

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique**

## **Mémoire de fin de cycle**

**En vue d'Obtention du Diplôme Master en électrotechnique  
Option : énergies renouvelables**

# *Thème*

**Comportement d'une turbine à base d'une MADA  
vis-à-vis d'une perturbation provenant du réseau électrique**

Présenté par:

- TACHERFIOUT Fatsah
- ZIDANE Adel

Encadré par :

M<sup>er</sup> H.Bekka

Les membres de juré

- M<sup>er</sup> K.Idjdarene
- M<sup>er</sup> Z.Boudries

Année universitaire : 2013-2014

# Remerciement

*Nous remercions celui qui nous a protégé, accordé  
courage et patience, jusqu'à mener " la graine au fruit"  
nous inclinons pour dire "dieu merci"*

*Gloire à son nom pour toujours.*

*Nos remerciements les plus chaleureux et notre  
reconnaissance s'adresse également à notre promoteur*

*M : H Bekka pour son aide, son orientation, sa  
disponibilité et ses précieux conseils.*

*On remercie vivement les membres de jury qui ont  
accepté de juger ce travail.*

*Enfin, merci à toutes personnes qui de près ou de loin  
ont contribué à la réalisation de ce travail, nous leur  
exprimons notre profonde gratitude.*

*igracias*

**« L'imagination est plus importante que le savoir ».**

**« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi ».**

**Albert EINSTEIN**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à....*

*Celle qui a illuminé mon long chemin, qui a sacrifié sa vie à ses  
enfants..... à ma très chère mère*

*Celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait  
toujours le grand homme..... à mon très cher père*

*A Mes chers frères et à ma chère sœur et tantes et oncles*

*Tous les enseignants qui m'ont formée depuis le premier jour de ma  
scolarité*

*Tous ceux qui nous ont prêté main forte pour la réalisation de ce travail*

*Tous les gens que j'aime et qui m'aiment.*

*Fatsah*

# Dédicaces

*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

- + Une pensée à mon grand-père Mohand qui est mort lahe yarahemou*
- + A mon autre grande père et mais deux grande mère, que dieu les protèges et les entoure de sa bénédiction.*
- + A mes chères frères sofiane, fahime, yacine et youba.*
- + Sans oublier Rjad et Nassim*
- + A mes chères sœurs sabrina, rabia et sabiha. (Que Dieu les gardes pour moi).*
- + A mon oncle et sa femme.*
- + A mes chères cousin rahir ,massi est ma cousine nawel.*
- + A mes chères amis : fatsah, Massi, Said, salem, loucif, Rachide, Ali, lyes, sofiane, hamou, rahim ,hcinou*
- + A mon chère Ami et Co-binôme fatsah pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passé ensemble et à sa famille.*

*Adel*

# Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Etat de l'art de l'énergie éolienne

Introduction

I.1 Généralités sur les éoliennes .....	1
I.1.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	2
I.1.2 Les différents types d'éoliennes .....	2
I.1.2.1 Les éoliennes à axe vertical .....	2
I.1.2.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	4
I.1.3 Principaux composants d'une éolienne .....	5
I.1.3.1 Le mât ou la tour .....	6
I.1.3.2 La nacelle .....	6
I.1.3.3 Le multiplicateur .....	6
I.1.3.4 Le système de refroidissement .....	6
I.1.3.5 La génératrice électrique .....	6
I.1.3.6 Le système de commande .....	6
I.1.3.7 L'arbre .....	6
I.1.3.8 Le système d'orientation des pâles .....	6
I.1.4 Les systèmes de régulation .....	6
I.1.5 Les éoliennes en fonctionnement autonome .....	7
I.1.6 Les éoliennes connectées au réseau électrique .....	8
I.1.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe .....	8
I.1.6.2 Les éoliennes à vitesse variable .....	9
I.1.6.2.1 Eolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation .....	9
I.1.6.2.2 Eolienne basée sur la machine synchrone à aimants permanents .....	9
I.1.7 Avantages et Inconvénients des éoliennes .....	10
I.2 Etude de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	11
I.2.1 Double alimentation par le stator .....	11
I.2.2 Double alimentation par le stator et le rotor .....	12
I.2.3 Bilan de puissance .....	13
I.2.3.1 Fonctionnement moteur ( $P_m > 0$ ) hyper-synchrone ( $g \leq 0$ ) .....	13
I.2.3.2 Fonctionnement moteur ( $P_m > 0$ ) hypo-synchrone ( $g \geq 0$ ) .....	13
I.2.3.3 Fonctionnement générateur ( $P_m < 0$ ) hyper-synchrone ( $g \leq 0$ ) .....	13
I.2.3.4 Fonctionnement générateur ( $P_m < 0$ ) hypo-synchrone ( $g \geq 0$ ) .....	13

I.2.4 Avantages et Inconvénients de la MADA.....	13
I.2.5 Dispositif de commande d'une chaîne de conversion éolienne .....	14
I.2.5.1 Le schéma de la chaîne de conversion éolienne .....	14
I.2.5.2 L'algorithme M.P.P.T.....	15
I.2.5.3 La commande vectorielle de la MADA.....	15
I.2.5.4 Le contrôle de convertisseur MLI 1 .....	15
I.2.5.5 Le contrôle de convertisseur MLI 2 .....	15
I.3 Intégration d'une éolienne a un réseau électrique.....	15
I.3.1 Perturbation de la tension.....	15
I.3.1.1 Fluctuations de tension .....	16
I.3.1.2 Les variations de tension .....	16
I.3.1.3 Les creux de tension .....	16
I.3.1.3.1 Caractérisation des creux de tension .....	16
I.3.1.3.2 Classification des creux de tension.....	17
I.3.2 Influence de l'éolienne sur un réseau de distribution .....	20
I.3.2.1 Effets sur les flux de puissance.....	20
I.3.2.2 Effets sur la tension .....	20
I.3.2.3 Effets sur le plan de protection .....	21
I.3.2.4 Effets sur les puissances de court – circuit.....	21
I.3.2.5 Capacité d'accueil du réseau public de transport .....	22
I.3.2.6 Prévision de la production .....	22
I.3.2.7 Déconnexions intempestives .....	23
I.3.3 Possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien .....	24
I.3.4 Influence d'un réseau de distribution sur l'éolienne .....	24

