

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2018

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat  
Département: Electronique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

# Contrôle de Puissances d'une Génératrice dans une Chaine de Production d'Energie Eolienne

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielles

Par : MAKHLOUF Zineb

DEVANT Le JURY

Président	:	N. DEBBACHE	Pr	UBM Annaba
Directrice de mémoire	:	K. BEDOUD	Dr	URMA/CRTI Annaba
Examineur	:	S. BENMOUSSA	Dr	UBM Annaba

## *Remerciements*

*Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie ma Directrice de mémoire  
Madame Bedoud Khouloud.*

*Pour son soutien, ses conseils judicieux et ses grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet.*

*Aussi, j'exprime ma reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.*

*Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

## DEDICACES

*JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant  
les moments les plus pénibles de ce long chemin,  
jusqu'à atteindre ce stade de formation.*

*A ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu  
durant toute ma vie,*

*A mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me  
voir devenir ce que je suis.*

*Merci mes parents.*

*A mes très chères sœurs : meriem et latifa*

*A mon très chers frères : Omar et Ayoub*

*Et notre petit bébé ABED WADOUD*

*A toute ma famille sans exception.*

*A tous mes amis : ZAHRA; IMEN; Saïda ; Hanéne*

*MAKHOUF ZINEB*

# sommaire

Remerciements

Dédicaces

Symboles

Liste des figures

**Introduction générale**..... 01

**Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne**

1.1	Introduction.....	04
1.2	Description de l'énergie éolienne.....	04
1.3	Evaluation de l'énergie éolienne.....	06
1.4	Types d'éoliennes.....	09
	1.4.1 Eoliennes à axe horizontal.....	09
	1.4.2 Eoliennes à axe vertical.....	10
1.5	Conclusion.....	11

**Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion**

2.1	Introduction.....	13
2.2	Modélisation du système de conversion.....	13
	2.2.1 Modélisation de la partie mécanique.....	14
	2.2.1.1 Modélisation de la turbine.....	14
	2.2.1.2 Modélisation du multiplicateur.....	16
	2.2.1.3 Modélisation de l'arbre mécanique.....	16
	2.2.2 Modélisation de la partie électrique .....	18
	2.2.2.1 Modélisation de la MADA.....	18

# Sommaire

---

2.2.2.2 Modélisation du convertisseur.....	20
2.3 Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	24
2.4 Simulation et interprétation.....	26
2.5 Conclusion.....	28
<b>Chapitre III :</b>	<b>Commande de la chaine de conversion</b>
3.1 Introduction.....	30
3.2 Commande du système de conversion.....	30
3.2.1 Commande MPPT.....	30
3.2.1.1 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	31
3.2.1.2 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.....	31
3.2.2 Commande vectorielle à flux statorique orienté de la machine.....	33
3.2.3 Commande du convertisseur coté réseau.....	36
3.2.4 Contrôle de la tension du bus continu.....	38
3.2.5 Contrôle du convertisseur coté machine .....	39
3.3 Simulation et interprétation .....	40
3.4 Conclusion.....	45
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>
<b>Rèfèrence .....</b>	<b>.....</b>

# Symboles

Symbole	Signification	Unité
$V_{vent}$	Vitesse de vent	m/s
G	Gain du multiplicateur de vitesse	/
$\rho$	masse volumique de l'air	/
R	Rayon de la pale (rotor)	M
$E_{cv}$	Energie cinétique	J
M	Masse de l'air	Kg
S	Surface balayée par l'éolienne	$m^2$
$P_v$	Puissance portée par le vent	W
$P_{tur}$	Puissance mécanique de la turbine éolienne	W
$C_P$	Coefficient de puissance	/
$C_{popt}$	Coefficient de puissance optimale de la turbine	/
$\lambda$	Vitesse relative de l'éolienne	/
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale	/
$\beta$	Angle de calage de la turbine	(°)
$\Omega_{tur}$	Vitesse angulaire de la turbine	rad /s
$C_{tur}$	Couple aérodynamique de la turbine	N.m
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique	rad/s
$C_{mec}$	Couple mécanique	N.m
J	Inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice	$Kg.m^2$
$J_{tur}$	Inertie de la turbine éolienne	$Kg.m^2$
$J_g$	Inertie de la génératrice	
G	Glissement	/
$C_g$	Couple résistant (issu de multiplicateur)	N.m
$C_{vis}$	Couple de frottement visqueux	N.m/rad
$C_{em}$	Couple électromagnétique de la génératrice	N.m
f	Coefficient de frottement visqueux	N.m.s/rad
$V_{sd}$	Tension statorique sur l'axe d	V
$R_s$	Résistance d'une phase statorique	$\Omega$
$i_{sd}$	Courant statorique sur l'axe d	A
$\varphi_{sd}$	Flux statorique sur l'axe d	Wb
$\omega_s$	Pulsation statorique	rad/s
$\varphi_{sq}$	Flux statorique sur l'axe q	Wb
P	Nombre de paires de pôles	/
$\sigma$	Coefficient de couplage électromagnétique	/
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants instantanés des phases statoriques	A
$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$	Tension instantanée des phases	V
$S_a, S_b, S_c$	Etats de commutation des interrupteurs du convertisseur	/
$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$	Tension d'alimentation des phases statoriques	V
$V_{dc}$	Tension active nécessaire pour charger le bus continu	V
$V_n$	Tension aux bornes d'une phase n	V
$i_c$	Courant traversant le condensateur	A
$i_{dc}$	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu	A
$i_{ch}$	Courant de la charge non-linéaire	A

## ***Symboles***

$V_d, V_q$	Système des tensions dans le repère (dq)	V
$i_d, i_q$	Système des courants dans le repère (dq)	A
$P_{nom}$	Puissance nominale	W
$\Omega_{cut-out}$	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est arrêtée	rad/s
	puissance mécanique fournie par l'arbre	
$V_{sq}$	Tension statorique sur l'axe q	V
$i_{sq}$	Courant statorique sur l'axe q	A
$V_{rd}$	Tension rotorique sur l'axe d	V
$V_{rq}$	Tension rotorique sur l'axe q	V
$R_r$	Résistance d'une pahserotorique	$\Omega$
$i_{rd}$	Courant rotorique sur l'axe d	A
$i_{rq}$	Courant rotorique sur l'axe q	A
$\phi_{rd}$	Flux rotorique sur l'axe d	Wb
$\phi_{rq}$	Flux rotorique sur l'axe q	Wb
$\omega_r$	Pulsation rotorique	rad/s
$L_s$	Inductance propre d'une phase statorique	H
$L_m$	Inductance de magnétisation saturé	H
$L_r$	Inductance propre d'une phase rotorique	H
$M$	Inductance cyclique (mutuelle)	H
$P_s$	Puissance active statorique	W
$Q_s$	Puissance réactive statorique	Var
$P_r$	Puissance active rotorique	W
$Q_r$	Puissance réactive rotorique	Var
$\Omega_{cut-in}$	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est démarrée	rad/s
$\Omega_{mec}^*$	Vitesse mécanique de référence	m/s
$\Omega_{tur}^*$	Vitesse angulaire de référence de la turbine	m/s
$C_{em}^*$	Couple électromagnétique de référence de la génératrice	N.m
$i_{td}$	Composante directe du courant dans le filtre	A
$i_{tq}$	Composante en quadrature de courant dans le filtre	A
$P_r$	Puissance active apparaissant dans le circuit rotorique	W
$P_t$	Puissance du réseau	W
$i_{rm}$	Courant fournit par la génératrice	A
$i_{gm}$	Courant modulé par le convertisseur MLI	A
$P_v$	Puissance portée par le vent	W
$P_{s-ref}$	Puissance active statorique de référence	W
$Q_{s-ref}$	Puissance réactive statorique de référence	W

## Liste des figures

<b>Figure(1.1)</b> : Constituant une éolienne	6
<b>Figure(1.2)</b> : Puissance éolienne cumulée dans une monde en MW	7
<b>Figure(1.3)</b> : Histogramme de la capacité totale de puissance fournie par les éolienne dans le monde (MW)	7
<b>Figure(1.4)</b> : Ferme éolienne kbertene-Algerie	9
<b>Figure(1.5)</b> : Eolienne à axes horizontal	10
<b>Figure(1.6)</b> : Eolienne à axe vertical	11
<b>Figure(2.1)</b> : Schéma d'une chaine de conversion d'énergie	13
<b>Figure(2.2)</b> : Coefficient de puissance en fonction de ( $\lambda$ )	15
<b>Figure(2.3)</b> : Partie mécanique de la turbine éolienne	16
<b>Figure(2.4)</b> : Modèle de l'arbre de l'éolienne	17
<b>Figure(2.5)</b> : Représentation simplifiè de la MADA	18
<b>Figure(2.6)</b> : Structure d'un convertisseur triphasè connecté au réseau	20
<b>Figure(2.7)</b> : Modélisation du convertisseur dans le repère lié aux axes abc	22
<b>Figure(2.8)</b> : Schéma fonctionnel du convertisseur dans le réfèrentiel Tournant d-q	23
<b>Figure(2.9)</b> : Caractéristique puissance-vitesse typique d'une eolienne de grande puissance	24
<b>Figure(2.10)</b> :Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation	25
<b>Figure(2.11)</b> :Vitesse du vent(m/s)	26
<b>Figure(2.12)</b> :Vitesse mècanique(rad/s)	27
<b>Figure(2.13)</b> :Couple èlectromagnètique(N.m)	27
<b>Figure(2.14)</b> :Puissance active(w)	27
<b>Figure(3.1)</b> : Schéma bloc du contrôle MPPT de la vitesse de rotation	33
<b>Figure(3.2)</b> : Orientation du flux statorique sur l'axe d	34
<b>Figure(3.3)</b> : Schéma bloc du modèle de la GADA	36
<b>Figure(3.4)</b> : Schéma bloc du contrôle du convertisseur cotè réseau	38
<b>Figure(3.5)</b> :Schéma synoptique du contrôle du convertisseur cotè machine	39
<b>Figure(3.6)</b> : Schéma de principe du contrôle des courants rotoriques	40
<b>Figure(3.7)</b> : Schéma bloc du principe de commande du système de conversion èolien	41
<b>Figure(3.8)</b> : Puissance Active(W) et Rèactive(Var) statorique	42
<b>Figure(3.9)</b> : Puissance Active(W) et Rèactive(Var) rotorique	42
<b>Figure(3.10)</b> : Courant rotorique d'axe d et q	43
<b>Figure(3.11)</b> : Courant statorique d'axe d et q	43
<b>Figure(3.12)</b> : Tension du bus continu (V)	44



## ملخص

الهدف من العمل المعروف في هذه المذكرة هو دراسة النمذجة و التحكم في سلسلة التحويل على أساس جهاز غير متزامن (MADA) يتبعه مقوم (MLI) للتحكم في القوى النشطة و المتفاعلة (P,Q) كل جزء من السلسلة تم تقديمه و طور نمودجه الرياضية, وفقا لذلك برامج المحاكاة تم تقديمها و التي بفضلها تم تقديم النتائج .

# Résumé

## Résumé :

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est l'étude de la modélisation et de la commande d'une chaîne de conversion à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) suivie d'un redresseur (MLI) pour contrôler les puissances active et réactive (P ; Q).

Chaque partie de la chaîne est présentée et son modèle mathématique est développée. Des programmes de simulations sont conséquemment, mis au point et qui grâce auxquels on présente les résultats de simulations.

**Mots clefs :** *Eolienne, modélisation, machine asynchrone double alimentation (MADA), commande MPPT, commande vectorielle, puissance active et réactive, régulateur.*

# *Abstract*

## **Abstract :**

The aim of the work presented in this thesis is the study of the modeling and the control of a conversion chain based on a doubly fed induction generator (DFIG) followed by a rectifier (PMW) to control active and reactive powers (P; Q).

Each part of the chain is presented and its mathematical model is developed. Simulation programs are consequently developed. The simulations results are presented and discussed.

***Keywords :*** *Wind turbine, modeling, doubly fed induction generator (DFIG), MPPT control, vector control, active and reactive power, regulator.*

---

# Introduction générale

---

# Introduction Générale

---

## *Introduction Générale*

La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique dénotent encore une fois l'importance des énergies renouvelables. Parmi les énergies dites renouvelable et non polluantes, l'énergie éolienne est une des plus prometteuses des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les énergies les plus prometteuses est celle de l'éolienne qui représente une alternative intéressante notamment pour la production de l'énergie électrique. L'évolution des éoliennes a connu un essor ces dernières années, que ce soit sur le plan de leur utilisation dans le monde ou sur le plan de leur conception où ils ont passé de la petite éolienne isolée aux grands parcs des aérogénérateurs connectés sur le réseau électrique.

D'autre part, il paraît nécessaire de disposer d'un outil de simulation capable de modéliser l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie et de prévoir ses performances. L'objectif général de cette étude est d'optimiser la conversion électromécanique d'énergie des éoliennes, l'élaboration de stratégies appropriées de contrôle.

De nos jours, les systèmes éoliens à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont les plus utilisées notamment dans les grands parcs éoliens, et cela, grâce aux avantages que la MADA présente. Cette machine fonctionne à une fréquence fixe pour une vitesse d'entraînement variable grâce à un contrôle de courants rotoriques par des convertisseurs dimensionnés à des puissances réduites.

L'étude de ce travail réalisé au sein du département d'électronique de l'université Badji-Mokhtar-Annaba, dans le cadre du mémoire de fin d'études master 2 a pour objectif principal, d'étudier la commande de puissance active et réactive d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Pour ce faire, le contenu du mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens ;

# Introduction Générale

---

- Le deuxième chapitre comporte la modélisation des éléments de la chaîne de conversion (turbine +MADA+redresseur MLI) ;
- Le troisième chapitre concerne la commande de la chaîne de conversion (turbine+MADA +contrôle de convertisseur coté réseau +contrôle de tension continue +contrôle du convertisseur coté réseau). Ce travail a été validé grâce aux résultats de simulations réalisés sous MatLab /simulink.
- Finalement, une conclusion générale sur les travaux réalisés est présentée.

---

# Chapitre I

---

# CHAPITRE I

## GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE



### **1.1. Introduction**

De nos jours, l'utilisation des énergies renouvelables telle que l'énergie photovoltaïque, hydraulique et l'éolienne, ne cesse pas de croître. Elles présentent l'avantage d'être inépuisables, ne dégagent pas de gaz à effet de serre et préservent les énergies fossiles. Dans ce mémoire on s'intéresse, particulièrement, à l'étude de l'énergie éolienne. Cette dernière, permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne présente l'avantage d'être une source propre, fiable, inépuisable, économique et permet de réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [1]. De plus, la durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie. Par ailleurs, le bruit, le rendement aléatoire, l'impact visuel et le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergies classiques conventionnelles élevé [2], présentent les inconvénients majeurs de cette source [3].

