :

$$F_{bo}(S) = \left( K_p + \frac{K_i}{S} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_s + S \cdot L_d} \right) \quad (\text{III.11})$$

Composons le pôle  $L_d/R_s$  part  $K_p/K_i$  qui se traduit par la condition

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{III.12})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant:

$$F_{bo}(S) = \frac{K_i}{S \cdot R_s} \quad (\text{III.13})$$

En boucle fermée, nous obtenons un système de types 1ere ordre avec une constante de temps :

$$\tau_{bf} = \frac{R_s}{K_i} \quad (\text{III.14})$$

$$F_{bf}(S) = \frac{1}{\frac{R_s}{K_i} S + 1} \quad (\text{III.15})$$

L'action intégrale du PI est obtenue comme suite:

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_{bf}} \quad (\text{III.16})$$

Si l'on choisit le  $T_r \tau_{rep} = 3 \cdot \tau_{bf}$ , on a:

$$\begin{cases} K_p = \frac{3 \cdot L_d}{\tau_{rep}} \\ K_i = \frac{3 \cdot R_s}{\tau_{rep}} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

### III.4. Commande vectorielle de la MSAP par régulateur glissant (CMG)

#### III.4.1. Systèmes à Structures Variables:

Dans Les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est une surface (hyperplan). avec la loi de commutation, elle est rester au voisinage au surface [45].

La trajectoire compose aux trois parties distinctes :

✓ **Mode de convergence (MC)**

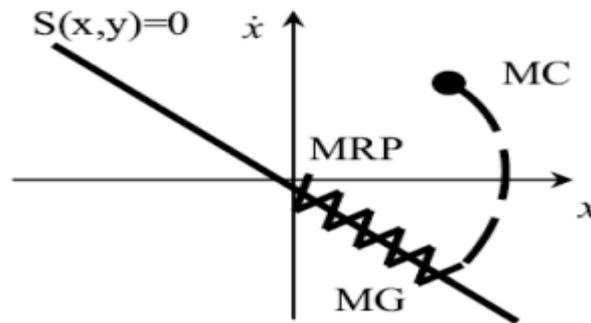
la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et écarteler vers la surface de Commutation  $s(x,y)=0$ . Les caractéristiques de ce mode c est critère de convergence et loi de commande.

✓ **Mode de glissement (MG)**

Quelque soit la variable d'état a atteint la surface de Glissement et écarteler vers l'origine du plan de phase. Le caractéristique dynamique de ce mode concernent par le choix de la surface de glissement  $S(x,y)=0$

✓ **Mode de régime permanent (MRP)**

On utilise cette mode pour l'étude de la réponse du système autour du point d'équilibre (origine du plan de phase), nous exploitons spécialement pour l'étude des systèmes non Linéaires sa caractéristique est la qualité et les performances de la commande. [46,47]. La figure (III.2) représente les différentes modes pour la trajectoire dans le plans de phase :



**FIG III.2: différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase**

### III.4.1.1 Conception de la commande par mode glissant [48]

ce contrôleur compose deux parties: une partie discontinue exprimer la dynamique du système dans le mode de convergence pour la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle et une partie continue représentant la dynamique du système dans le mode glissant. La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes

- L'établissement des conditions d'existence
- Choix de la surface
- Détermination de la loi de commande

#### III.4.1.1.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire de ces surfaces et leur forme. Par rapport de l'application et de l'objectif visé. L'équation d'état d'un système généralement donne :

$$[\dot{\mathbf{x}}] = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{x}] + [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{u}] \quad (\text{III.18})$$

Où  $[\mathbf{x}] \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $[\mathbf{u}] \in \mathbb{R}^m$  vecteur de commande, avec  $n > m$ . J. J. Slotine propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$S(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (\text{III.19})$$

$$e(t) = X_{ref}(t) - X(t) \quad (\text{III.20})$$

$\lambda$ : Est une constante positive

$n$ : Est un degré relative, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande

$S(x)=0$  : est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x)$  pour un choix correct du  $\lambda$  gain et c'est l'objectif de la commande.

#### III.4.1.1.2 L'établissement des conditions d'existence

Les conditions d'existence et de convergence permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et pas lie à la perturbation

La fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ( $V(x)>0$ ) pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction ( $\dot{V}(x)<0$ )

L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  de type énergétique qui admet une dérivée temporelle négative.

Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{III. 21})$$

La dérivée de cette fonction :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (\text{III.22})$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative [39,05]

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.23})$$

#### III.4.1.1.3 Synthèse de la loi de commande par mode glissant [42]:

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte ( $u_{eq}$ ) et l'autre la stabilité ( $u_n$ )

$$u(t) = u_{eq} + u_n \quad (\text{III.24})$$

La commande discrète  $u_n$ , est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système. Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (III.18). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande ( $u$ ).

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.25})$$

En remplaçant (III.18) et (III.22) dans (III.25), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} \{ [A] \cdot [x] + [B] \cdot u_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial x} [B] \cdot u_n \quad (\text{III.26})$$

Durant le mode de glissement en régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente

$$u_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} [A] [x] \right\} \quad (\text{III.27})$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} [B] u_n \quad (\text{III.28})$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.26), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$S(x) = \frac{\partial S}{\partial x} [B] u_n < 0 \quad (\text{III.29})$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de  $u$ , doit être opposé à celui de  $S(x) = \frac{\partial S}{\partial x} [B]$ . La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction «signe».

$$u_n = K_x \text{sign}(S(x)) \quad (\text{III.30})$$

Le signe de  $k_x$  doit être différent de celui de  $\frac{\partial S}{\partial x} [B]$

Cependant, cette dernière génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement (chattering), qui est indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes à hautes fréquences. Pour remédier au problème du phénomène de broutement, la fonction «sign» est remplacée par une fonction «disse» [49], continue définie au voisinage des limites des surfaces de glissement.

$$\text{liss} = \tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{S(x)}{|S(x)| + \xi} \quad (\text{III.31})$$

### III.4.2. Application de la commande par mode glissant à la GSAP [50, 51, 52]

Après avoir présenté la théorie de la commande par mode glissant, nous allons analyser dans cette partie le comportement du système commandé par mode glissant. On reprend le modèle du moteur synchrone à aimants permanents s'exprime sous la forme

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d - \frac{L_q}{L_d} p\Omega I_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \dot{I}_q = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d}{L_q} p\Omega I_d - \frac{p\psi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Synthèse de la commande par mode glissant:

On prend les surfaces suivantes :

$$\begin{aligned} S(I_d) &= I_{\text{ref}} - I_d \\ S(I_q) &= I_{\text{ref}} - I_q \end{aligned} \quad (\text{III.33})$$

Le contrôle du courant  $I_q$  est définie par:

$$I_{q\text{ref}} = I_q^{\text{ed}} + I_q^n \quad (\text{III.34})$$

#### III.4.2.1 Pour la commande du composant direct de courant statorique

L'erreur de courant  $I_d$  est définie par :

$$\dot{S}(I_d) = \dot{I}_{d\text{ref}} - \dot{I}_d \quad (\text{III.35})$$

D'après la dérivée de la surface du courant  $I_d$ , on peut générer la tension sur l'axe d,

$$S(\dot{I}_d) = I_{d\text{ref}} + \frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} p\Omega I_q - \frac{1}{L_d} u_d \quad (\text{III.36})$$

La tension de commande  $u_{d\text{ref}}$  est définie par :

$$u_{d\text{ref}} = u_d^{\text{eq}} - u_d^n \quad (\text{III.37})$$

$$u_d^{\text{eq}} \rightarrow \dot{S}(I_d) = 0$$

$$u_d^{eq} = \left( \dot{I}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} p\Omega I_q \right) L_d \quad (\text{III.38})$$

$$u_d^n = K_d \text{sign}(s(I_d)) \quad (\text{III.39})$$

$K_d$ : constant positive

Dans notre travail On prend:

$$K_d = 200$$

### III.4.2.2 Pour la commande de la composante en quadratique du courant statorique

L'erreur de courant  $I_q$  est définie par :

$$\dot{S}(I_q) = \dot{I}_{qref} - \dot{I}_q \quad (\text{III.40})$$

D'après la dérivée de la surface du courant  $I_q$ , on peut exprimer la tension du contrôle sur l'axe q . La tension de commande  $u_{qref}$  est définie par :

$$u_{qref} = u_q^{eq} - u_q^n \quad (\text{III.41})$$

$$u_q^{eq} \rightarrow \dot{S}(I_d) = 0$$

$$u_q^{eq} = \left( \dot{I}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} p\Omega I_d + \frac{\Psi_f}{L_q} p\Omega \right) L_q \quad (\text{III.42})$$