## Conclusion

## Chapitre II : Modélisation et étude du système de conversion

### Introduction

II.1 Modélisation de la turbine éolienne.....	26
II.1.1 L'énergie disponible .....	26
II.1.2 L'énergie récupérable .....	27
II.1.3 La théorie de BETZ .....	27
II.1.4 La limite de BETZ .....	29
II.1.5 Production d'énergie mécanique.....	30
II.1.6 La stratégie de la commande MPPT .....	31



---

II.1.7 Système d'orientation des pales.....	32
II.1.7.1 Principe de fonctionnement.....	33
II.1.7.2 Procédure de limitation de puissance .....	33
II.1.7.3 Modélisation du système d'orientation des pales.....	34
II.1.7.4 Intégration de la boucle de régulation dans le schéma globale .....	35
II.1.7.5 Solution analytique pour la génération de l'angle de calage.....	35
II.1.7.6 Démonstration du processus.....	35
II.2 Modélisation de la partie électrique.....	36
II.2.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation .....	36
II.2.2 Modélisation de la MADA .....	36
II.2.2.1 Hypothèse simplificatrice.....	36
II.2.2.2 Modèle de la MADA dans le repère abc .....	37
II.2.2.3 Modèle de la MADA dans le repère de PARK .....	40
II.2.3 Modèle de la MADA en vu de la commande .....	41
II.2.3.1 Choix du référentiel.....	41
II.2.3.2 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques .....	42
II.2.3.3 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques .....	43
II.2.3.4 La commande direct .....	43
II.2.3.5 Synthèse du régulateur PI.....	44
II.2.4 Modélisation des convertisseurs statiques .....	45
II.2.4.1 modélisation du redresseur MLI .....	46
II.2.4.2 modélisation du filtre de bus continu .....	47
II.2.4.3 Modélisation de l'onduleur MLI .....	48
II.2.4.4 Commande MLI des convertisseurs .....	49
II.3 Résultats de simulation .....	49
II.4 Interprétation des résultats de simulation .....	55
Conclusion	
Chapitre III : Comportement de l'éolienne face à un creux de tension	
Introduction	
III.1 Comportement de l'aérogénérateur face un creux de tension provenant de réseau .....	60
III.2 Résultats de simulation.....	62
III.3 Interprétation des résultats de simulation.....	66
III.4 L'analyse du comportement des grandeurs internes de l'aérogénérateur .....	67

Conclusion

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe

*Liste des figures*

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	2
Figure I.2: Eoliennes à axe vertical de type Darrieus .....	3
Figure I.3: Effet du vent sur un corps creux .....	4
Figure I.4: Le rotor de Savonius.....	4
Figure I.5: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.....	5
Figure I.6: Constitution d'une éolienne à axe horizontal .....	5
Figure I.7: Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.....	8
Figure I.8: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.....	9
Figure I.9: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.....	10
Figure I.10: Machine asynchrone à double bobinage statorique.....	11
Figure I.11: Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.....	12
Figure I.12: Schéma représente les 4 modes de fonctionnement de la MADA .....	13
Figure I.13: Schéma de la chaine de conversion éolienne .....	14
Figure I.14 : Caractéristique d'un creux de tension .....	16
Figure I.15: Gabarit des creux de tension.....	17
Tableau I.1 : Sept types de défaut causant un creux de tension.....	17
Figure I.16: Modification des puissances de court – circuit.....	22
Figure I.17: Gabarit de tension auquel doivent satisfaire les éoliennes connectées au réseau de répartition. ....	23

Figure II.1: colonne d'air.....	26
Figure II.2: caractéristiques $C_p(v)$ .....	27
Figure II.3: Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur .....	28
Figure II.4: Schéma bloc fonctionnel de la turbine éolienne avec MPPT .....	32
Figure II.5: Exemple d'actionneur d'angle d'orientation des pales.....	33
Figure II.6: Modélisation du système de régulation de l'angle de calage .....	34
Figure II.7: Schéma bloc simplifié du système d'orientation des pales .....	35
Figure II.8: Structure de la MADA.....	36
Figure II.9: Représentation de la MADA dans l'espace électrique .....	37
Figure II.10: Schema bloc de la Commande directe .....	44
Figure II.11: système régulé par un PI .....	44
Figure II.12: MADA alimentée par des convertisseurs a MLI .....	46
Figure II.13: Redresseur MLI.....	46
Figure II.14: Représentation du filtre .....	47
Figure II.15: Représentation schématique d'un onduleur MLI .....	48
Figure II.16: Profil de vent .....	49
Figure II.17: Vitesse mécanique de l'éolienne.....	50
Figure II.18: Le glissement de la machine .....	50
Figure II.19: Puissance de l'éolienne .....	51
Figure II.20: Coefficient de puissance .....	51