### **1.2. Description de l'énergie éolienne**

Le vent en mouvement entraîne les pales de la turbine et par conséquent le rotor. Le système de conversion d'énergie éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol. L'énergie éolienne est utilisée pour la conservation de l'énergie mécanique soit pour le pompage d'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin), la transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) et la production d'énergie électrique, et ce, par l'intermédiaire d'un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié au réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie. En effet, l'éolienne se compose de :

- ✚ **Mat** : qui est un support pour la nacelle et le rotor, de 10 à 100 m de longueur fixée sur une fondation en béton implantée dans le sol pour assurer la stabilité de l'éolienne. Il dispose, à son intérieur, de câbles pour le transport de l'énergie électrique, des transformateurs et l'échelle d'accès à la nacelle. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [4].
- ✚ **Rotor** : Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale est le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [5].
- ✚ **La nacelle** : La nacelle est l'élément centrale de l'éolienne. Elle est composée de deux pièces principales : le multiplicateur et la génératrice et possède un anémomètre permettant de mesurer la vitesse du vent ainsi que des capteurs (la girouette) qui mesurent la direction du vent permettant ainsi la commande des quatre moteurs qui font pivoter la nacelle pour faire toujours face au vent. L'anémomètre et la girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent. En cas d'urgence, un frein est actionné pour arrêter les pales. Elle possède aussi, un élément de sécurité « le feu d'obstacle » qui permet aux trafics aériens de repérer l'éolienne à distance [6].
- ✚ **Système de refroidissement** : est constitué d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur [6].
- ✚ **Multiplicateur** : permet de multiplier le nombre de tours par minute et d'adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice [6].
- ✚ **La génératrice électrique** : permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique [6].
- ✚ **Le convertisseur** : permet de synchroniser l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique [6].

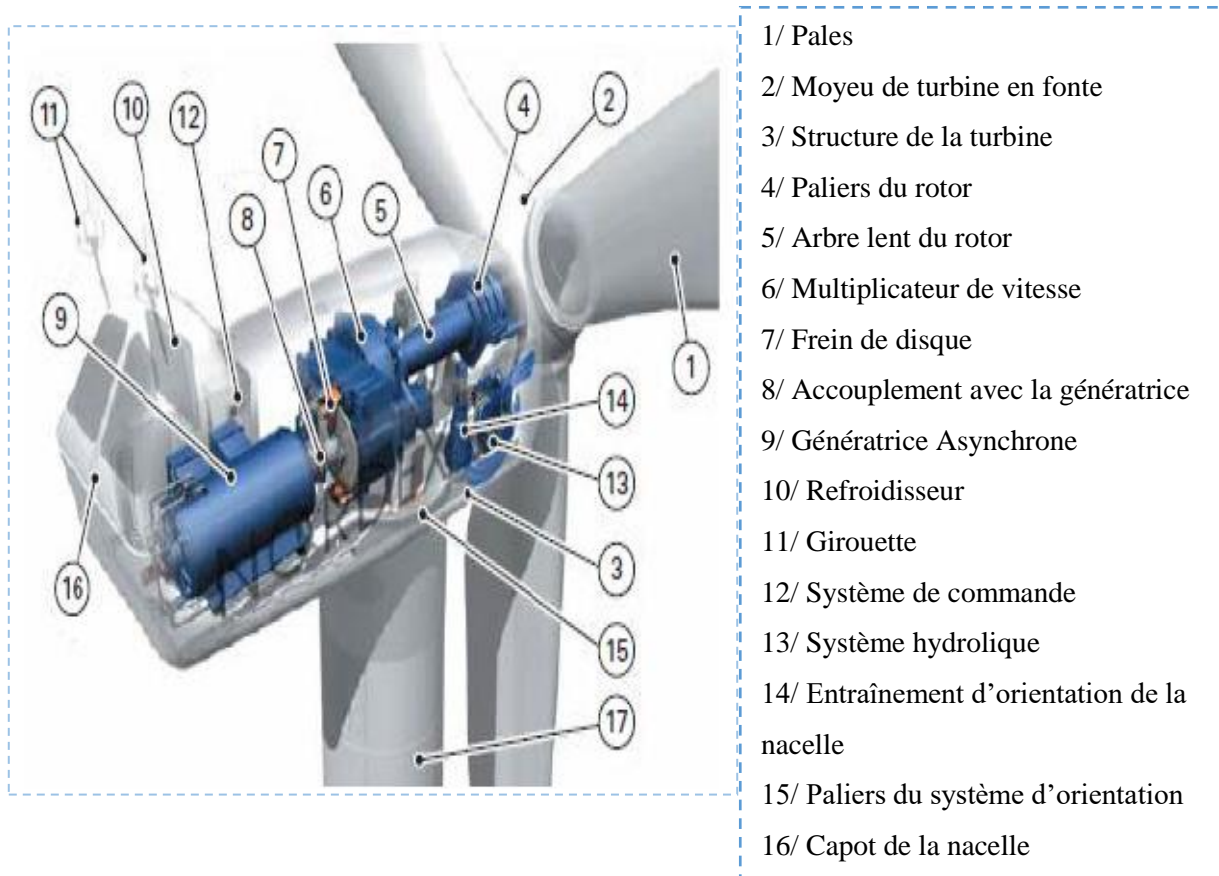
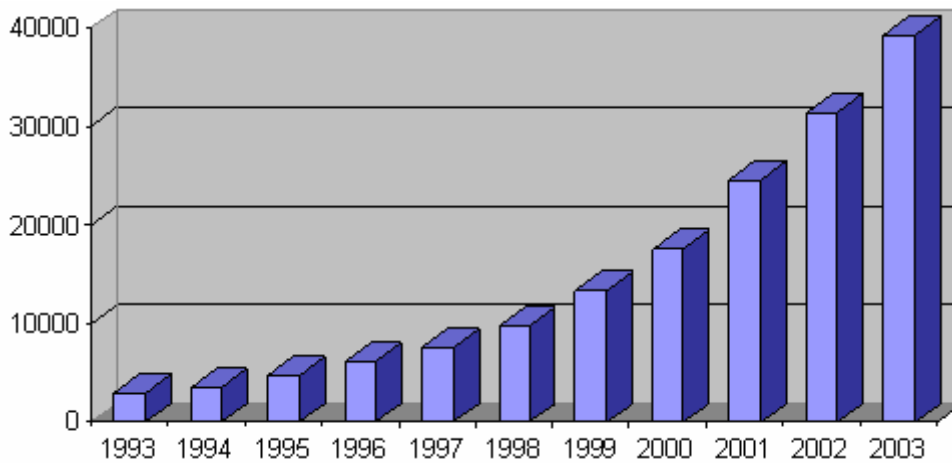


Figure 1.1: Constituant une éolienne [7]

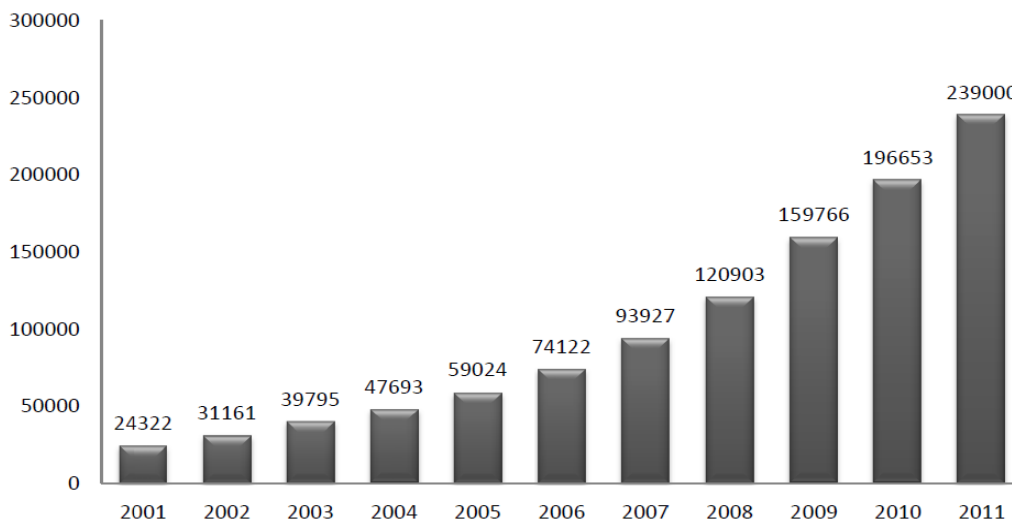
### 1.3. Evaluation de l'énergie éolienne

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998 [8]. L'énergie éolienne connaît depuis quelques années un fort développement. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde [9]. La figure 1.2 présente la puissance éolienne cumulée dans le monde.



**Figure 1.2 :** Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [10]

Une forte augmentation de l'énergie électrique produite par les éoliennes dans le monde sur 10 années (voir figure 1.3).



**Figure 1.3 :** Histogramme de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes dans le monde (MW) [11]

Selon le Conseil Mondial pour l'Energie Eolienne, l'éolien représente 282 GW de puissance installée (+ 19 % en 2012, soit 45 GW supplémentaires) au niveau mondial (dont 35 % en Europe) et cette énergie renouvelable reste de loin la plus importante après l'énergie hydraulique (750 GW installés) mais loin devant le solaire qui vient seulement de passer la

barre des 100 GW. A titre de comparaison, la puissance mondiale installée en nucléaire est de l'ordre de 370 GW. En terme de production effective d'électricité, l'éolien représente à présent plus de 500 TWh par an dans le monde, soit l'équivalent de la consommation totale d'électricité de la France mais même si cette production a été multipliée par trois en 5 ans, elle représente toujours moins de 3 % de la production électrique mondiale qui est de l'ordre de 21 000 TWh par an. Selon le récent rapport du cabinet de conseil Global Data, le marché mondial de l'éolien marin va d'ailleurs continuer sa croissance et pourrait être multiplié par dix d'ici la fin de la décennie, passant de 5 gigawatts de puissance installée à 55 GW.

Par ailleurs, l'Algérie essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays [12]. L'Algérie prévoit un projet de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien. Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024 [13]. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars [13]. La figure 1.4 illustre la première ferme éolienne à Adrar-Algérie d'une puissance de 10MW.



*Figure 1.4 : Ferme éolienne Kebertene-Algérie [13].*

Une étude du consortium industriel pour l'électricité des déserts, le promoteur du projet Desrtec, estime que l'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne. Dans son analyse, cette étude met en exergue des conditions météorologiques particulièrement propices au développement de l'éolien terrestre, avec une vitesse des vents atteignant les 10 m/s à une hauteur de 50 m sur certains sites.

Société de production en charge des réseaux isolés du sud et des Energies Renouvelables, par abréviation SKTM (Shariket Kahraba oua Takat Moutadjadida), est une nouvelle société par actions avec un capital souscrit en totalité par Sonelgaz et dont le siège social est situé à Ghardaïa.

La société d'électricité et de l'énergie renouvelable (SKTM), annonce qu'environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable à l'horizon 2030 [13].

#### **1.4. Types d'éoliennes**

Selon la disposition géométrique, on distingue deux types : les turbines éoliennes à axe horizontal et les turbines éoliennes à axe vertical.

##### **1.4.1. Eoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion, ils sont les plus utilisés.



**Figure 1.5 :** Eolienne à axe horizontal [14].

Les avantages majeurs des éoliennes à axe horizontal sont :

- ✚ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol ;
- ✚ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour .ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Cette disposition présente aussi les inconvénients suivants :

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

### **1.4.2. Eoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement, en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ; donc facilement accessibles.



**Figure 1.6 :** Eolienne à axe vertical [13].

Les turbines éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de traînée du vent à la façon des roues à aube de bateaux. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. En effet, les turbines éoliennes à axe vertical en général sont très peu répandues grâce aux difficultés dues à leur guidage mécanique et à leur rendement énergétique faible. En plus, elles occupent une surface importante. En revanche, elles ont les avantages suivants :

- ✚ Conception verticale permet de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✚ Axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✚ Conception simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

### **1.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, la description ainsi que l'évaluation de l'énergie éolienne dans le monde et notamment en Algérie ont été présentée. En outre, on a exposé une synthèse sur les différents types d'éoliennes selon la disposition géométrique tout en soulignant les avantages et les inconvénients de chaque structure. Dans le reste de ce travail, on s'intéresse, particulièrement, à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales.



---

# Chapitre II

---

# CHAPITRE II

## MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION

## 2.1.Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les deux éléments les plus importants, car la turbine assure une transformation De l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, Nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement.Ce chapitre est consacrée à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne et la machine à double alimentation (MADA), et la commande vectorielle ce dernier. Par la suite, différentes stratégies de commandes sont décrites pour contrôler la puissance aérodynamique de la turbine.