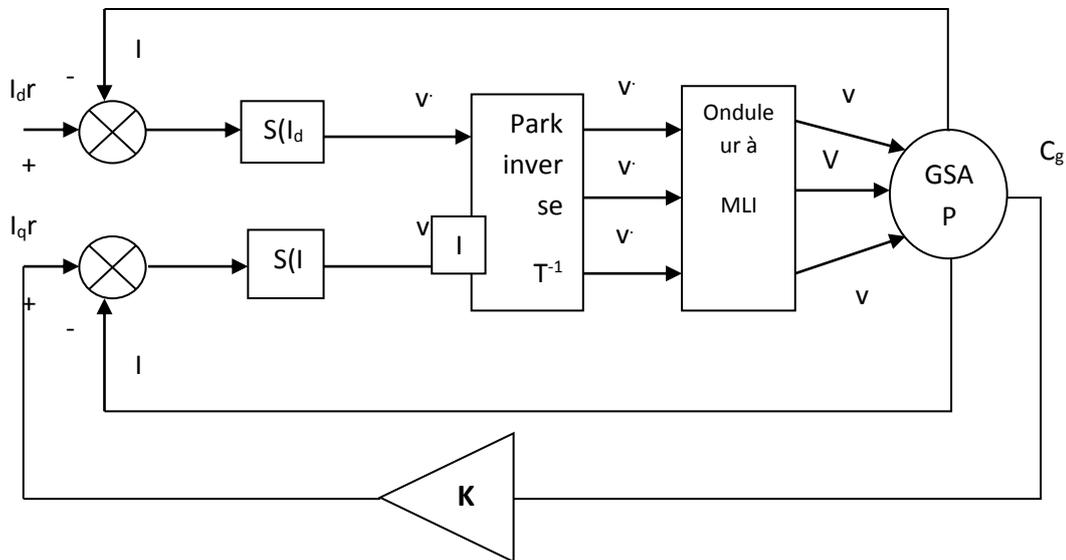
$$u_q^n = K_q \text{sign}(s(I_q)) \quad (\text{III.43})$$

$K_q$ : Constant positive

Dans notre travail On prend:

$$K_q = 200$$

La figure (III.3) suivante représente le modèle complet de la commande par mode glissant de la machine synchrone à aimant permanent



**FIG III.3: Schéma global de réglage par mode glissant**

### III.5. Introduction

Dans ce partie,nous representons les resultats de simulation de l`approche de la commande choisie base sur le mode glissant(MG) qui est consider comme commande robuste vis avis des perturbations dus aux variations de vitessea de vent

### III.6. Résultats de simulation :

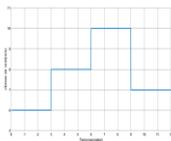
Profile de vent:

Pour tester la robustesse de la commande par mode glissant applique a l`éolienne, nous choisissons le profile de vents présentes par la figure1 comme suite :

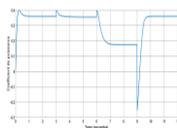
[0,6]et[9.12] Mode mppt  $V_v \leq V_{vn}=8$

Mode regulation de puissance( $c_e=p_n/\Omega$ )  $V_v > V_{vn}=8$

[6,9] Mode regulation de puissance  $V_v=10 > V_{vn}=8$



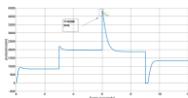
**FIG III.4: Allure du profil de vitesse du vent**



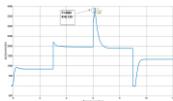
**FIG III.5: Allure du coefficient de puissance vitesse de vent variable**

Le coefficient de puissance a sa valeur maximal 0.361 si est à zone mppt, il diminuer si a la zone de régulation de puissance a valeur 0.18