Figure II.21: Allure de la vitesse spécifique .....	52
Figure II.22: Allure de l'angle de calage Beta .....	52
Figure II.23: Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de vent .....	53
Figure II.24: Puissance active rotorique .....	53
Figure II.25: Puissance active rotorique pour $g > 0$ , $g \rightarrow 0$ et $g < 0$ .....	54
Figure II.26: Puissance réactive du stator .....	54
Figure II.27: Puissance active transmise au réseau .....	55
Figure II.28: Tension et Courant d'une phase rotorique .....	55
Figure II.29: Tension et Courant du réseau .....	56
Figure II.30: Allure de couple électromagnétique .....	56
Figure II.31: Allure des courants statoriques .....	57
Figure II.32: Allure des courants rotoriques .....	57
Figure III.1: profils de creux de tension dans différents pays européens. ....	61
Figure III.2: Gabarit et Type du creux de tension appliqué à la chaîne de conversion. ....	61
Figure III.3.A: Tension du réseau sans l'apparition du défaut .....	62
Figure III.3.B :Tension du réseau avec l'apparition du défaut .....	62
Figure III.4: Vitesse mécanique de l'éolienne durant le défaut .....	63
Figure III.5: Le couple électromagnétique de la machine durant le défaut .....	64
Figure III.6: La tension du bus continue durant le défaut .....	64
Figure III.7: Le courant d'une phase statorique durant le défaut .....	65

Figure III.8: Le courant d'une phase rotorique durant le défaut..... 65

Figure III.9: Composante du flux statorique directe et quadrature ..... 65

**A-PRINCIPALES ABRÉVIATION :**

**MADA** : Machine Asynchrone a Double Alimentation.

**MSAP** : Machine Asynchrone à aimant Permanent.

**GE** : Générateur Electrique.

**MSA** : Machine Asynchrone.

**GADA** : Génératrice Asynchrone a Double Alimentation.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion.

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.

**RTE**: Gestionnaire du réseau de transport d'électricité français.

**B-PRINCIPALES NOTATIONS :**

$\Omega_t$  : La vitesse de la turbine hydrolienne (tr/mn)

$\Omega_{mec}$  : Vitesse mécanique (tr/mn)

$C_t$  : Couple de la turbine (N .m)

$C_{mec}$  : Couple mécanique (N.m)

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m)

$C_g$  : Couple de la génératrice(N.m)

$C_p$  : Coefficient de puissance

$J_g$  : Inertie de la génératrice (K. m<sup>2</sup>)

$J_t$  : Inertie de la turbine(Kg.m<sup>2</sup>)

$J$  : Moment d'inertie totale(Kg.m<sup>2</sup>)

$f$  : Coefficient de frottement dynamique (N.m.s/rd)

$\lambda$  : Rapport de la vitesse en bout des pales

$\rho$  : Masse volumique de l'air (Kg/m<sup>3</sup>)

$R$  : Rayon de la turbine hydrolienne (m<sup>2</sup>)

$S$  : Surface balayée par la turbine hydrolienne (m<sup>2</sup>)

$\beta$  : L'angle de calage des pales (°)

G	: Gain de multiplicateur de vitesse
m	: Masse d'air ( $\text{Kg/m}^3$ )
P <sub>c</sub>	: Puissance cinétique de la masse d'air (Watt)
P <sub>g</sub>	: Puissance disponible sur l'arbre du générateur électrique (Watt)
P	: Puissance mécanique (Watt)
P <sub>S</sub>	: Puissance transmise par le réseau électrique au stator (Watt)
P <sub>r</sub>	: Puissance transmise par le réseau électrique au rotor (Watt)
P <sub>mec</sub>	: Puissance mécanique de la turbine hydrolienne (Watt)
P <sub>s</sub>	: Puissance active statorique (watt)
Q <sub>s</sub>	: Puissance réactive statorique(VAR)
g	: Glissement
V <sub>a</sub> , V <sub>b</sub> , V <sub>c</sub>	: Tension de réseau électrique. (a,b,c) (V)
V <sub>sa</sub> , V <sub>sb</sub> , V <sub>sc</sub> (V)	: Tensions d'alimentation des enroulements statorique (A ,B,C)
V <sub>ra</sub> , V <sub>rb</sub> , V <sub>rc</sub>	: Tension d'alimentation des enroulements rotoriques (a , b, c)(V)
i <sub>sa</sub> , i <sub>sb</sub> , i <sub>sc</sub>	: Courants statoriques(A)
i <sub>ra</sub> , i <sub>rb</sub> , i <sub>rc</sub>	: Courants rotoriques(A)
R <sub>s</sub>	: Résistance statorique ( $\Omega$ ) par phase
R <sub>r</sub>	: Résistance rotorique ( $\Omega$ ) par phase
L <sub>s</sub> , L <sub>r</sub>	: Inductance propre d'une phase statorique et rotorique(H)
l <sub>s</sub> , l <sub>r</sub>	: Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine(H)
M <sub>S</sub>	: Inductance mutuelle entre deux phases du stator (H)
M <sub>r</sub>	: Inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H)
M	: Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celle du rotor(H)