## 2.2. Modélisation du Système de conversion

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air( $\rho$ ) , la surface balayée par le rotor ( $s$ ) et la vitesse du vent( $V_{vent}$ ) . La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [15]. La configuration du système étudié est constituée d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur( $R$ ) entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain ( $G$ ), comme le montre la (figure 2.1) suivant :

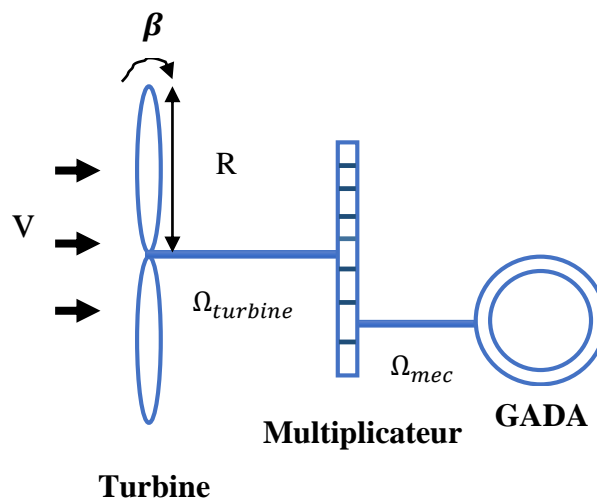


Figure 2.1 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie

**2.2.1. Modélisation de la partie mécanique**

**2.2.1.1. Modélisation de la turbine**

L'énergie cinétique est donnée par :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \tag{2.1}$$

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique [16]. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [17]. Etudions l'éolienne présentée (figure 2.2). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \tag{2.2}$$

Avec :

**V** : vitesse de vent,

**S** : surface balayée par l'éolienne,

**ρ** : masse volumique de l'air (**1.25kg / m3**) [18].

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine [19]. La puissance mécanique de la turbine éolienne est alors :

$$P_{tur} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \tag{2.3}$$

Le coefficient de puissance ( $C_p$ ) représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [20, 21] : le dimensionnement de l'angle d'orientation de la pale ( $\beta$ ), et du coefficient de vitesse spécifique  $\lambda$  (le ratio de vitesse). Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la pale et la vitesse de vent comme :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{V} \tag{2.4}$$

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [21] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4 \right) \times \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \times \lambda \tag{2.5}$$

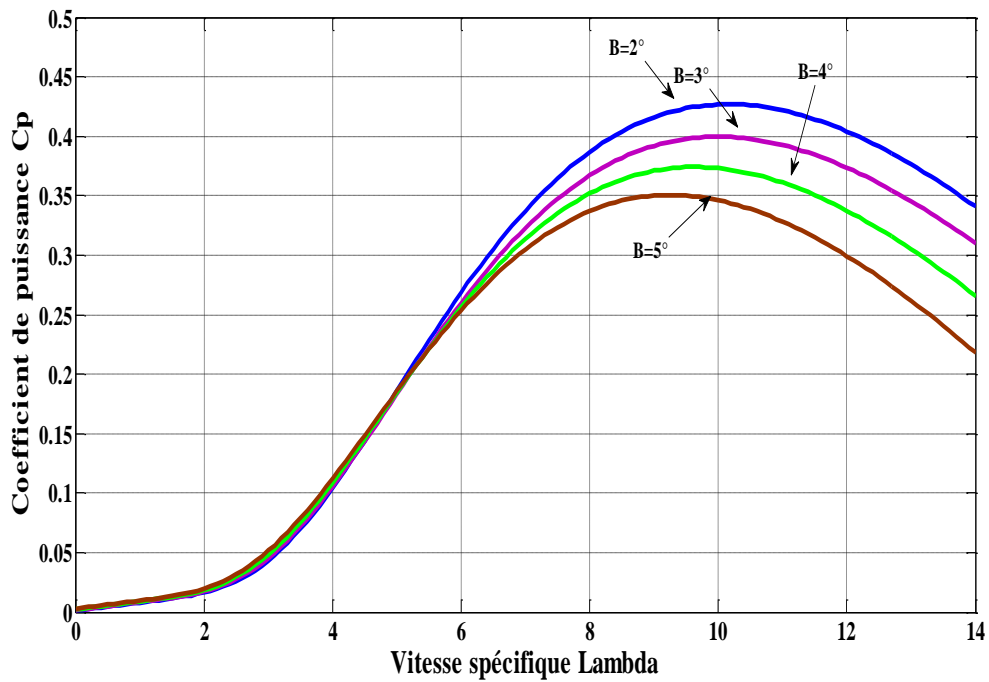
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \times \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{2.6}$$

Avec :

$$C_1 = 0.5179 ; \quad C_2 = 116 ; \quad C_3 = 0.4 ; \quad C_4 = 5 ; \quad C_5 = 21 ; \quad C_6 = 0.0068.$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  ( $C_{popt}=0.43$ ) ; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ .

La figure 2.2 illustre la variation du coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction de la vitesse relative ( $\lambda$ ) pour les différentes valeurs de l'angle de calage :  $\beta = 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$  et  $5^\circ$ . Cette courbe est caractérisée par le point optimal ( $\lambda_{opt} = 10.5, C_{popt} = 0.43, \beta = 2^\circ$ ) qui est le point correspondant au maximum du coefficient du puissance ( $C_p$ ).



**Figure 2.2** : Coefficient de puissance en fonction de ( $\lambda$ )

La turbine est un dispositif permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par [3] :

$$C_{tur} = \frac{P_{tur}}{\Omega_{tur}} = C_P \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (2.7)$$

### 2.2.1.2. Modélisation du multiplicateur

La figure 2.3 présente la partie mécanique de la turbine. Le multiplicateur (G) permet d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice. La vitesse de rotation mécanique en fonction de la vitesse de la turbine est donnée par la formule suivante :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{tur} \quad (2.8)$$

$$G = \frac{C_{tur}}{C_{mec}} \quad (2.9)$$

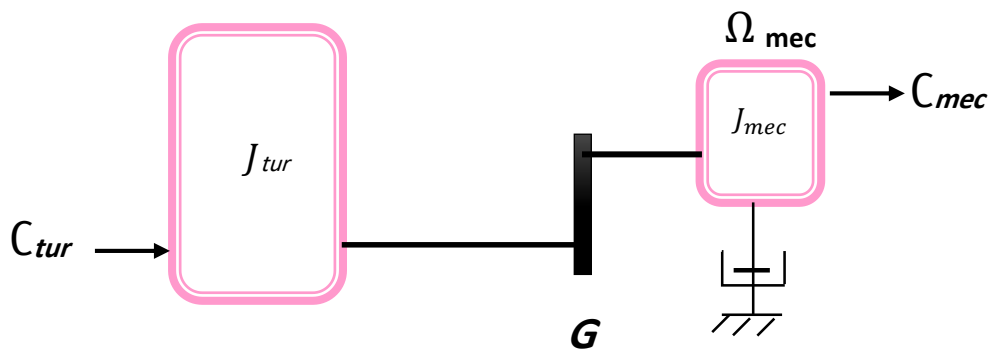


Figure 2.3 : Partie mécanique de la turbine éolienne

### 2.2.1.3. Modélisation de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{tur}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (2.10)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{2.11}$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{2.12}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  [16] :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{2.13}$$

Le schéma bloc correspondant à l'ensemble de cette modélisation est montré par la figure 2.4 :

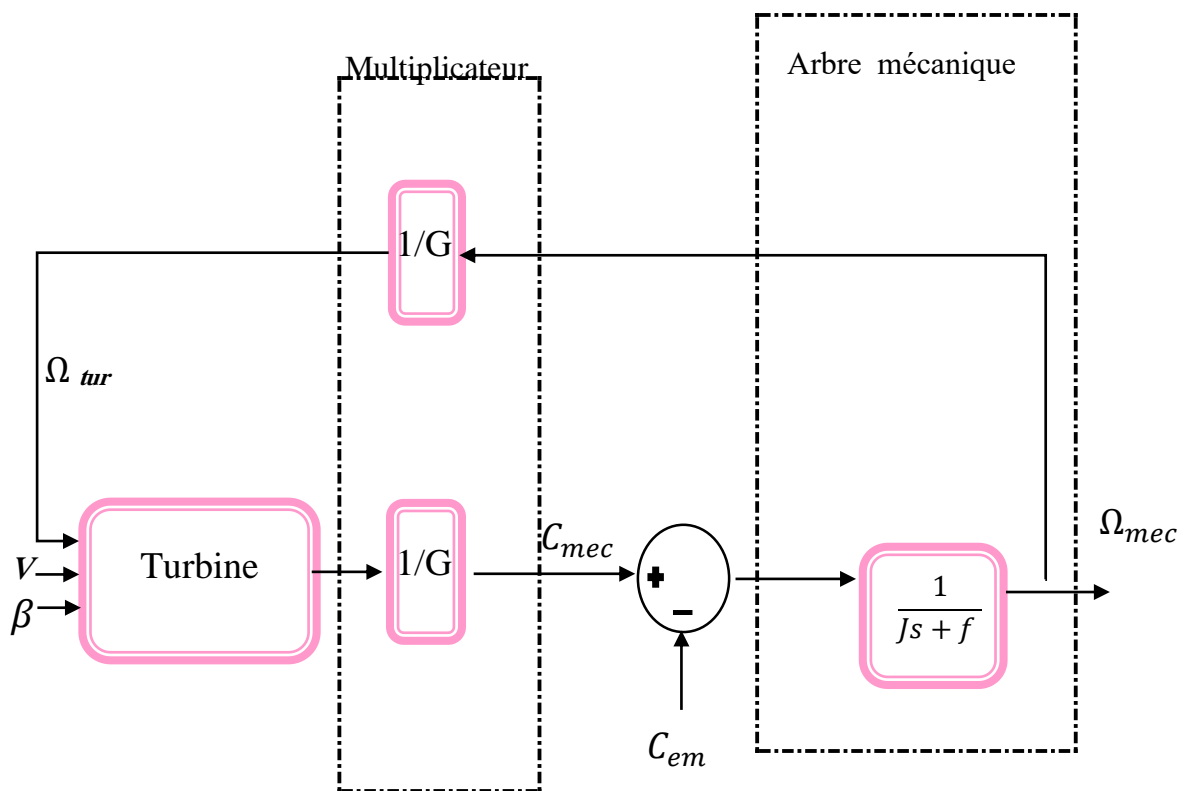


Figure 2.4 : Modèle de l'arbre de l'éolienne

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure 2.4).

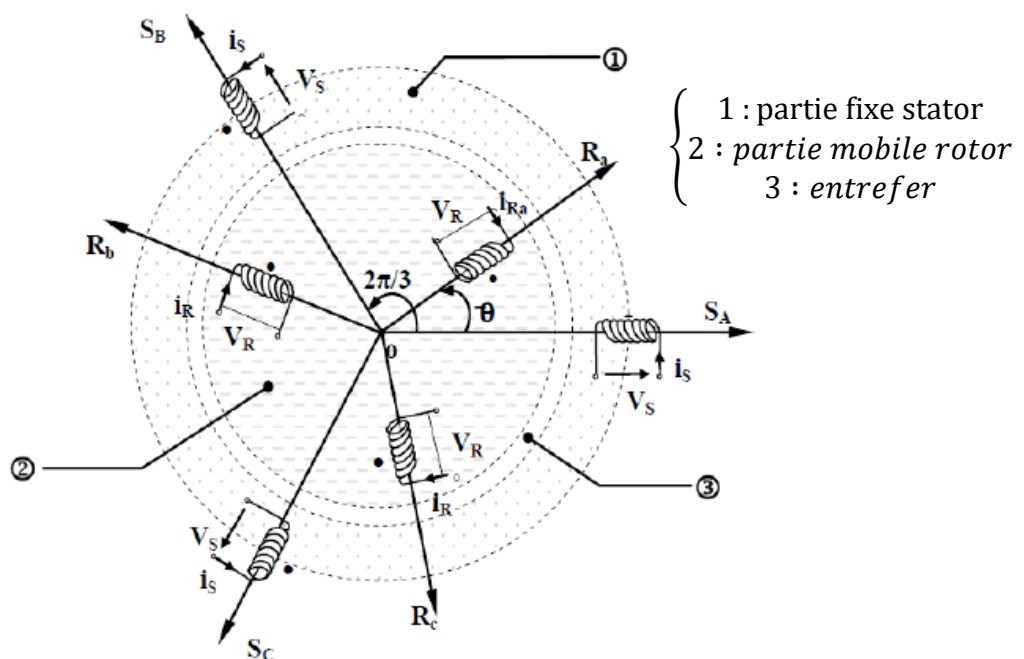
**2.2.2. Modélisation de la partie électrique**

**2.2.2.1. Modélisation de La MADA**

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations. Dans les parties qui suivent nous allons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

- entrefer constant ;
- effet des encoches négligé ;
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte ;
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- pertes ferromagnétiques négligeables.

La figure (2.5) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique.



**Figure 2.5 : Représentation simplifiée de la MADA [23].**



Le modèle mathématique de la MADA est donné par les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.15)$$

Les équations des flux s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec :

$$L_s = L_{fs} + L_m \quad ; \quad L_r = L_{fr} + M^2 L_m$$

Les équations des puissances statoriques :

$$\begin{cases} p_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} p_r = V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \\ Q_r = V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} \end{cases} \quad (2.19)$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimée sous différentes formes données par [20] :

$$\begin{cases} C_{em} = P L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \\ C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \\ C_{em} = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) \\ C_{em} = -P (\varphi_{rd} i_{rq} - \varphi_{rq} i_{rd}) \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2.2.2. Modélisation du convertisseur

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commander à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur. Les interrupteurs peuvent être commandés aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [24].

La figure (2.6) illustre le schéma du convertisseur et du filtre coté réseau.

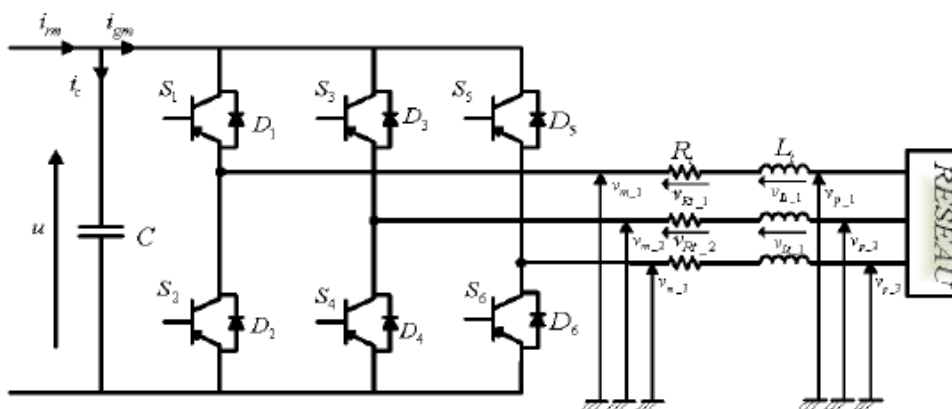


Figure 2.6 : Structure d'un convertisseur triphasé connecté au réseau [3].

On peut faciliter la modélisation en appliquant les hypothèses suivantes :

- Interrupteurs parfaits ;
- Sources parfaites ;

Dans cette partie, nous allons supposer que les interrupteurs sont parfaits : la commutation des interrupteurs est instantanée ; la résistance nulle à l'état passant est infinie à l'état bloqué. De plus, les sources parfaites : la tension continue, nous donne le dipôle, est constante et ne varie pas avec la puissance échangée. En effet, ils sont définis par l'équation suivante [25] :

$$S_j = \begin{cases} +1, \bar{S}_j = -1 \\ -1, \bar{S}_j = +1 \end{cases} \quad \text{pour} \quad j = a, b, c \quad (2.21)$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de  $S_i, U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ . Si on considère que le neutre est non relié on obtient :

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.22)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être écrites par :

$$\begin{cases} u_{ab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ u_{bc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ u_{ca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (2.23)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement du neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Avec :

$$\begin{cases} u_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (2.25)$$

Et, la tension d'entrée du redresseur peut être calculée comme suit :

$$V_n = U_{dc} \left( S_n - \frac{1}{3} \sum_{n-a}^C S_n \right) \quad (2.26)$$

Où :  $S_n = 0$  ou  $1$ , sont l'état des interrupteurs, et  $n=a, b, c$ .