### III.6.1. Résultats mécaniques :

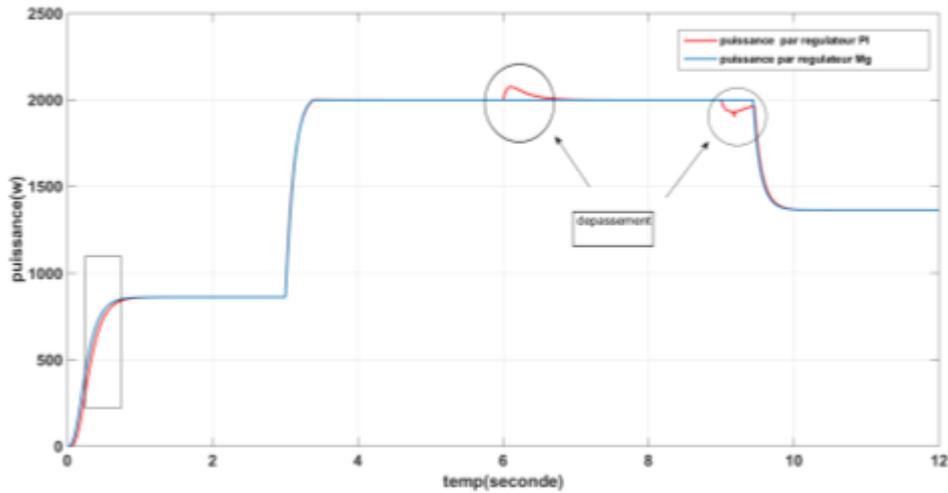


**FIG III.6: puissance de turbine par régulateur PI pour différents valeurs de vitesse de vent**



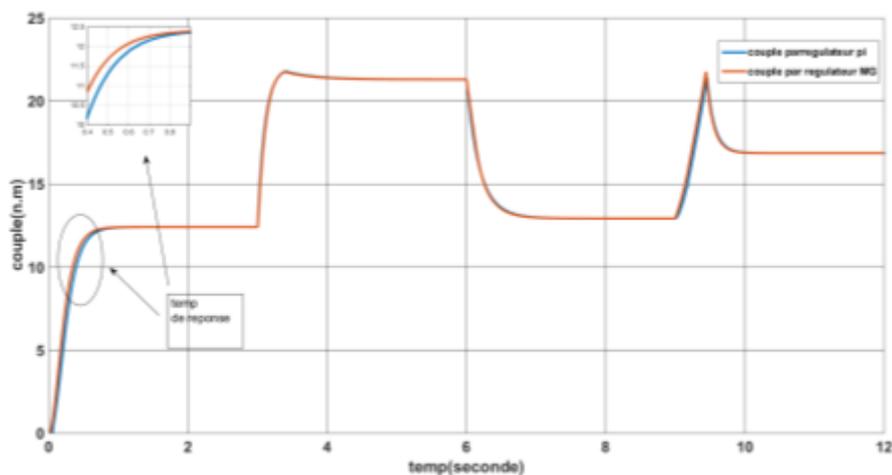
**FIG III.7: puissance de turbine par régulateur MG pour différents valeurs de vitesse de vent**

En comparant le dépassement de la puissance pour la variation de vitesse de vent au dessus valeur nominale, par régulateur PI le dépassement 4286w par rapport le dépassement de puissance 3865w par régulateur mode glissant



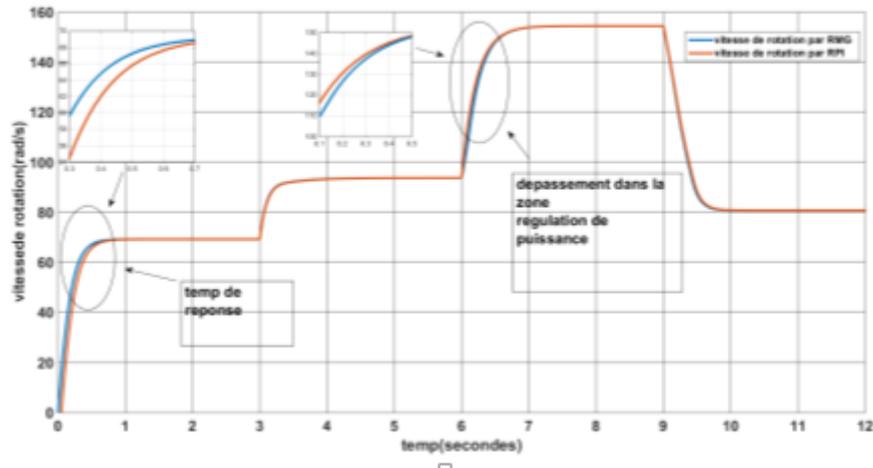
**FIG III.8: puissance de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent**

En comparant les réponses des deux régulateurs, nous remarquons que la puissance par mode glissement plus rapide par rapport la réponse par le régulateur PI et que perturbation est nulle au mode glissement mais avec régulateur PI chaque variation de vitesse de vent il ya des perturbations