$M_{sr}$	: La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique (wb)
$\omega_r$	: Pulsation du champ rotorique (rd/s)
$\omega_s$	: Pulsation du champ statorique (rd/s)
$V_{ds}, V_{qs}$	: Tensions statoriques dans le repère de Park (d ,q) (V)
$V_{dr}, V_{qr}$	: Tensions rotoriques dans le repère de Park(d,q) (V)
$i_{ds}, i_{qs}$	: Courants statoriques dans le repère de Park(d,q) (A)
$i_{dr}, i_{qr}$	: Courants rotoriques dans le repère de Park(d,q) (A)
$\Phi_{dr}, \Phi_{dr}$	: Flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) (wb)
$\Phi_{ds}, \Phi_{ds}$	: Flux statoriques dans le repère de Park (d,q) (wb)
$\theta_s$ de l'axe direct «d » (rd)	: Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et de l'axe direct «d » (rd)
$\theta_r$ de l'axe direct «d » (rd)	: Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et de l'axe direct «d » (rd)
$p$ la machine	: Opérateur de LAPLACE, soit le nombre de paires de pôles de la machine
$\omega_m$	: Vitesse électrique de la machine (rd)
$\theta$	: Angle électrique de position de la machine (rd)
$V_s$	: Tension statorique (rd)
$V_{dc}$	: Tension redressé (v)
$V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$	: Tension simple à la sortie de l'onduleur(V)
$I_{on}$	: Le courant d'entrée de l'onduleur(A)
$I_{dc}$	: Courant redressé(A)
$i_c$	: Courant capacitif (A)
$C$	: Capacité de bus continu(F)
$L$	: Inductance de bus continu(H)

$S_a, S_b, S_c$  : Fonction de connexion de l'interrupteur

$\tau_r$  : Temps de réponse du système

$K_p$  : Gain proportionnel

$K_i$  : Gain intégral

**C-INDICES :**

Réf : indique la valeur de référence

més : indique la valeur mesurée

est : indique la valeur estimée

opt : indique la valeur optimale

reg : indique la valeur régulé

# Introduction générale

## **Introduction générale**

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement. Notamment car elles sont non polluantes et économiquement viables. Les aides institutionnelles et gouvernementales, conjointement avec le potentiel éolien et le développement des technologies de conversion des énergies ont permis le développement rapide de l'énergie éolienne avec une croissance annuelle de 30% et une pénétration du marché de l'électricité de 12% en 2012 [7].

Dans notre travail on considère un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable, son stator est connecté directement au réseau électrique, et son rotor est connecté à travers deux convertisseur de puissance.

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo-synchrone et hyper-synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [5].

Les générateur éolien est très sensibles aux perturbations provenant du réseau. Cela vaut particulièrement pour les génératrices à vitesse variable reliées au réseau par de longues lignes aériennes, facilement sujettes aux défauts.

Les défauts dans le système d'alimentation, même très loin de la génératrice peuvent avoir comme conséquence des perturbations de courte durée sur la tension, appelées creux de tensions, qui peuvent mener à la déconnexion du système éolien.

Dans la première partie du chapitre I, on fait un rappel des différentes structures d'éoliennes existantes: éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable, nous décrivons diverses architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique. Enfin, on parlera des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans la deuxième partie du chapitre I, nous présentons un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les éoliennes à vitesse variable, ses avantages et ses inconvénients et un dispositif de commande utilisé dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne raccordé au réseau électrique basé sur la MADA.

Dans la dernière partie du chapitre I, on parlera de l'impact de l'éolienne sur le réseau électrique et la possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien dans le réseau électrique. On terminera par l'influence du réseau électrique sur l'éolienne.

Dans le chapitre II on s'intéresse dans un premier temps à la modélisation du système de conversion à savoir l'éolienne et sa commande vectorielles, la machine asynchrone à double alimentation MADA et les convertisseurs d'électronique de puissance, ensuite on passera à l'interprétation des résultats de simulation sous matlab simulink.

Dans le chapitre III on va appliquer un creux de tension dans le réseau électrique ensuite on va déterminer le comportement des grandeurs internes de l'aérogénérateur, les résultats obtenus seront comparer avec celles obtenus sans l'apparition du défaut.

# Chapitre I

## Etat de l'art de l'énergie éolienne

**Introduction :**

La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée amènent, dans le domaine du Génie Electrique, de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Au prime abord, ces problèmes sont induits évidemment par l'impact des nouveaux types de sources d'énergie sur les réseaux, non conçus a priori pour les accueillir, et par la gestion globale du système de distribution. Il est fort à parier que la prolifération et la dispersion des sources conduiront à l'avenir à revoir les structures et la nature des réseaux d'énergie.

Le travail développé dans ce chapitre concerne la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne et plus particulièrement l'insertion de ce type de source dans le réseau électrique et l'impact d'un défaut provenant du réseau électrique sur la turbine éolienne.

Dans la première partie on fait un état de l'art des éoliennes à savoir celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable, nous décrivons diverses architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique. Enfin, on parlera des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans la deuxième partie nous présentons un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les éoliennes à vitesse variable, ses avantages et ses inconvénients et un dispositif de commande utilisé dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne raccordé au réseau électrique basé sur la MADA.

Dans la dernière partie on parlera de l'impact de l'éolienne sur le réseau électrique et la possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien dans le réseau électrique. On terminera par l'influence du réseau électrique sur l'éolienne.

**I.1 Généralités sur les éoliennes**

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connaît un essor considérable depuis quelques décennies. Cela est dû, d'une part, à des contraintes d'ordre environnemental mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mises en œuvre pour assurer cette conversion.

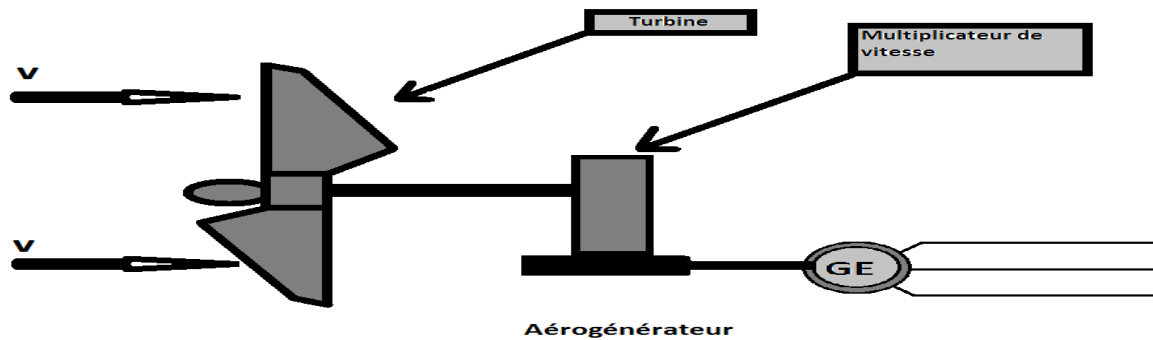
Dans cette partie on va présenter un état de l'art de l'énergie éolienne ainsi que les différentes structures de conversion éolienne utilisées pour les systèmes connectés au réseau électrique et on va donner un aperçu sur les systèmes isolés et autonomes.