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (2.27)$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (2.28)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{dc} \tag{2.28}$$

Aussi, le courant  $i_c$  est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \tag{2.29}$$

Donc, le coté alternatif du redresseur :

$$\left\{ \begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= e_a - U_{dc} \left( S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left( S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b &= e_b - U_{dc} \left( S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left( S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c &= e_c - U_{dc} \left( S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left( S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{aligned} \right. \tag{2.30}$$

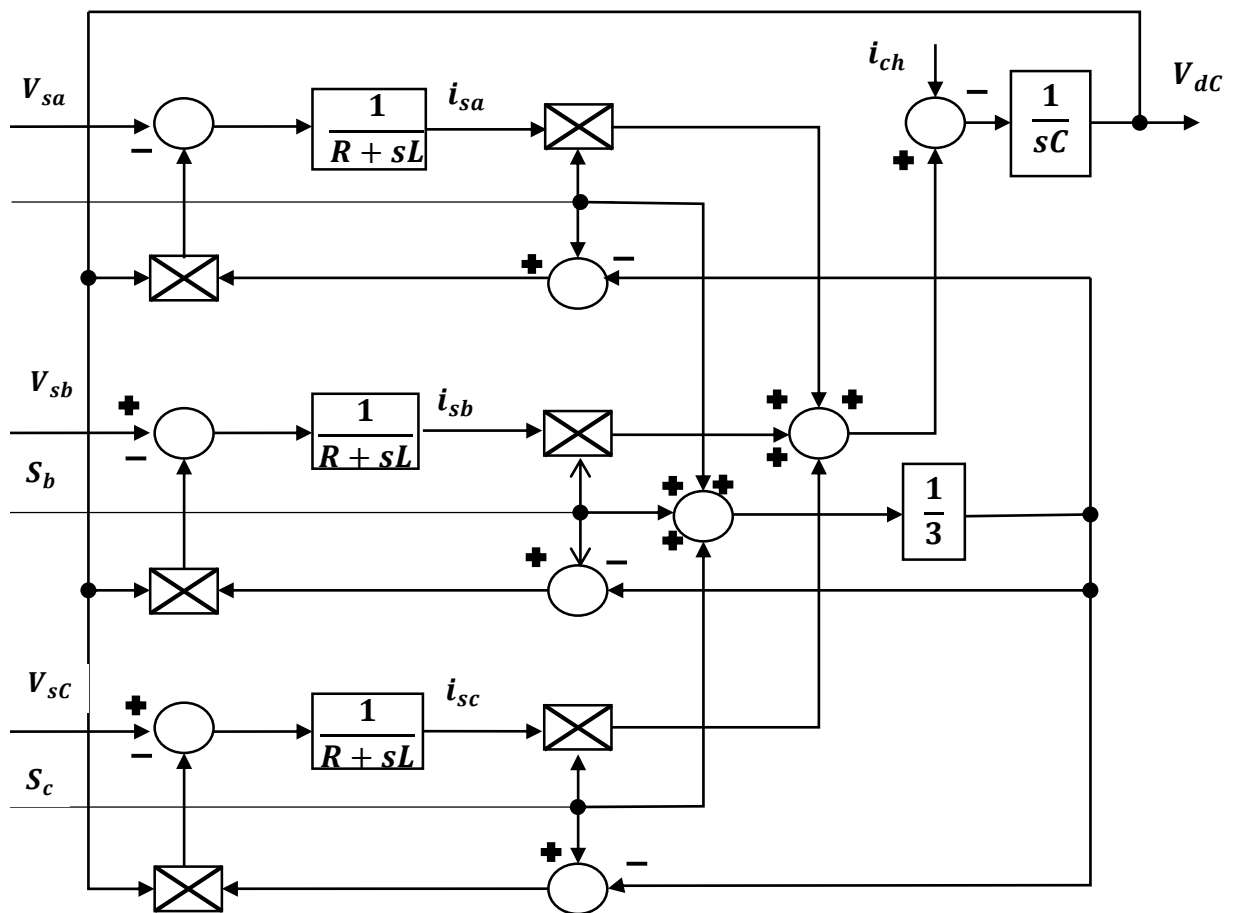


Figure 2.7 : Modélisation du convertisseur dans le repère lié aux axes abc

Les équations dans le repère tournant (d-q) sont données par :

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + v_d \tag{2.31}$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + v_q \tag{2.32}$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \sum_{k=d}^q S_n i_n - i_{ch} = (S_d i_d + S_q i_q) - i_{ch} \tag{2.33}$$

Où :

$$S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \tag{2.34}$$

$$S_q = S_\beta \cos \omega t - S_\alpha \sin \omega t \tag{2.35}$$

La figure de 2.8 montre le schéma fonctionnel du convertisseur dans le repère d-q :

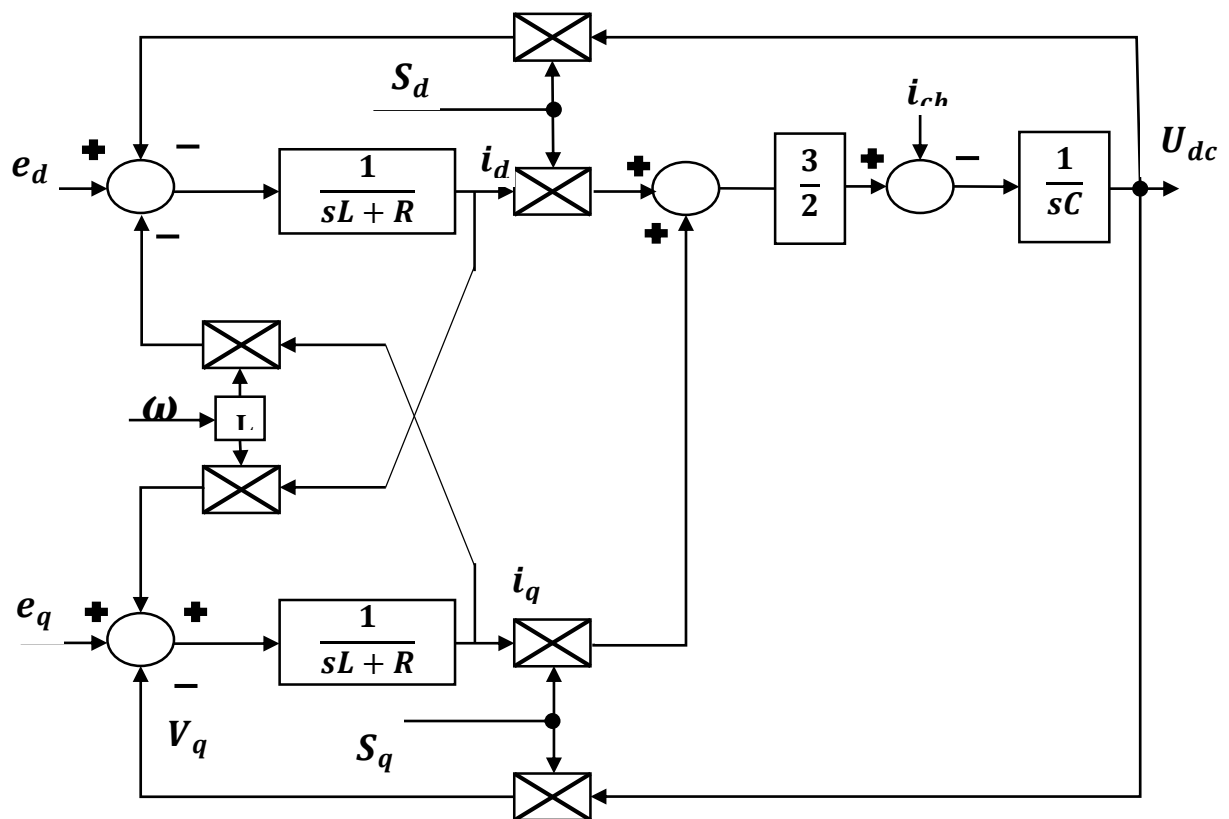


Figure 2.8 Schéma fonctionnel du convertisseur dans le référentiel tournant d-q.

### 2.3. Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon la vitesse du vent en quatre zones (voir figure 2.9) :

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut_{in}}$
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse du générateur atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire  $\beta = 2^\circ$ . Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.
- **Zone 3** : Dans la zone 3 dite à charge partielle 2, la vitesse de la turbine ne doit plus être sous le contrôle MPPT car sa vitesse de rotation peut atteindre environ 90 % de sa valeur nominale  $P_{nom}$ , mais elle doit garder sa vitesse constante jusqu'à ce qu'elle atteigne la puissance nominale [26].
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales (angle de calage), c'est le : pitch control [23]. Au-delà de la vitesse  $\Omega_{cut_{out}}$ , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

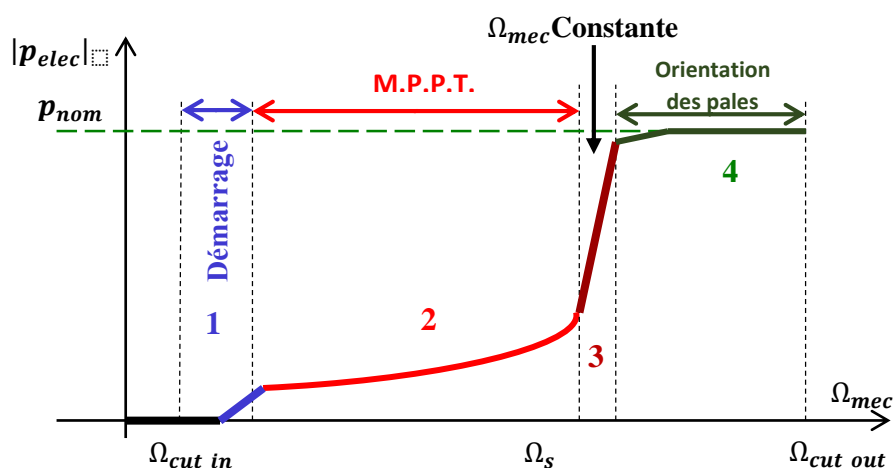


Figure 2.9 : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande

Les courbes de la variation de la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent sont présentées sur la figure 2.10. On s’aperçoit que les maximums sont situés sur les sommets des courbes et que pour chaque valeur de la vitesse du vent correspond un point de puissance maximale. La courbe en verre relie les valeurs optimales pour lesquels la puissance de la turbine est maximale.

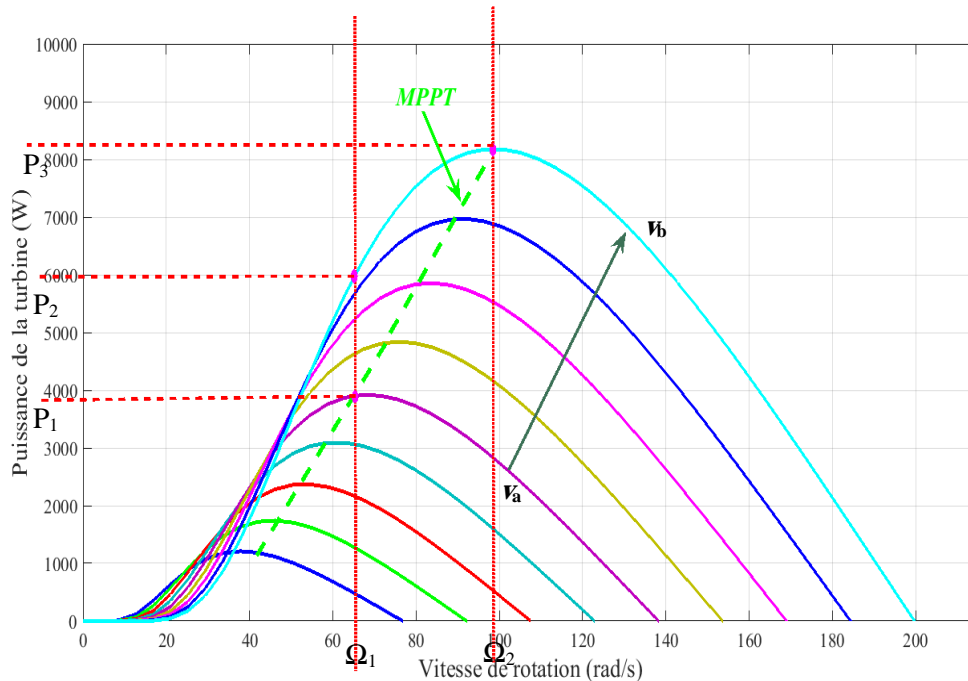
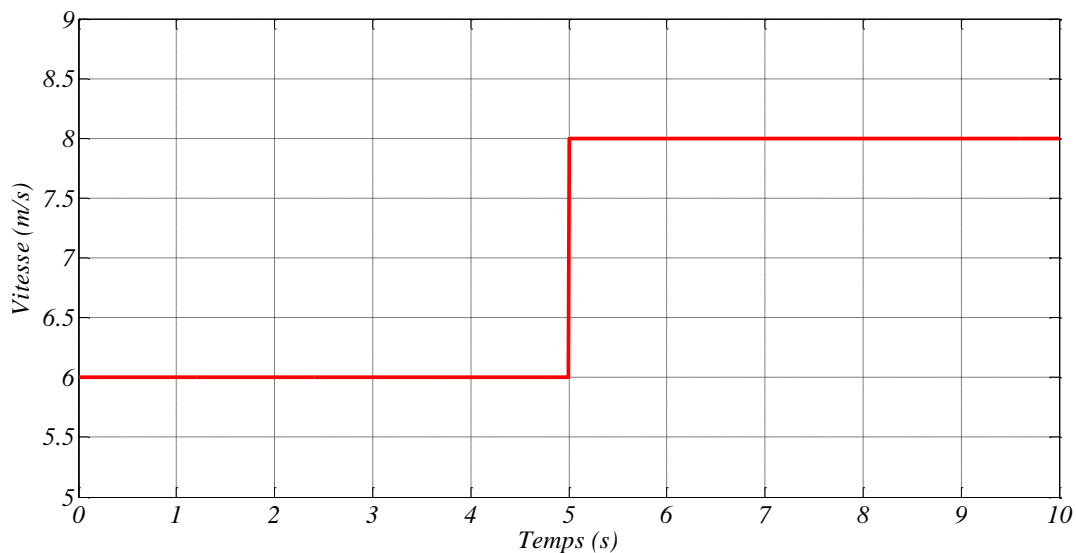


Figure 2.10 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation

La figure 2.10 montre clairement l’avantage crucial des éoliennes fonctionnant à vitesse variable où le surcoût entraîné par la vitesse variable est compensé par le surplus de production [27]. En outre, elles fournissent un rendement énergétique de 10-35% plus élevée comparés aux éoliennes à vitesse constante avec effort mécanique moindre et moins de fluctuations de puissance [28]. Toutefois, si la vitesse du vent varie de la vitesse ( $v_a$ ) vers la vitesse ( $v_b$ ) et la vitesse de rotation de la machine reste fixe à la vitesse ( $\Omega_1$ ), la puissance de la turbine varie de ( $P_1$ ) à ( $P_2$ ) sachant que la puissance maximale est égale à ( $P_3$ ). Par conséquent, pendant que la vitesse de vent change, la vitesse du rotor de l’éolienne doit changer de la vitesse ( $\Omega_1$ ) à la vitesse ( $\Omega_2$ ) afin d’extraire le maximum de puissance. La puissance est maximale lorsque le coefficient de puissance atteint sa valeur optimale ( $C_{popt}$ ). Par conséquent, la vitesse relative doit être égale à sa valeur optimale ( $\lambda_{opt}$ ). Le but est donc de rester constamment au point ( $\lambda_{opt}, C_{popt}$ ). Cette technique se trouve dans la littérature sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

## 2.4. Simulation et interprétation

Dans ce chapitre nous avons considéré un vent variable variant de 6m/s à 8m/s(voir figure 2.11). Nous pouvons remarquer sur la figure 2.12 que la variation de la vitesse du vent influe directement sur la vitesse de rotation de la machine de 1001 tr/mn à 1003.5 tr/mn pour les vitesses 6 m/s et 8 m/s, respectivement. Pour la première vitesse, le couple électromagnétique se stabilise après un régime transitoire à la valeur -0.2 N.m, puis lorsque le vent atteint 8m/s le couple diminue pour atteindre -0.55 N.m. Finalement, la figure 2.14 montre la puissance active. On constate que les échelons de puissances imposés par la commande sont bien suivis par la génératrice.