**FIG III.9: couple de génératrice par deux régulateur pour différents valeurs de vitesse de vent**

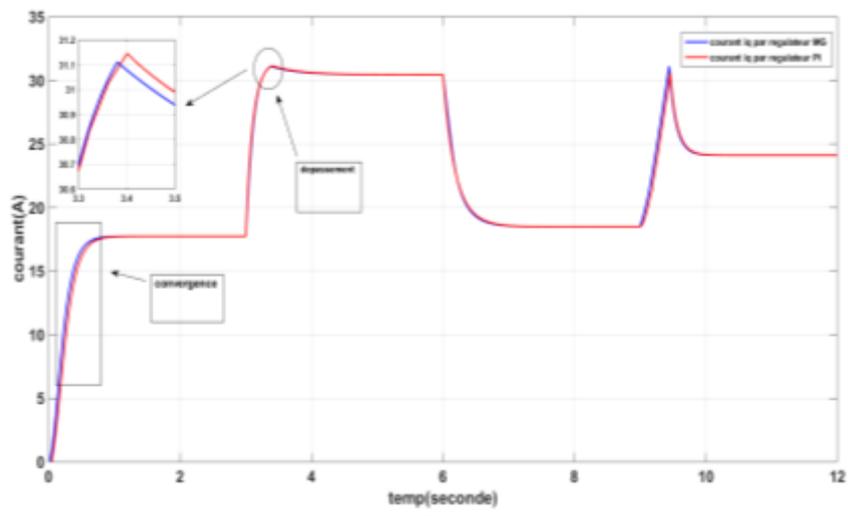
(Figure III.9) représente courbe de couple avec régulateur PI et régulateur MG, le temps de réponse plus rapide par régulateur MG à l'atteinte de la valeur 0.75s mais par régulateur PI  $t=0.8s$



**FIG III.10: vitesse de turbine par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent**

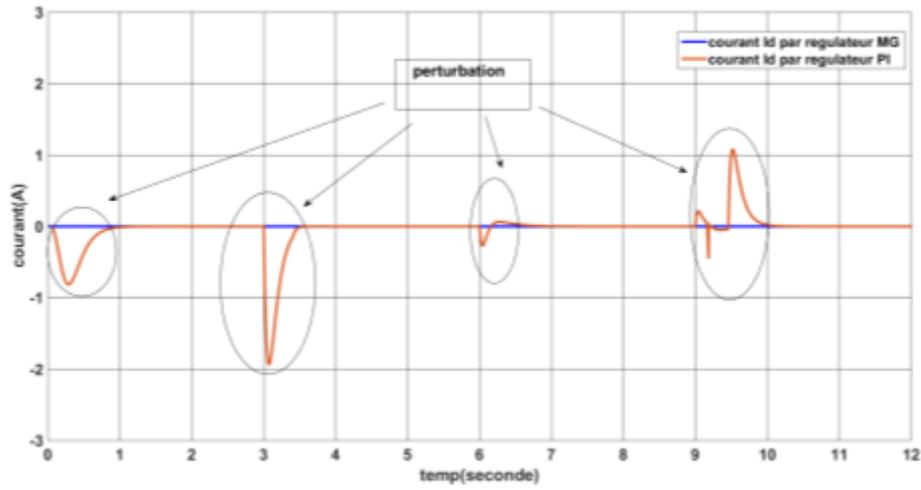
(Figure III.10) pour une vitesse de vent égale 6 temps de réponse du vitesse de rotation au régime transitoire par mode glissant plus rapide que la vitesse par régulateur PI hors la zone de mppt ( l instant 6 vitesse de vent 10m/s) la vitesse de rotation plus long en mode glissant par rapport vitesse par régulateur Pi c est a dire le dépassement plus élevé

**III.6.2. Résultat électrique:**



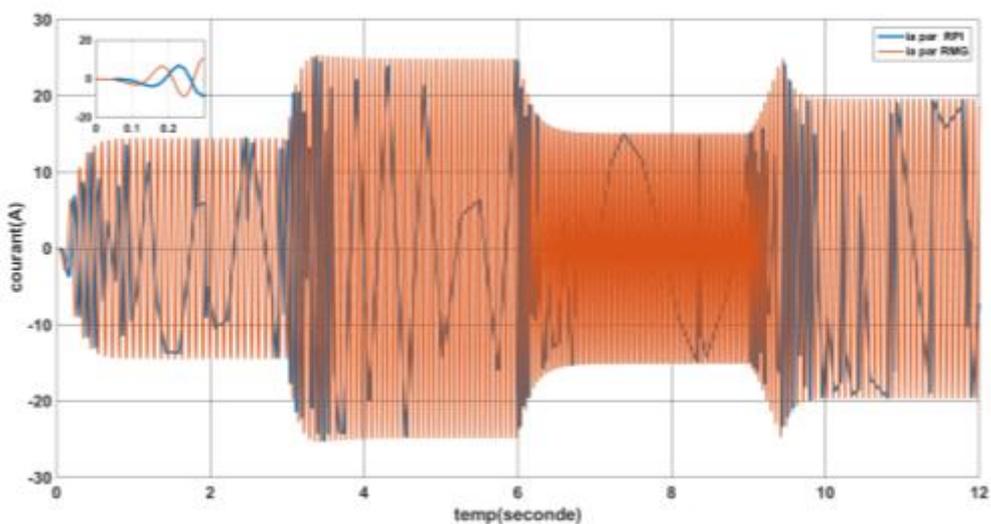
**FIG III.11: courant iq de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent**