Enfin, on parlera des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

### I.1.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis elle est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Un schéma synoptique est présenté dans la **Figure 1** :



**Figure I.1** : Conversion de l'énergie cinétique du vent

### I.1.2 Classification des éoliennes

On distingue deux catégories, les éoliennes à axe vertical celles à axe horizontal :

#### I.1.2.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne est très peu répandu. Car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Il existe principalement deux technologies, les aérogénérateurs à rotor de Savonius et les aérogénérateurs à rotor de Darrieus [03].

##### I.1.2.1.1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus sont plus adaptées à des secteurs nécessitant l'intégration aux bâtiments, les zones extrêmes (observatoires ...) ...etc. Ayant souvent un rendement moins important que les éoliennes "classiques", ce type d'aérogénérateurs permet en revanche de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation. L'encombrement total est plus faible, et dans la plupart des cas, le générateur est situé à la base de l'éolienne, ce qui est intéressant pour l'installation et la maintenance. Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Cette solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h (61.11m/s) et ce, quelle que soit leur direction. Le principal défaut de ce type d'éoliennes est leur démarrage difficile dû à l'inertie générée par le poids du rotor qui pèse sur son socle [02].

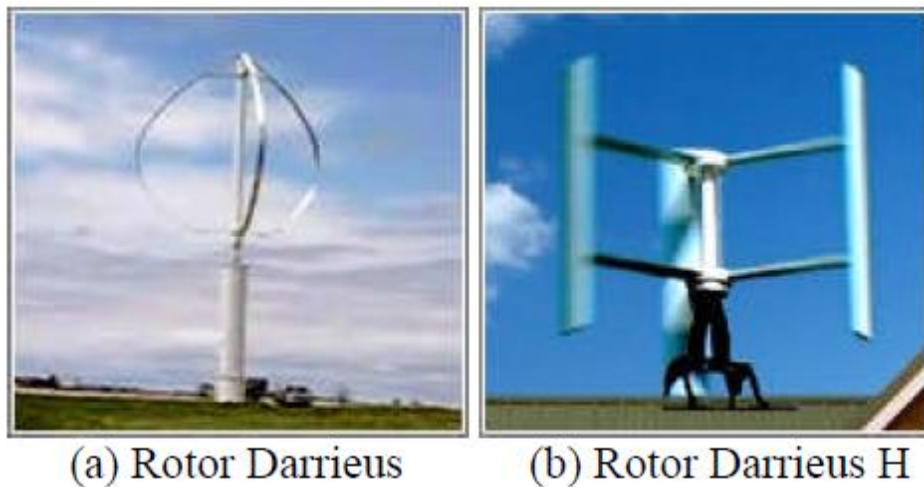


**Avantages :**

- ✓ Génératrice pouvant être placée au sol (selon les modèles)
- ✓ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle"
- ✓ Intégrable aux bâtiments

**Inconvénients :**

- ✓ Démarrage difficile contrairement aux éoliennes de type Savonius
- ✓ Faible rendement



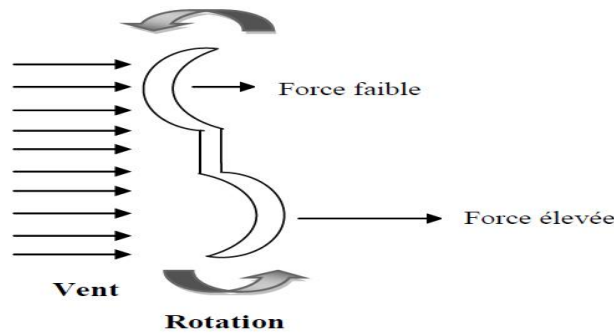
**Figure I.2 :** Eoliennes à axe vertical de type Darrieus

**I.1.2.1.2 Eolienne à axe vertical de type Savonius**

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence et leur conception induit de bruit. Elles conviennent donc tout à fait bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement pénalisé par son coefficient de puissance ( $C_{pmax} \sim 0.2$ ) [02].

**La traînée différentielle**

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est le suivant : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entrainer un générateur électrique [03].



**Figure I.3 :** Effet du vent sur un corps creux

**Figure I.4:** Le rotor de Savonius

**Avantages :**

- ✓ Faible encombrement,
- ✓ Intégrable au bâtiment, esthétique,
- ✓ Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus,
- ✓ Système peu bruyant,
- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent.

**Inconvénients :**

- ✓ Faible rendement,
- ✓ Masse non négligeable.