**Figure 2.11 :** Vitesse du vent (m/s)



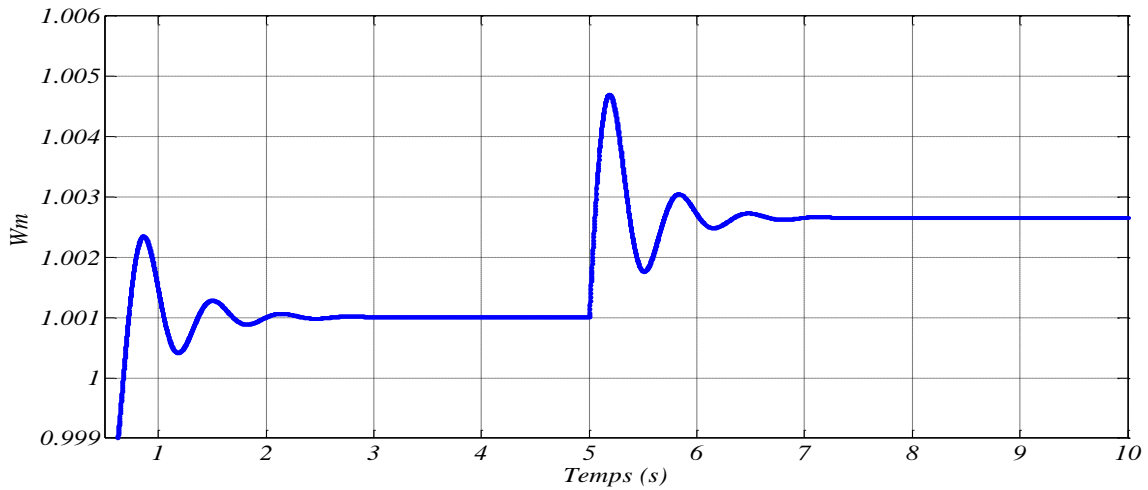


Figure 2.12 : Vitesse de rotation mécanique

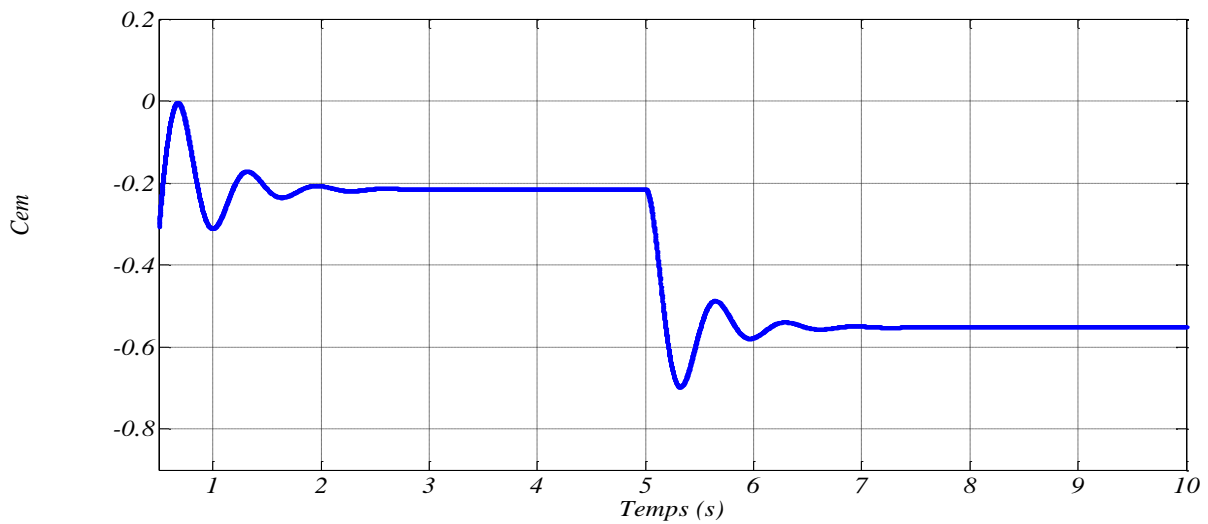


Figure 2.13 : Couple électromécanique (N.m)

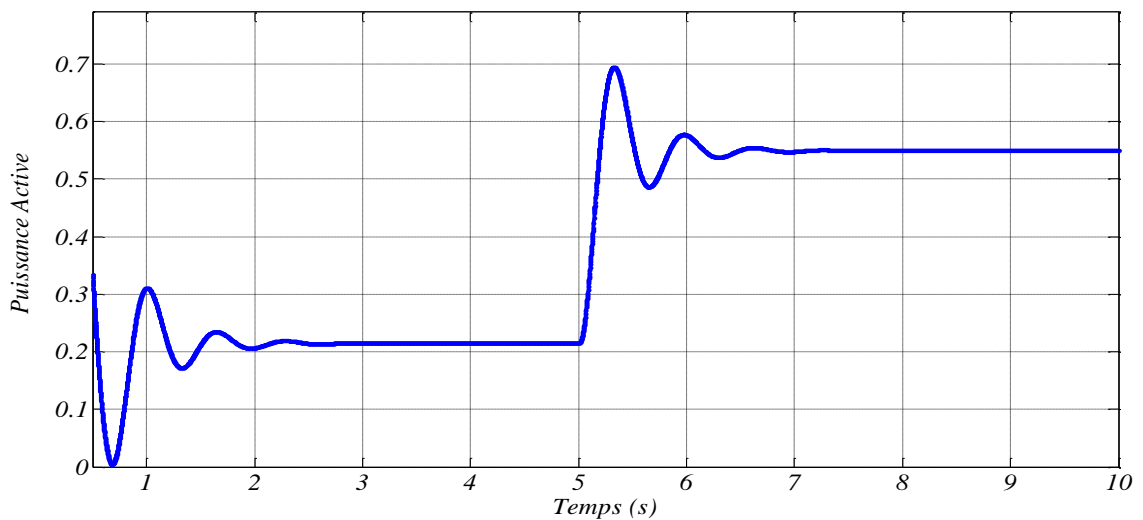


Figure 2.14 : Puissance active (W)

## 2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation a été présentée. La modélisation des différents constituants du système de conversion : partie mécanique et électrique a été développée. En outre, nous avons présenté l'utilisation des systèmes éoliens fonctionnant à vitesse variable. Finalement, en s'est inspiré de la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation pour appliquer une commande séparée des puissances active et réactive. Cette approche permet de régler le facteur de puissance de l'installation et obtenir par conséquent, de meilleures performances. La simulation du comportement de toute la chaîne nous aidera par la suite dans la partie commande et régulation.

---

# Chapitre III

---

# CHAPITRE III

## COMMANDE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION

### 3.1. Introduction

Le système éolien étudié dans ce mémoire est constitué de la turbine, du multiplicateur et de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette dernière est connectée directement au réseau électrique par le stator mais aussi par son rotor au travers d'un dispositif d'électronique de puissance constituée de deux onduleurs de tensions, l'un fonctionnant en mode redresseur et l'autre en mode onduleur. Ces deux convertisseurs, commandés par modulation de largeur d'impulsion MLI [29, 30]. Permettent le changement énergétique entre le réseau et la GADA à la vitesse de synchronisme. Les convertisseurs alimentant le rotor sont, généralement, dimensionnés pour une puissance comprise entre 25 à 30% de la puissance nominale de la GADA [31, 32].. La possibilité de contrôler la puissance active d'une part et la puissance réactive pour imposer le facteur de puissance au point de connexion de la GADA avec le réseau d'autre part, et aussi, l'extraction optimale de la puissance pour des vents faibles et moyens sont les raisons majeures pour lesquelles le choix de cette machine présente une solution très intéressante pour la production des hautes puissances. Ce chapitre traite la commande vectorielle dont le principe consiste à découpler le flux et le couple électromagnétique est considéré.

### 3.2. Commande du système de conversion

Dans cette partie nous présenterons les trois commandes étudiées :

- ✚ La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour l'extraction du maximum de puissance ;
- ✚ La commande du convertisseur coté réseau ;
- ✚ La commande du convertisseur coté machine.

#### 3.2.1. Commande MPPT

Le but principale de cette commande est le réglage de la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite par l'éolienne, et cela, par le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice. Cette stratégie de commande est connue par la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de commandes [33] :

- ✚ Commande avec asservissement de la vitesse de rotation ;
- ✚ Commande sans asservissement de la vitesse de rotation.

Le principe de la stratégie **MPPT** consiste pour un angle de pale donné à ajuster en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal. Nous pouvons donc réécrire l'équation de la façon suivante :

$$\Omega_{tur} = \frac{V_v \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (3.1)$$

### 3.2.1.1. Commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. On suppose que la génératrice et son variateur sont idéaux [34] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{mec} - C_{em} - C_{vis}) \quad (3.2)$$

La stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à le fixer la vitesse à sa valeur référence. Pour réaliser ceci on utilise un asservissement de vitesse. Cet asservissement consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La formule du couple est donnée par l'équation suivante :

$$C_{em}^* = Reg(\Omega_{mec}^* - \Omega_{mec}) \quad (3.3)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse ( $\lambda_{opt}$ ). La vitesse mécanique de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{tur-ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite. Les vitesses de rotation mécanique et de la turbine de références sont données, respectivement, par les formules suivantes :

$$\Omega_{mec}^* = G\Omega_{tur}^* \quad (3.4)$$

$$\Omega_{tur}^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{vent}}{R} \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2. Commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Le problème qui se pose pour la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation est la difficulté de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. En effet, une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation

de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation [35, 36]. La structure de commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas nous pouvons écrire :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = f\Omega_{mec} = C_{mec} - C_{mec} = 0 \quad (3.6)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on aura :

$$C_{mec} = C_{em} \quad (3.7)$$

Fixant la vitesse relative à sa valeur optimal  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir un coefficient de puissance optimal ( $C_{popt}$ ), le couple électromagnétique de référence est donnée par [37] :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{popt} \cdot \rho \cdot \pi R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \Omega_m^2 \quad (3.8)$$

La figure 3.1 illustre le principe de la commande MPPT de la turbine éolienne avec et sans asservissement de la vitesse de rotation :

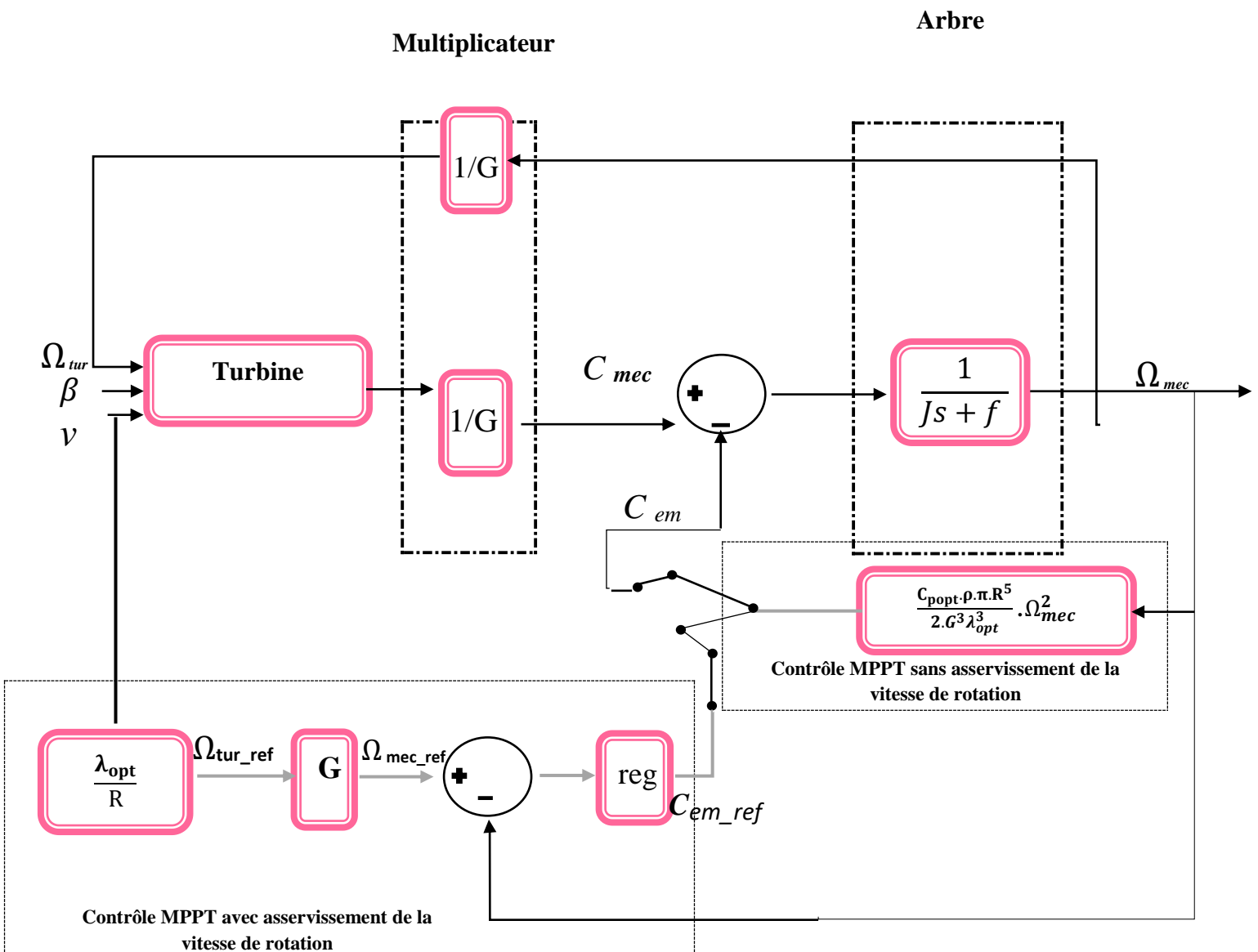


Figure 3.1 : Schéma bloc du control MPPT de la vitesse de rotation

### 3.2.2. Commande vectorielle à flux statorique orienté de la machine

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement producteur de couple. Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.