En remarquant que le temps de réponse de courant plus rapide par mode glissant que avec régulateur PI, autre part le dépassement moins par régulateur par mode glissant par rapport le dépassement par régulateur PI



**FIG III.12: courant  $I_d$  de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent**

En remarquant que le courant  $I_d$  avec régulateur PI contient des perturbations à chaque variation de vitesse de vent par contre le courant  $I_d$  par régulateur mode glissant stable à sa valeur 0



**FIG III.13: courant statorique  $I_a$  de génératrice par deux régulateurs pour différents valeurs de vitesse de vent**

Nous voyons que la variation de courant statorique plus rapide par mode glissant , avec régulateur PI la variation plus long

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi la technique de la commande vectorielle appliquée à la GSAP, pour améliorer les performances dynamique et statique, et d'atteindre un découplage entre les axes "d" et "q" ce qui rend la génératrice.

Le réglage du couple avec un régulateur classique (PI) La commande par mode glissant donne des résultats défèrent.

Les résultats par deux régulateurs, nous montrent que les réponses avec le mode glissant pour l'asservissement en couple sont rapides et robustes lors des variations de la vitesse. Finalement, on a fait étude comparative entre la commande vectorielle à régulateur (PI) et la mode glissant de la GSAP .est on a présenté les résulta de simulation.

## ***IV. Conclusion general***

#### IV. Conclusion general

La configuration adoptée pour l'entraînement à vitesse variable est composée d'une génératrice synchrone à aimant permanent alimentée par un système de conversion d'énergie éolienne. L'accessibilité à la mesure de toutes les grandeurs de la GSAP permet une grande souplesse de réglage des courants, et de la performance dynamique.

Le but de ce mémoire est d'évaluer les performances de la génératrice par application de commande par mode glissant.

On a présenté au premier chapitre, une étude générale sur l'éolienne : définition, les types, on parle de ceux-ci (leurs structures générales et leurs propriétés),

Dans le chapitre deux on représente la modélisation des équations électriques et mécaniques dans le repère  $(abc)$  et  $(d-q)$  de la turbine, multiplicateur et génératrice synchrone à aimants permanents. On représente la transformation de PARK pour simplifier le travail.

Au troisième chapitre, on parle de la commande vectorielle et de la commande en mode glissant qui nous donne leur définition et les étapes pour réaliser.

La commande par mode glissant donne de bons résultats, c'est une commande robuste liée aux systèmes à structures variables, dont le but est de pallier les inconvénients des commandes classiques basées sur des régulateurs PI. La robustesse apparaît au moment de l'ajustement automatique des régulateurs. Le point fort de cette technique de régulation est la simplicité de mise en œuvre et la robustesse par rapport aux perturbations internes et externes même aux incertitudes du système.

**Références bibliographiques**

- [01] : SADKINE SMAIL, RACHEDI AGHILESET et ABDELLI RADIA. « Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée », 2017, [Mémoire de Fin d'Étude], Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Bejaia.
- [02] A. Moussa Siddo et I. Soumana Nouhou « Etude du Générateur Asynchrone pour l'Utilisation dans la Production de l'Énergie Éolienne » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique 10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2007.
- [03] A. Saki et M. Belaidi « Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Énergie Electrique par Eolienne » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique .10, Avenue Hassen-Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Juin 2006.
- [04] K. Fercous « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne » Mémoire de Magister en physique de l'Université Mentouri de Constantine, Algérie, 27 mai 2009.
- [05] N.Cherfia. Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens, Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [06] S Belakehal., "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables"., Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [07] TRIA Fatma Zahra,2018. Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien.thèse de doctorat en Électrotechnique ,université Mohamed Khider- BISKRA,110p.
- [08] A.Bouhedda « Contribution à l'Étude de Commande d'une Eolienne » Mémoire de Magister en Electrotechnique de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, Algérie, Juillet 2011.
- [09] F Poitiers., "Étude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne machine asynchrone à cage autonome machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau"., Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [10] M Hacil., "Amélioration des performances des énergies éoliennes"., Thèse de Doctorat Université de Constantine, 2012.