### I.1.2.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [02].



**Figure I.5:** Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent

**Avantages :**

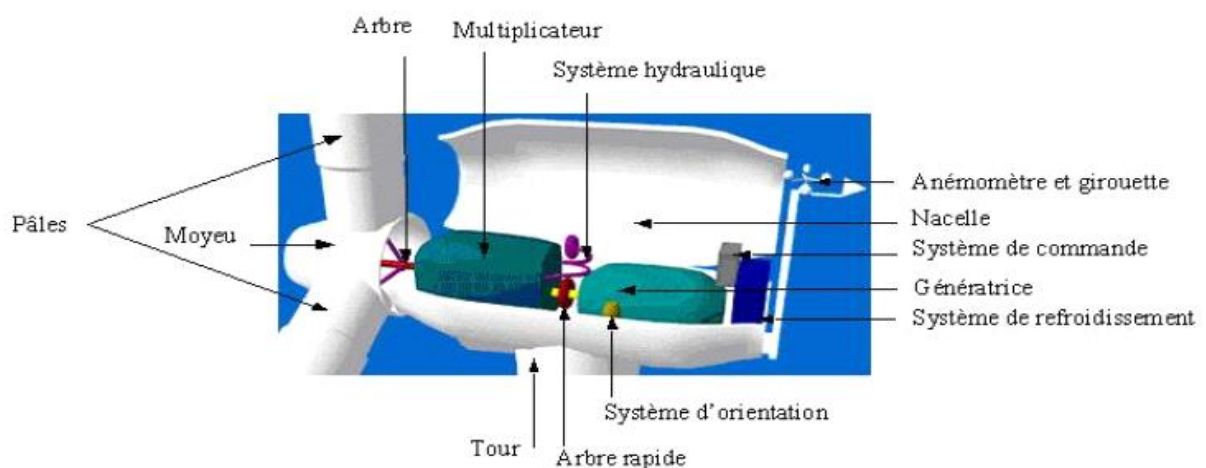
- ✓ Coût limité,
- ✓ Peu de contraintes mécaniques,
- ✓ Grande efficacité.

**Inconvénients :**

- ✓ Bruit conséquent,
- ✓ Vibrations non négligeables,
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

**I.1.3 Principaux composants d'une éolienne**

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure I.6.



**Figure I.6:** Constitution d'une éolienne à axe horizontal

### I.1.3.1 Le mât ou la tour

C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle [04].

### I.1.3.2 La nacelle

Regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne [04].

### I.1.3.3 Le multiplicateur

Sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique [04].

### I.1.3.4 Le système de refroidissement

Se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur [04].

### I.1.3.5 La génératrice électrique

C'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [04].

### I.1.3.6 Le système de commande

Qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter [04].

### I.1.3.7 L'arbre

Qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin [04].

### I.1.3.8 Le système d'orientation des pâles

Qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique) [04].

## I.1.4 Les systèmes de régulation

Il existe trois systèmes de régulation :

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à faire varier l'angle de calage des pâles pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pâles de quelques degrés à chaque

variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor.
- Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**active stall**". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

### I.1.5 Les éoliennes en fonctionnement autonome

Dans les régions isolées et ventées, il est plus favorable d'utiliser l'énergie éolienne que de construire tout un réseau électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages [02].

#### Les différentes génératrices utilisées :

- **Machine synchrone à rotor bobiné** (elle a besoin d'une excitation donc d'une présence d'une batterie ou d'une source d'alimentation indépendante).
- **Machine synchrone à aimants permanents** (une solution très intéressante car elle n'a pas besoin d'une excitation extérieure, son principal inconvénient est le coût).
- **La machine asynchrone à cage** (reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. Par ailleurs, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient).

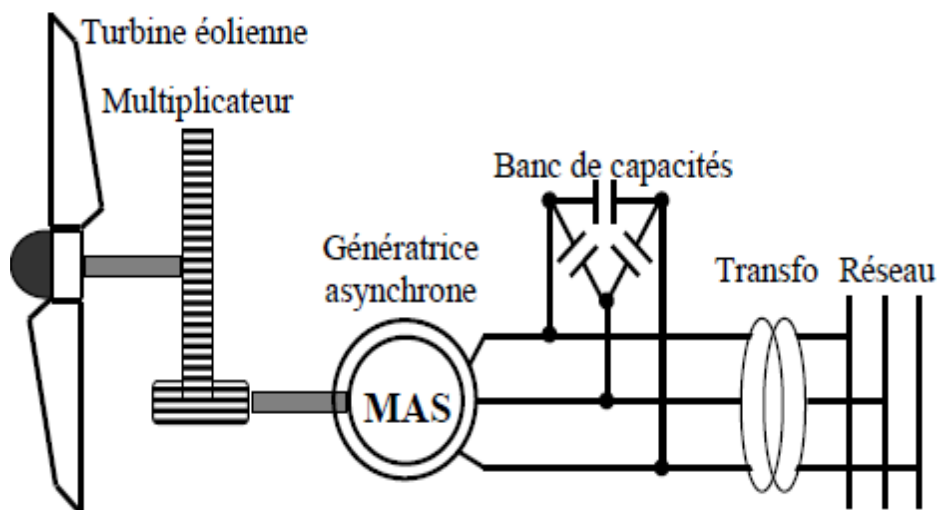
### I.1.6 Les éoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [02].

#### I.1.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control)[02]. On utilise généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau électrique qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif).

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur la Figure I.7 [02].