La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes d-q où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique [38]. Afin de contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [39]. Cette orientation conduit à  $\varphi_{sq} = 0$  &  $\varphi_s = \varphi_{sd}$ .

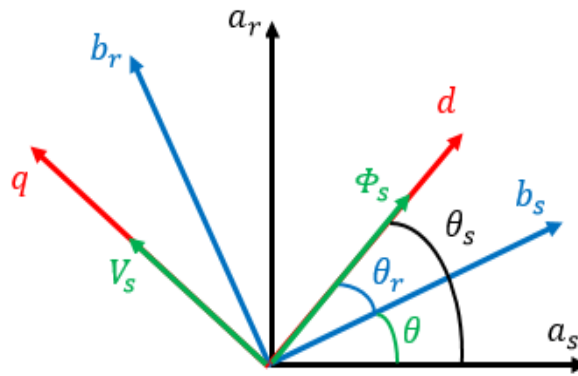


Figure 3.2 : Orientation du flux statorique sur l'axe d [34].

Le couple électromagnétique de l'équation s'écrit alors :

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \cdot I_{rq} \quad (3.9)$$

Et, l'équation des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les tensions statoriques devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \cdot \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3.11)$$

Les tensions rotoriques devient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \cdot \varphi_{rd} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \cdot \varphi_{rq} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.12)$$

Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3.13)$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (3.14)$$

L'équation (3.14) peut être simplifiée comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_s \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (3.15)$$

Remplaçant l'équation des courants statoriques dans l'équation 3.15, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rd} + \omega_r \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.17)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rd} + \omega_r \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.18)$$

Le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique avec :

$$\omega_r = g \cdot \omega_s \quad (3.19)$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$  est minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser [40].

La figure 3.3 présente le schéma bloc du modèle de la machine asynchrone à double alimentation.

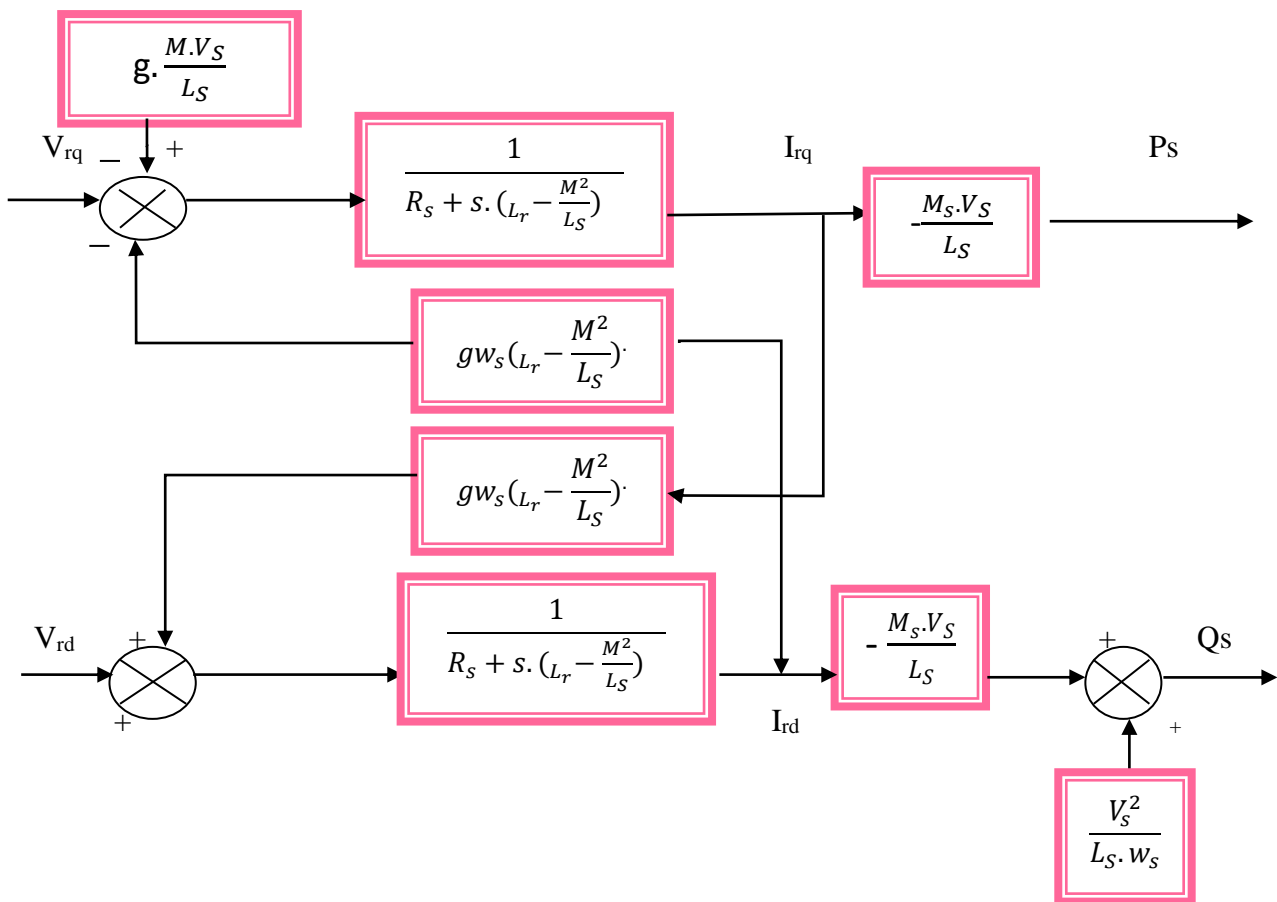


Figure 3.3 : Schéma bloc du modèle de la GADA

### 3.2.3. Commande du convertisseur coté réseau

L'objectif du convertisseur connecté au réseau est de maintenir la tension du bus continu constante et de garantir un fonctionnement avec un facteur de puissance requis. Un contrôle vectoriel est utilisé dans un second repère tournant de Park orienté selon le vecteur tension du réseau de manière à ce que sa composante directe soit nulle ( $V_{sd} = 0, V_{sq} = V_g$ ). Ce contrôle vectoriel permet un contrôle découplé indépendant de la puissance active et réactive circulant entre le réseau et le convertisseur. Les courants sont asservis par deux correcteurs qui génèrent des références des tensions à appliquer ( $V_{td-r\grave{e}f}, V_{tq-r\grave{e}f}$ ). Le courant d'axe en quadrature est utilisé pour réguler la tension du bus continu et celui d'axe direct pour réguler la puissance réactive. Dans ce repère tournant, le modèle du filtre peut être simplifié par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{td} = R_t i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - e_{tq} \\ V_{tq} = R_t i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} + e_{td} \end{cases} \quad (3.20)$$

Où :

$$\begin{cases} e_{tq} = \omega_s L_t i_{tq} \\ e_{td} = \omega_s L_t i_{td} - V_{sq} \end{cases} \quad (3.21)$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère  $dq$  suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes  $dq$ . Les courants de références  $i_{tq-r\grave{e}f}$  et  $i_{td-r\grave{e}f}$  sont, respectivement, issus du bloc de contrôle de la tension du bus continu et du contrôle de la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique [3].

En négligeant les pertes dans la résistance  $R_t$  du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère  $dq$  lié au champ tournant statorique ( $V_{sd} = 0$ ), les puissances échangées à travers le filtre vers le réseau deviennent :

$$\begin{cases} P_t = V_{sq} i_{td} \\ Q_t = V_{sq} i_{tq} \end{cases} \quad (3.22)$$

A partir de ces relations, il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici  $P_{t-r\grave{e}f}$  et  $Q_{t-r\grave{e}f}$ , en imposant les courants de Référence suivants :

$$\begin{cases} i_{td-r\grave{e}f} = \frac{\varphi_{t-r\grave{e}f}}{V_{sq}} \\ i_{tq-r\grave{e}f} = \frac{P_{t-r\grave{e}f}}{V_{sq}} \end{cases} \quad (3.23)$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée ( $\varphi_{t-r\grave{e}f} = 0 \text{VAr}$ ) [3].

**3.2.4. Contrôle de la tension du bus continu**

A partir de l'équation :  $i_c = i_{rm} - i_{gm}$ , nous pouvons exprimer les puissances mises en jeu sur le bus continu [3] :

$$\begin{cases} P_r = V_{dc} i_{rm} \\ P_c = V_{dc} i_c \\ P_g = V_{dc} i_{gm} \end{cases} \quad (3.24)$$

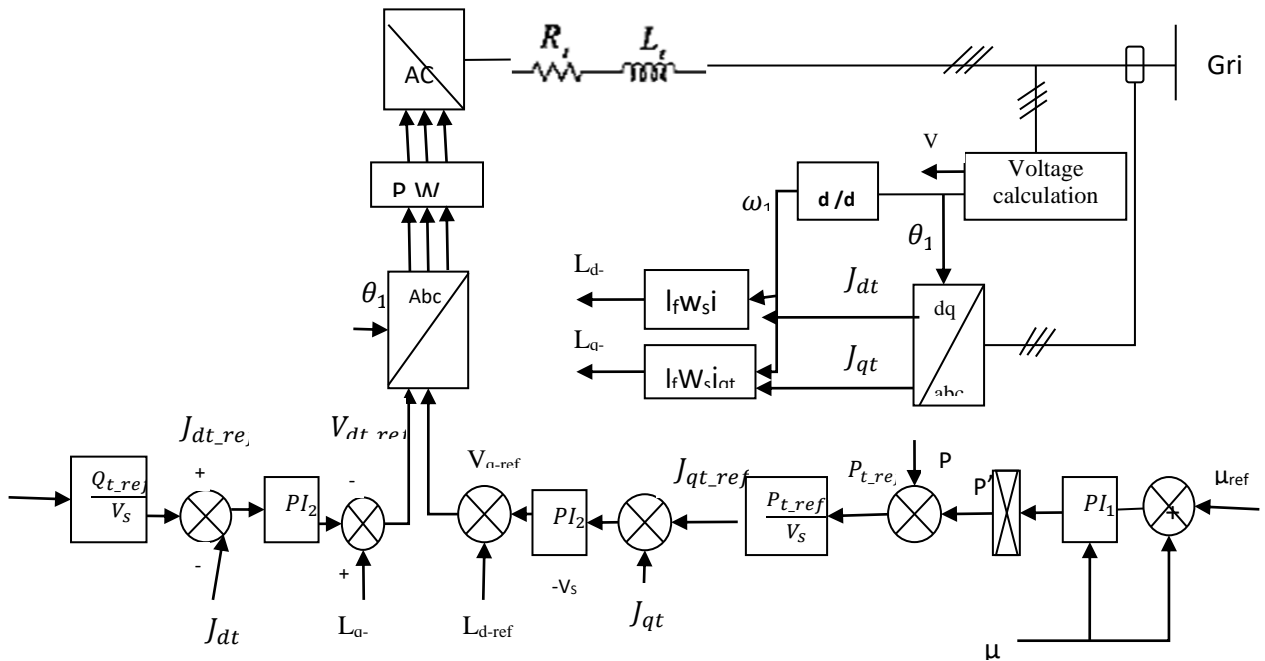
Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_g = P_c + P_r \quad (3.25)$$

Si l'on néglige l'ensemble des pertes Joule devant la puissance échangée entre le rotor de la MADA et le réseau électrique (pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre RL), la puissance issue du réseau ( $P_t$ ) correspond à la puissance issue du bus continu additionnée à la puissance apparaissant dans le circuit rotorique ( $P_r$ , en fonctionnement hyper synchrone) :

$$P_t = u_{ac} i_{ac} + P_r \quad (3.26)$$

Le courant dans la capacité est utilisé pour réguler la tension du bus continu par un régulateur PI.



**Figure 3.4 : Schéma-bloc du contrôle du convertisseur coté réseau**

3.2.5. Contrôle du convertisseur côté machine

Le rôle principal du dispositif de contrôle du convertisseur coté MADA est de régler le transfert des puissances active et réactive à travers le stator de la MADA vers le réseau électrique. Il reçoit les puissances active et réactive de références ( $P_{s-ref}, \varphi_{s-ref}$ ) de l'unité de supervision locale de chaque éolienne et envoie les ordres de commande au convertisseur. Comme montré sur la figure II.14, le schéma bloc du contrôle du convertisseur coté machine est constitué de trois étages ; contrôle de puissance, contrôle de courant et contrôle du convertisseur [41].