- [11] Associations nationales d'énergie éolienne (GWEC)  
<https://www.suisseole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques>, consulté en Avril 2022.
- [12] DJILLALI KAIROUS,2019. Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienn.thèse de doctorat,université du Québec à chicoutimi,187 p.
- [13] Statista. (2018, 17-Dec-2018). puissance éolienne cumulée dans le monde. Disponible à: <https://fr.statista.com/statistiques/713961/puissance-eolienncumulee-monde/>
- [14] <https://www.energy.gov.dz/> , consulté en Avril 2022.
- [15] S Madougou.,“Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent”., Thèse de Doctorat Université de Toulouse,2010.
- [16] B Beltran.,“Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur”., Thèse de Doctorat, Université de Bretagne, 2010.
- [17] Y Djeriri., “Commande Par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégrée à un Système Eolien”., Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés , 2009.
- [18] E. F Mogoş., “Production décentralisée dans les réseaux de distribution étude pluridisciplinaire de La modélisation pour le contrôle des sources”., Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [19] N Laverdure ., “Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”., Thèse de Doctorat, Université de ENS de Cachan, 2005.
- [20] V Courtecuisse., “Supervision d'une centrale multi sources a base d'éoliennes et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique”., Thèse de Doctorat Université de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [21] A Abdelli., “Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive”., Thèse de Doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2007.

- [22] S Khoujet El Khil., “Commande vectorielle d’une machine asynchrone doublement alimentée MADA” .,Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [23] T Ghennam., “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”., Thèse de Doctorat, Université de Lille et L’école Polytechnique d’ALGER, 2011.
- [24] H 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 de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [25]M. El Mokadem , V. Courtecuisse , C. Saudemont , B. Robyns , J. Deuse“Experimental study of variable speed wind generator contribution to primary frequency control” ; Renewable Energy 34 (2009) 833–844
- [26] El Aimani, S ;"*Modélisation de différentes technologies d'éolienne intégrés dans un réseau de moyenne tension*" Thèse de doctorat de l'école centrale et l'université des sciences et technologies de Lille.
- [27]: J. Wilkie, W.E. Leithead, C. Anderson, ” Modelling of wind turbines by simple models Wind engineering ”, vol. 14, No 4, 1990, pp. 247-274.
- [28]: J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, ” Transient stability studies in grids with great windpower penetration. Modelling issues and operation requirements ”, 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas (USA), CD.
- [29] : C. Saget, ” La variation électronique de vitesse au service de la production d’énergie électrique par éolienne ”, REE, n°7, Juillet 1998, pp. 42-48.
- [30]: R. Mukand Patel, ” Wind and solar power systems ”, CRC Press, 1999.
- [31] E. S. Abdin, W. Xu, ” Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine- Induction Generator Unit ”, IEEE Trans. on Energy conversion, vol.15, No1, March 2000

- [32]: E. De Vries, "Wind turbines technology trends", Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003.
- [33]: I. Meghlaoui «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal» Mémoire de magister Université Badji Mokhtar –annaba,2009.
- [34]: S.E. ZIRAOUI «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau»Mémoire de master Université Badji Mokhtar –annaba 2017
- [35]: M. MAYOUF «ETUDE comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents » Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna 2014
- [36]: G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation*. John Wiley & Sons, 2011.
- [37]: É. Tremblay, "Contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique," École de technologie supérieure, 2009.
- [38]: T. Bouaouiche, "Commande à structure variable et étude de l'intégration d'éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation sur le réseau électrique," Nantes, 2007.
- [39] L.Lamia."Contrôle direct du couple d'une machine synchrone à aimant permanent sans capteur mécanique "; Université de Batna 2008.
- [40] L.Kirsane."Commande non linéaire de la machine induction aspect expérimental", Mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [41] M.S.Mahgoun."Application de La Commande  $H_\infty$  Aux Systèmes Linéaires Perturbés".Thèse de Magister2012
- [42] K. Nabti."Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [43] G. Grellet, and G. Clerc."Actionneur électriques, principes, modèles, commande",Eyrolles, 1997.
- [44] F. Benchabane."Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Thèse de Magister,Université deBiskra,2005.