**Figure I.7:** Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écureuil sont les suivants :

- ✓ Système électrique simple;
- ✓ Grande fiabilité;
- ✓ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

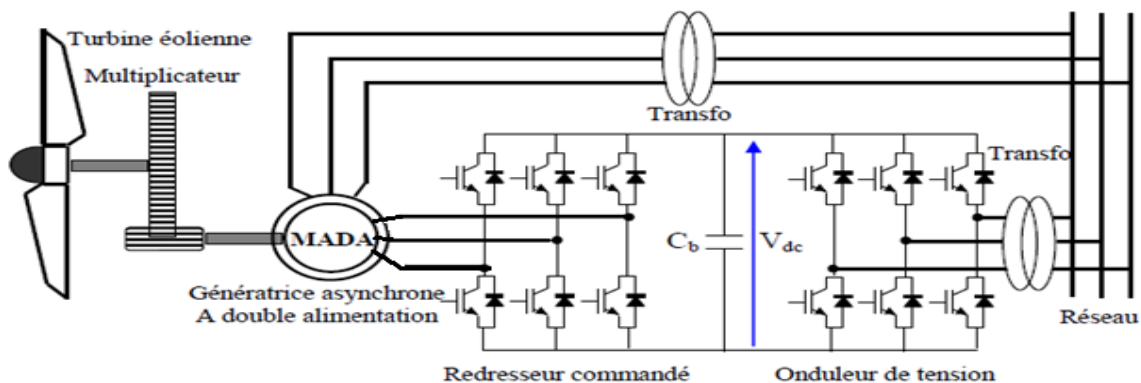
- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

### I.1.6.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable se sont récemment développées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, elles permettent à la fois de maximiser la puissance extraite du vent, de réduire les efforts subits par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite. Dans ces systèmes, une connexion directe au réseau n'est plus possible. Un découplage s'impose entre la génératrice et le réseau, pour obtenir ce découplage on utilise une interface d'électronique de puissance (un redresseur et un onduleur) [03].

#### I.1.6.2.1 Eolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes aux éoliennes à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [02].

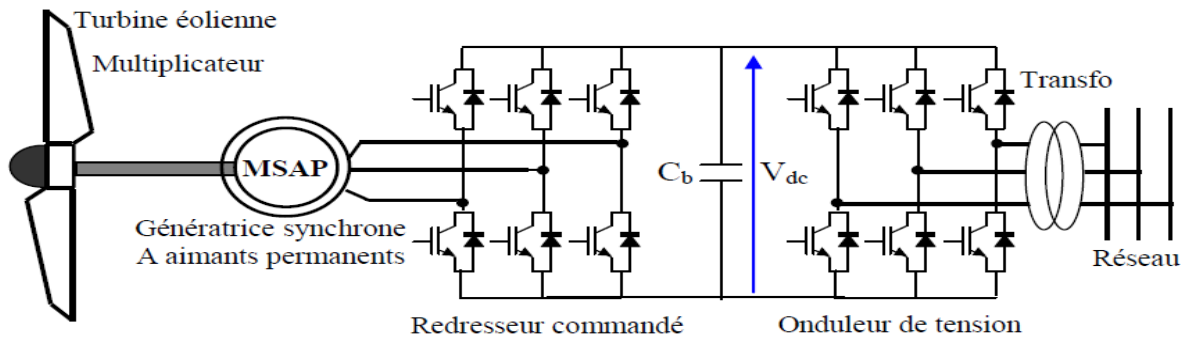


**Figure I.8:** Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable

#### I.1.6.2.2 Eolienne basée sur la machine synchrone à aimants permanents

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement

direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles). Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement.



**Figure I.9 :** Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

### I.1.7 Avantages et Inconvénients des éoliennes.

#### ➤ Avantages

- L'énergie éolienne est propre.
- L'énergie éolienne est abondante (gratuite).
- Elle ne nécessite aucun carburant.

#### ➤ Inconvénients

- Le bruit.
- L'impact sur les oiseaux pour que ceux-ci ne fassent pas attraper par les aéroturbines.
- C'est une énergie décentralisée.
- Le coût.

### I.2 Etude de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Une machine asynchrone à rotor bobiné peut être alimentée par deux sources distinctes branchées respectivement au stator et au rotor. Cette machine, appelée « machine asynchrone à double alimentation », est utilisée dans des applications requérant une vitesse variable. Elle peut être utilisée comme moteur pour, par exemple, entraîner des pompes. Elle est aussi utilisée dans les éoliennes comme génératrice à vitesse variable.

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté



directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs d'électronique de puissance.

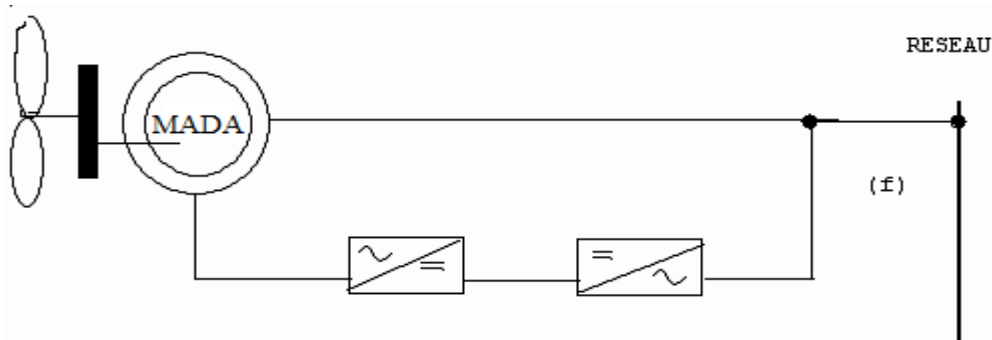
Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

Dans cette partie on va présenter les différentes alimentations de la MADA à savoir l'alimentation par le stator et l'alimentation par le stator et par le rotor, le bilan de puissance et les avantages et les inconvénients de la MADA. On parlera aussi de dispositif de commande le plus utilisé dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne et on terminera par une petite conclusion.

### I.2.1 Double alimentation par le stator

Cette alimentation est réalisable si la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Figure I.10)



**Figure I.10 :** Machine asynchrone à double bobinage statorique [05].

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paires de pôles que celui du premier bobinage et il est connecté à des convertisseurs statiques qui permettent de contrôler le flux statorique et le glissement de la machine et donc la vitesse de la génératrice.