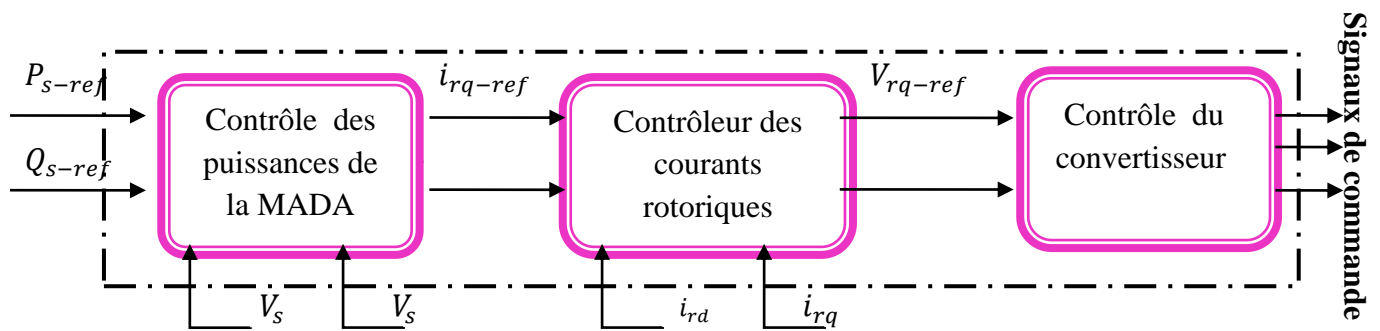


Figure 3.5 : Schéma synoptique du contrôle du convertisseur coté machine

Le contrôle des deux composantes directe et en quadrature des courants rotoriques est assuré par deux régulateurs PI comme il est montré dans la figure 3.6. Les tensions  $V_{rd-ref}$  et  $V_{rq-ref}$  présente les tensions rotoriques de références. La figure 3.5 illustre le schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques d'axe d-q. les courants  $i_{rd-ref}, i_{rq-ref}$  sont les courants de références et qui seront utilisés par la suite pour le contrôle des puissances active et réactive statoriques :

$$\begin{cases} i_{rd-ref} = \frac{\varphi_{sd}}{M} - \frac{L_s}{M \cdot V_{sq}} \cdot Q_{s-ref} \\ i_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M \cdot V_{sq}} \cdot P_{s-ref} \end{cases} \quad (3.27)$$

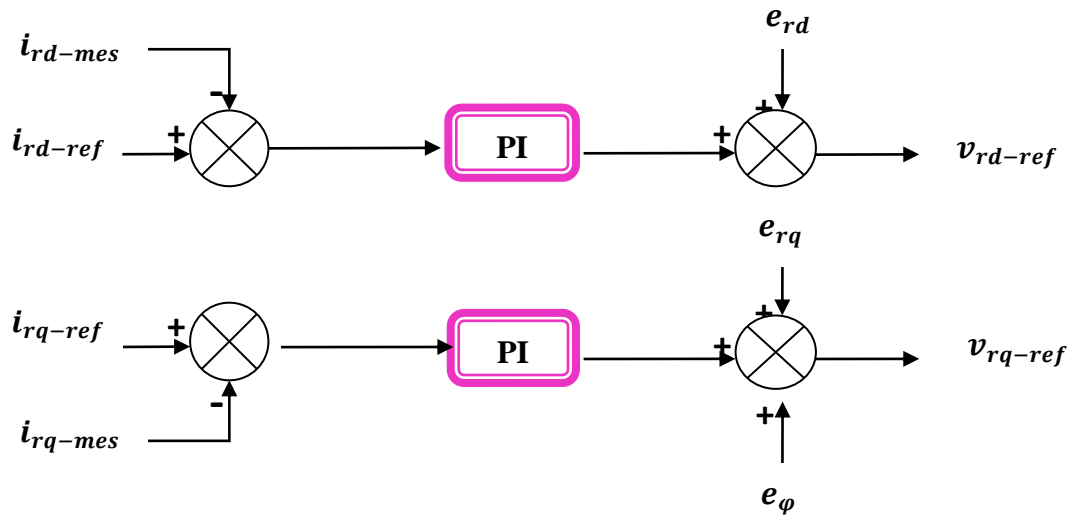


Figure 3.6 : Schéma de principe du contrôle des courants rotoriques

### 3.3. Simulation et Interprétation

La figure 3.7 illustre le schéma bloc décrivant le principe de la commande du système de conversion de l'énergie éolienne. On remarque que pour contrôler, séparément, les courants à travers le filtre et les puissances active et réactive échangées entre le réseau électrique et le convertisseur, le schéma bloc contient un module de découplage et de compensation. Les deux parties : modélisation et commande développées dans ce chapitre ont été illustrées et validées par simulation sous Matlab/Simulink afin d'analyser par simulation la possibilité de contrôler, séparément, les puissances active et réactive. En pratique, une mesure de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Dans ce cas, une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance extraite selon la technique MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation. Pour cela, nous avons opté pour la technique MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation qui correspond à la zone 2.

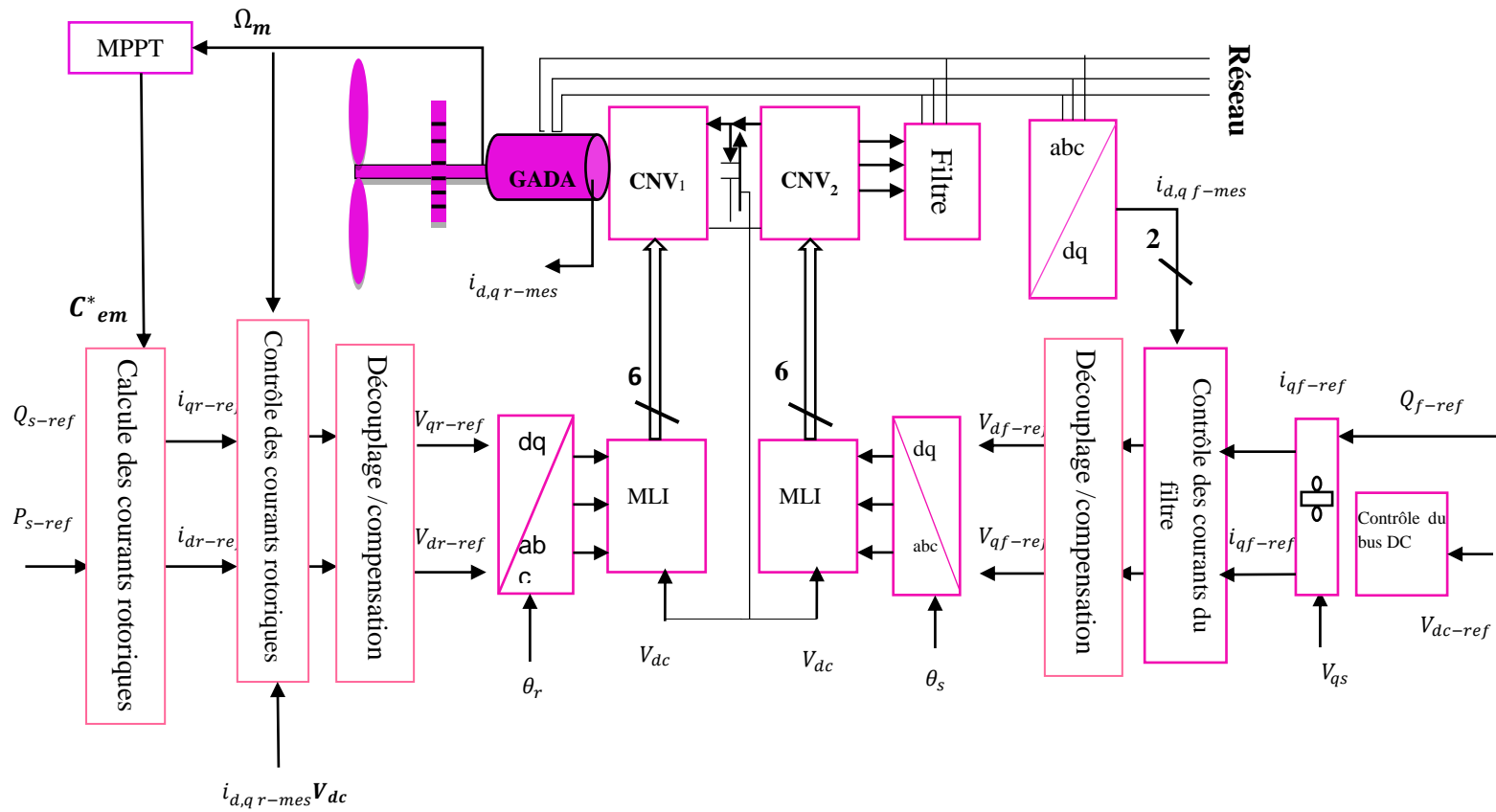


Figure 3. 7 : Schéma block du principe de commande du système de conversion éolien

En outre, les deux convertisseurs sont commandés par modulation de largeur d'impulsion. Pour le contrôle des courants du filtre et du rotor ainsi que le contrôle du bus continu, on a utilisé des régulateurs classiques de type PI. Nous avons choisi la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur.