- [45] E. Slotine and W. Li."Applied nonlinear control", Prentice Hall Englewood Cliffs. New Jersey 1991
- [46] M. Ahmed, F. M. Karim, M. Abdelkader and B. Abdelber."Input output linearization and sliding mode control of a permanent magnet synchronous machine fed by a three levels inverter", Journal of electrical engineering, VOL. 57, No. 4, 2006, 205-210
- [47] O. Hjini, T. Kaneko, and H. Ohsawa."A new controller For PMSM Servo drive Based on the Sliding mode approach with parameter adaptation", IEEJ Trans. Vo. 123 N°6, 2003
- [48] A. Massoum, MK Fellah, A. Meroufel, P. Wira, and B. Bellabes."Sliding mode control for a permanent magnet synchronous machine fed by three levels inverter using a singular perturbation decoupling", Journal of electrical & electronics engineering V.5 Istanbul University 2005
- [49] K. Paponpen and M. Konghirun."Speed Sensor less Control of PMSM Using An Improved Sliding Mode Observer With Sigmoid Function", ECTI Tran. On electrical electronics, and communications Vol.5, No.1 February 2007
- [50] Y. Li, and J. Son and J. Lee."MSM Speed Controller Using switching algorithm of PD and Sliding Mode Control", ICROS-SICE International Joint Conference 2009 August 18-21, 2009, Fukuoka International Congress Center, Japan
- [51] S. H. Chang, P. Y. Chen, Y. H. Ting, and S. W. Hung."Robust current control-based sliding mode control with simple uncertainties estimation in permanent magnet synchronous motor drive system" IET Electric Power Application, 2010, Vol. 4, Iss. 6, pp. 441-450
- [52] A.G.Aissaoui, M. Abid, A. Tahour, A.C. Megherbi."Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", 2 international Conference on Electrical Systems Design & Technologies, Hammamet Tunisia, Nov. 8-10, 2008 439

## Annexes

**Tableau .A.1:Les paramètres des constituants du système de conversion éolien**

composants	Paramètres	Symboles	Valeurs
Turbine éolienne	Rayon pale	R	2.3637m
	Coefficient de puissance maximale	Cpmax	0.36
	Ration de vitesse optimal	$\lambda_{op}$	7
	Inertie totale	Jt	0.005Kg .m2
	Puissance nominale	Pn	2 Kw
Gsap	Puissance nominale	Pn	2 Kw
	Tension entre lignes	Un	220V
	Fréquence	f	60Hz
	Flux	$\omega_f$	0.175Wb
	Inertie du rotor	Jt	0.005Kg .m2
	Coefficient de frottement	F	0.089Nm/rd/s
	Resistance stator	Rs	2.875 $\Omega$
	Inductance	Ld=Lq	8.5e-3H
	Poles	p	4
	multiplicateur	G	3.4

## Résumé

Dans notre travail on étudie la commande en mode glissant appliquée sur un générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) alimenté par un système de conversion d'énergie éolienne. Pour ce faire, nous avons d'abord dressé un état de l'art du générateur étudié, puis nous avons présenté son modèle mathématique qui a été simulé par le Matlab-Simulink. Le système d'alimentation de cette machine comporte deux parties identiques,

Le problème est représenté par la performance par commande vectorielle et commande robuste (mode glissant) également étudié. Les résultats de simulation montrent que l'objectif assigné a été atteint. Afin d'améliorer ces résultats, la technique de mode glissant a été utilisée.

Mots-clés : Réglage par mode de glissement , énergie éolienne ,générateur à aimant permanent ,commande robuste.

## Abstract

In our work we study the sliding mode control applied to a permanent magnet synchronous generator (GSAP) powered by a wind energy conversion system. To do this, we first drew up a state of the art of the generator studied, then we presented its mathematical model which was simulated by the Matlab-Simulink. The feeding system of this machine has two identical parts,

The problem is represented by vector control and robust control (glide mode) is also studied. The simulation results show that the assigned objective has been achieved. In order to improve these results, the sliding mode technique was used.

Keywords: Sliding mode tuning, wind power, permanent magnet generator, robust control.

## ملخص

في عملنا ، ندرس التحكم في الوضع الانزلاقي المطبق على مولد متزامن مغناطيسي دائم (GSAP) يعمل بنظام تحويل طاقة الرياح. للقيام بذلك ، قمنا أولاً بإعداد مولد حديث تمت دراسته ، ثم قدمنا نموذجاً رياضياً تمت محاكاته بواسطة Matlab-Simulink. يتكون نظام التغذية لهذا الجهاز من جزأين متطابقين ، يتم أيضاً دراسة المشكلة إذا تم تمثيلها من خلال التحكم في النواقل والتحكم القوي (وضع الانزلاق). تظهر نتائج المحاكاة أن الهدف المحدد قد تحقق. من أجل تحسين هذه النتائج ، تم استخدام تقنية الوضع المنزلق. الكلمات الرئيسية: ضبط الوضع المنزلق ، طاقة الرياح ، مولد المغناطيس الدائم ، تحكم قوي.