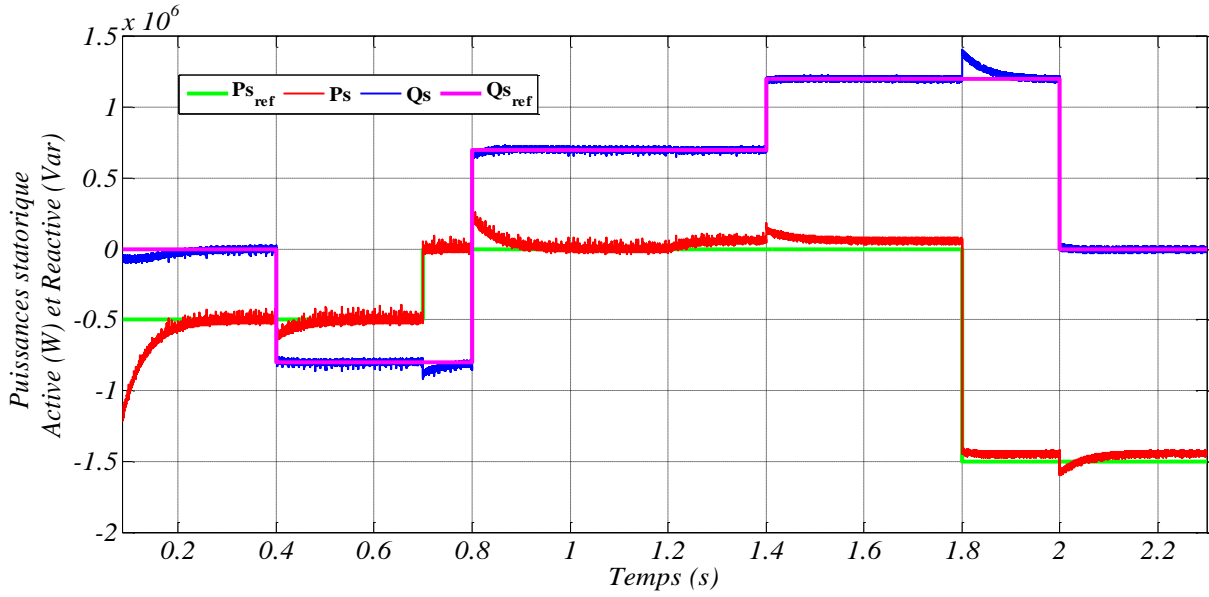


Figure 3. 8 :Puissances Active (W) et Réactive (Var) statoriques

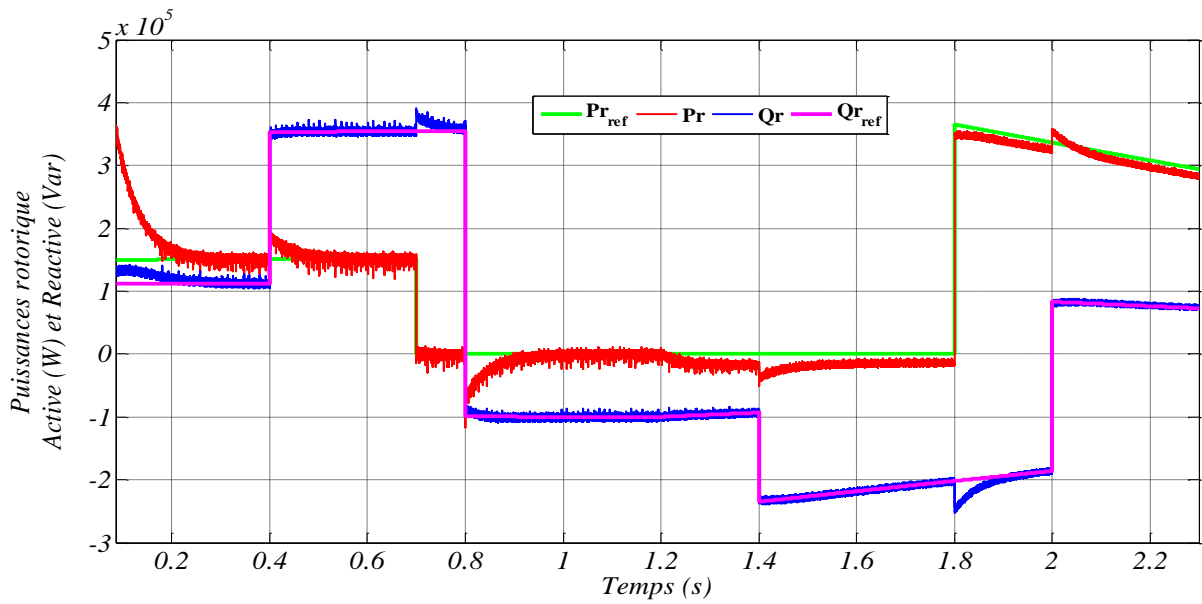


Figure 3. 9 :Puissances Active (W) et Réactive (Var) rotoriques

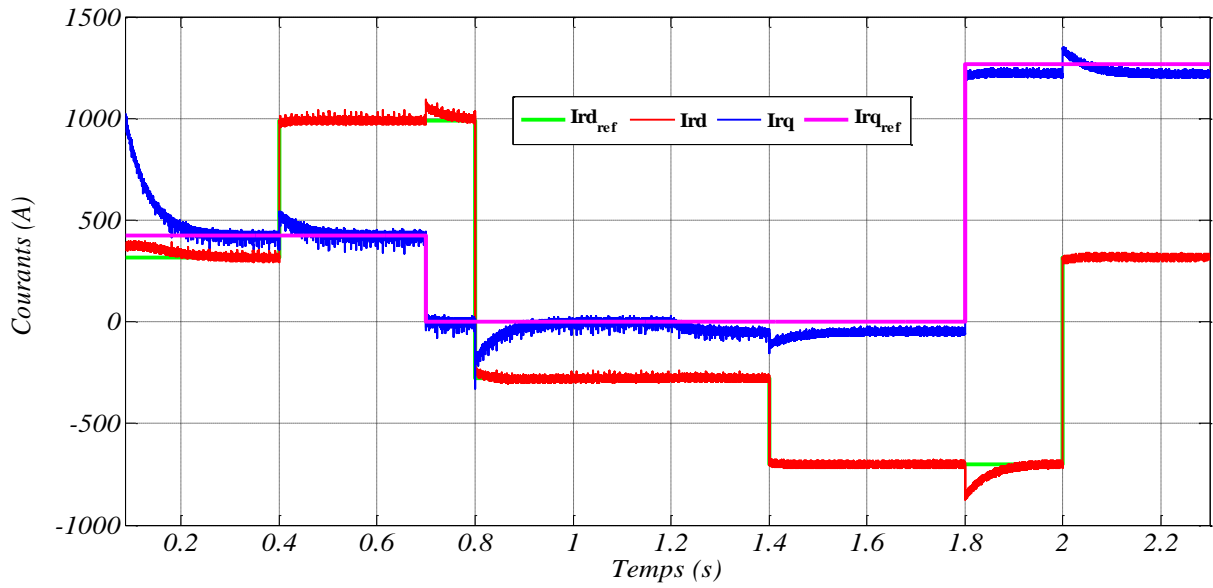


Figure 3. 10 : Courants rotoriques d'axe d et q

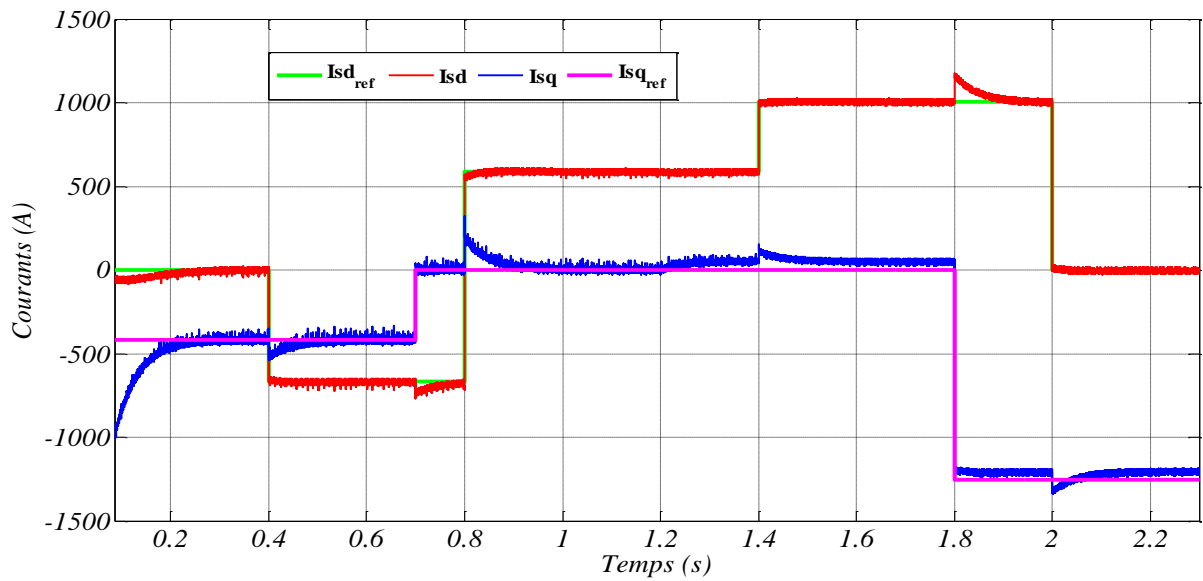


Figure 3. 11 : Courants statoriques d'axe d et q

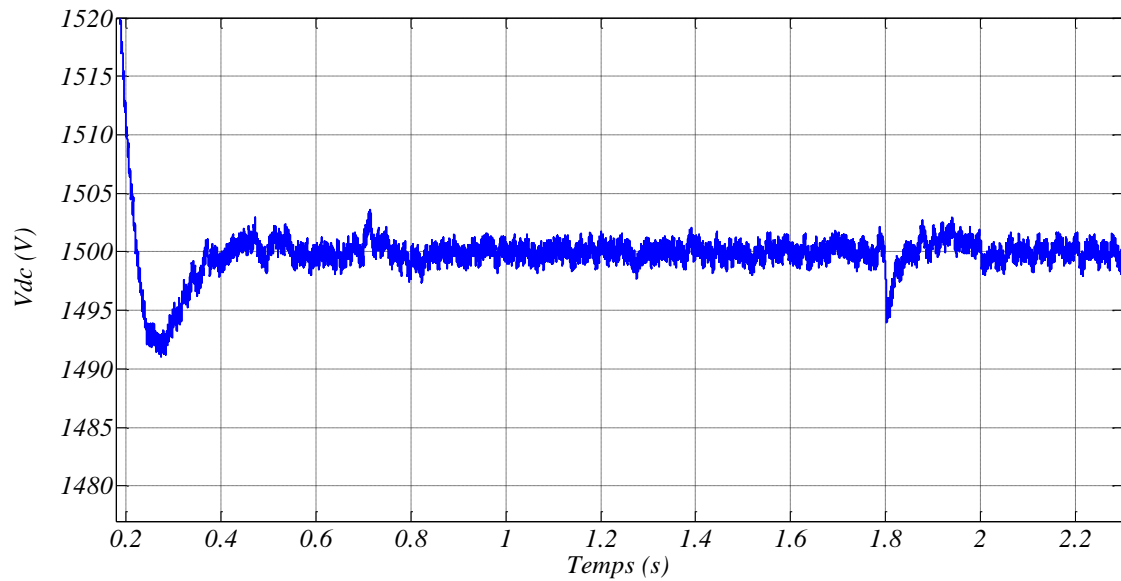


Figure 3. 12 : Tension du bus continu (V)

Les figures de 3.8 à 3.11 représentent les résultats de simulations pour une vitesse de vent de 8 m/s. dans le but d'avoir un facteur de puissance unitaire au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique on fixe la puissance réactive de référence à  $Q_{f-ref}=0$ . Et, on varie la puissance réactive statorique de référence ( $Q_{s-ref}$ ) dans la partie contrôle du convertisseur côté machine. Les figures 3.8 et 3.9 illustrent la variation des puissances active et réactive statoriques ainsi que les puissances active et réactive rotoriques. On remarque que les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  statoriques, suivent parfaitement leurs grandeurs de références  $P_{s-ref}$ ,  $Q_{s-ref}$  présentées sur le tableau 3.1. Pour le premier intervalle de temps  $0 < t \leq 0.4$ , statut 1, on a tenu à montrer le fonctionnement du système éolien avec un facteur de puissance unitaire ( $P_{s-ref} = -0.5$ ,  $Q_{s-ref} = 0$ ). Concernant, le deuxième statut  $0.4 < t \leq 0.8$ , on a changé  $Q_{s-ref}$  à l'instant  $t=0.4s$  puis  $P_{s-ref}$  à l'instant  $t=0.7s$ . Ce qui correspond aux changements non seulement des puissances réactives rotoriques. Mais également, sur les références des courants rotoriques  $i_{rd}$  (figure 3.6). On remarque que, le changement d'une grandeur n'influence pas le changement de l'autre, ce qui démontre que les deux puissances active et réactive peuvent être contrôlées indépendamment grâce aux termes de découplage et de compensation mis en place dans la commande du convertisseur côté réseau. Finalement, on change que  $Q_{s-ref}$  et on maintient  $P_{s-ref}$  constante. Sous ces conditions, on remarque que les puissances active et réactive rotoriques évoluent correctement.

La figure 3.11, présente la tension du bus continu  $v_{dc}$ . Grâce à la partie compensation dans le contrôle du convertisseur côté réseau, on a remarqué que  $v_{dc}$  suit parfaitement sa valeur de référence  $v_{dc-ref}$  ( $V_{dc}=1500$  V). Sachant que les puissances rotoriques ne sont pas découplées contrairement aux puissances statoriques. Toutefois, la variation de la puissance réactive rotorique impose une variation de la puissance active rotorique ce qui implique la variation de la tension du bus continu bien que la compensation dans le contrôle du bus continu affaiblit cette variation.

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit et développé un algorithme de contrôle pour les deux convertisseurs permettant ainsi le contrôle des courants rotoriques et aussi le contrôle de la tension du bus continu tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne. Finalement, les trois types de commande citées auparavant, ont été validés et développés sur une éolienne de 1.5 MW sous Matlab/Simulink pour une vitesse de vent de 8 m/s. A partir des résultats obtenus, on note que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées indépendamment. Au terme de la réalisation de ce projet et la confection de ce document, nous estimons que le travail est d'un intérêt capitale pour notre formation et espérons continuer de s'investir dans le domaine des énergies renouvelables.

---

# Conclusion générale

---

# Conclusion Générale

---

## *Conclusion générale*

Le présent travail a permis de contrôler les puissances d'une génératrice dans une chaîne de production d'énergie éolienne.

L'objectif de notre travail a consisté à modéliser et commander une chaîne de conversion.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'énergie éolienne :

- On a présenté une description sur l'énergie éolienne de manière générale ;
- Quelques notes sur l'évaluation mondiale et en Algérie de l'énergie éolienne ;
- On a étudié les différents types de turbines éoliennes.

Le deuxième chapitre présente la modélisation du système de conversion, on y trouve :

- La modélisation de la turbine se compose de trois pales orientables, le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique et l'arbre relie la partie mécanique avec la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur ;
- Modélisation de la machine à double alimentation (MADA), on procède à la mise en équations de la machine asynchrone afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de Park. Elle permet le passage du repère abc au repère dq ;
- Modélisation du convertisseur redresseur MLI ;
- Etude du fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable et simulation sous l'environnement MatLab /simulink.

Dans le troisième chapitre, on a expliqué la stratégie de la commande MPPT et la commande vectorielle du générateur asynchrone à double alimentation indépendant des puissances active et réactive (commande asservissement +sans asservissement des puissances active et réactive). De plus, on a présenté la commande de redresseur MLI pour contrôler les puissances active et réactive et les courants rotoriques et la tension.

---

# Références

---

## **Références**

---

- [1] S. El- Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes dans un réseau de un réseau de moyenne tension », Thèse doctorat, l'université des sciences et technologies Lille (USTL).
- [2] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », Conference papers IEEE 2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [3] Mokrane Smaili, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération », Mémoire présentée comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université du Québec en Abitibi-Temiscaming, 2013.
- [4] Carla Freitas de Andrade, Hely Falcao Maia Neto, Paulo Alexander Costa Rocha, Maria Eugenia Vieira da Silva, « An efficiency comparison of Numerical methods for Numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of Brazil », Energy Conversion and Management, vol. 86, pp. 801-808, 2014.
- [5] Miguel Lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », thèse de doctorat, Université de Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [6] S. Rehman, « Wind energy resources assessment for Yanbo, Saudie Arabia », Energy Convers Manage, vol. 45, pp. 2019-2032, 2004.
- [7] Maghzel Saliha, « contribution a la modélisation et la commande d'une turbine éolienne » mémoire de magister, Université du 20 aout 1955- Skikda, 2012.
- [8] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei N°36 mars 2004, pp.1-14.
- [9] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril, 2005.
- [10] Redjem Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.



## **Références**

---

- [11] WWEA : World Wind Energy Association. Publication 2012, « World market recovers and sets a new record : 42 GW of new capacity in 2011, total at 239 GW ». En ligne. < <http://www.wwindea.org/home/index.php>> Consulté le 20 février 2012.
- [12] V.Courtesuisse , «Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat en génie électrique Ecole national d'Arts en métiers, 2008.
- [13] [www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-1-algerie-ina...](http://www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-1-algerie-ina...) « L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».
- [14] Naouel Hamdi, «Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [15] K. Abed et H. Benalla F. Kendouli, K. Nabti, «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentaiion, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, No. 1, pp. 109-120.2011.
- [16] Technique de l'ingénieur BM 4 640.
- [17] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, «Eoliennes en milieu urbain -État de l'art», Janvier 2006, pp. 1-129.
- [18] C. Haritza, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M paris, décembre 2003.
- [19] Y. Djeriri, « Commande Vectorielle d'une MADA intégrée à un Système Eolien », Mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, Décembre 2009.
- [20] L. Xu & W. Cheng « Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem », IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.
- [21] R.Mukand patel , « wind and solar power systems» CRC .press, 1999.
- [22] M. smail, A. Benatiallah, « Modélisation d'une chaine de conversion éolienne équipée d'une machine asynchrone double alimentation », Revue des Energies Renouvelables ICESD ,11(2011) 233-238.
- [23] Moussaoui TahaYacine, Hada Mounir « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie Éolienne », Mémoire de master académique, Université d'El-oued, 2015.

## **Références**

---

- [24] Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse doctorat, Ecole national superieur d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 18 décembre 2003.
- [25] S. Belakehal, « Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur département de l'électrotechnique, 2010.
- [26] Mohammed Malki, Said Ali Belarbi, « Etude et simulation d'un aérogénérateur Connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau ) en mode discret », Mémoire de master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [27] K. Belmokhtar , M . L . Doumbia, « Modeling and control of wind system based on doubly fed induction generator for supply power to the electricity grid » , journal of Scientific Research , vol. 2, pp. 54-62, 2010.
- [28] G . L. Johnson, « Wind Energy Systems », Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002. E. Muljadi, C , P , Butterfield, « Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation», IEEE Trans. Ind. Application, vol. 37 , pp. 240-246, 2001.
- [29] J . A. Baroudi , V . Dinavahi, A. M . Knight, « A review of power converter topologies for wind generators », Renewable Energy , vol. 32, no. 14, pp. 2369-2385, 2007.
- [30] Vidal, Paul-Eolienne, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [31] Sejjir Khojet et Khil, « Commande vectoriel d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) : Optimisation des pertes dans les convertisseurs Reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [32] M. J. Zandzadeh, A. Vahedi, « Modeling and improvement of direct power control of DFIG under unbalanced grid voltage condition », Electrical Power and Energy Systems, vol.59, pp. 58-65 , 2014.
- [33] A. Evans, V. Strezov, TJ. Evans, « Assessment of sustainability indicators for Renewable energy technologies », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n°. 5, pp. 1082-1088, 2009.

## **Références**

---

- [34] Anes Sahraoui, Abdelhafid Rekiouk, « Commande des puissance actives et réactives d'une éolienne basée sur une MADA »,Mèmoire de Master ,Université AbouBeker Belkaid Tlemcen UABT, 17 juin 2017.
- [35] A.Boyette , « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [36] M.Bouaraki, « Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbin éolienne à vitesse variable : Application sur un site à Tindouf», Thèse de magister de l'Université M'hamedbougara, boumardas, 2011.
- [37] K. Bedoud, M. Ali-Rachedi, R, Lakel, T. Bahi, « Modeling and Control of the Wind Energy Conversion Systems Based on DFIG Under Sub – and Super –Synchronous Operation Modes », Proceeding of Engineering & Technology (PET), V. 9, ISSN: 2356-5608, Copyright – IPCO 2015.
- [38] A. Ben Amar, « Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA », Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Hadj Lakhdar Batna, 2009.
- [39] A. Boyette. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat, de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. 2006.
- [40] F. Poitiers, « Etude 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 présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat , Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 2003.
- [41] Tarak Ghennam , « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'une réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes a base de machine asynchrone a double alimentations » , Thèse doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger , Ecole Centrale de Lille , 2011.