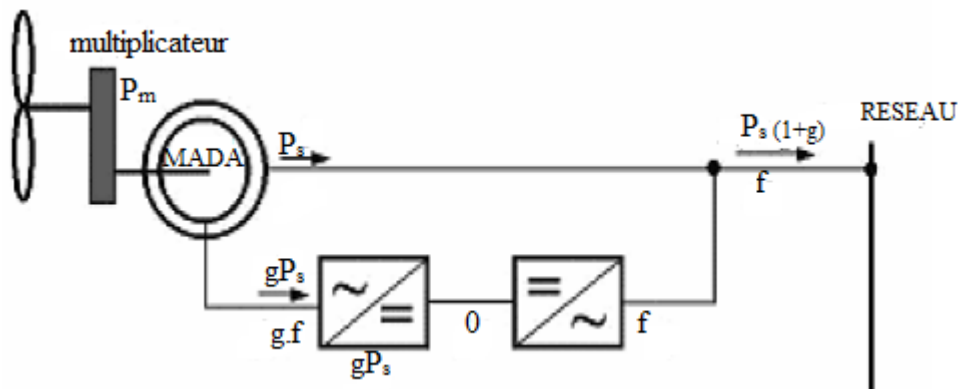
On remarque dans la Figure I.10 qu'un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers [05].

### I.2.2 Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (Figure I.11).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $p$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournit  $(1 - g) p$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste  $gp$  sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $g \cdot f$ . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1 + g) p$  ; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (Figure I.11). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [05].



**Figure I.11** : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

### I.2.3 Bilan de puissance

#### I.2.3.1 Fonctionnement moteur ( $P_m > 0$ ) hyper-synchrone ( $g \leq 0$ )

Le bilan de puissance de ce mode de fonctionnement est le suivant :

$$P_m = P_s + P_r = P_s + g \cdot P_s = (1 + g) \cdot P_s$$

Tel que :

- $P_m$  : est la puissance mécanique
- $P_s$  : est la puissance statorique
- $g \cdot P_s = P_r$  : est la puissance rotorique
- $g$  : est le glissement

**I.2.3.2 Fonctionnement moteur ( $P_m > 0$ ) hypo-synchrone ( $g \geq 0$ )**

Le bilan de puissance de ce mode de fonctionnement est le suivant :

$$P_s = P_m + P_r = P_m + g \cdot P_s$$

$$P_m = (1 - g) \cdot P_s$$

**I.2.3.3 Fonctionnement générateur ( $P_m < 0$ ) hyper-synchrone ( $g \leq 0$ )**

Le bilan de puissance de ce mode de fonctionnement est le suivant :

$$P_m = P_s + P_r = P_s + g \cdot P_s = (1 + g) \cdot P_s$$

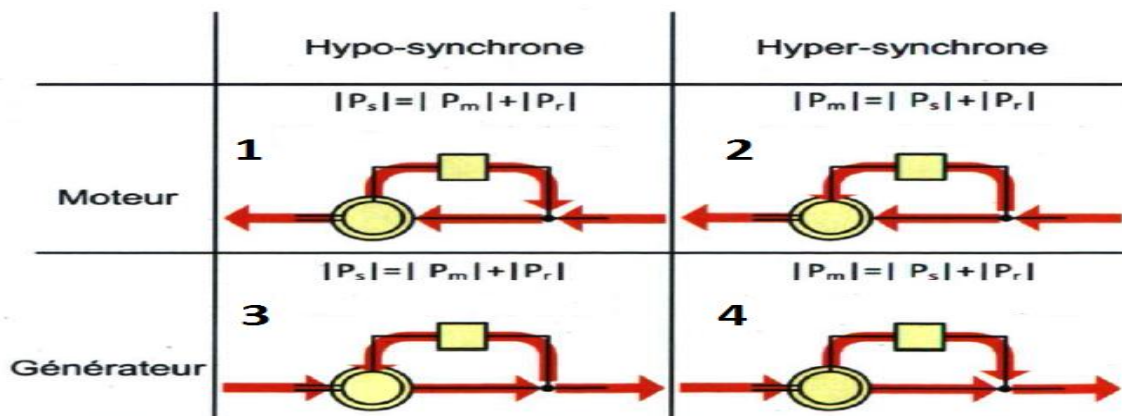
**I.2.3.4 Fonctionnement générateur ( $P_m < 0$ ) hypo-synchrone ( $g \geq 0$ )**

Le bilan de puissance de ce mode de fonctionnement est le suivant :

$$P_s = P_m + P_r = P_m + g \cdot P_s$$

$$P_m = (1 - g) \cdot P_s$$

On peut résumer les 4 modes précédents dans le schéma Figure I.12 :



**Figure I.12** : Schéma représente les 4 modes de fonctionnement de la MADA

**I.2.4 Avantages et Inconvénients de la MADA**

**Avantages**

- La possibilité de fonctionner à vitesse variable

- Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur
- La vitesse du rotor est quasi constante
- Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent
- La MADA fonctionne en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone
- Pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent
- Pouvoir en tirer le maximum de puissance possible

**Inconvénients**

Son inconvénient majeur est lié à son intégration dans le réseau électrique, en particulier sa sensibilité aux surintensités engendrées par des creux de tension du réseau électrique [02].

**I.2.5 Dispositif de commande d'une chaîne de conversion éolienne**

Il existe plusieurs dispositifs de commande on a choisi la commande vectorielle directe pour adapter le contrôle de la MADA à celui de la machine à courant continu.

**I.2.5.1 Le schéma de la chaîne de conversion éolienne**

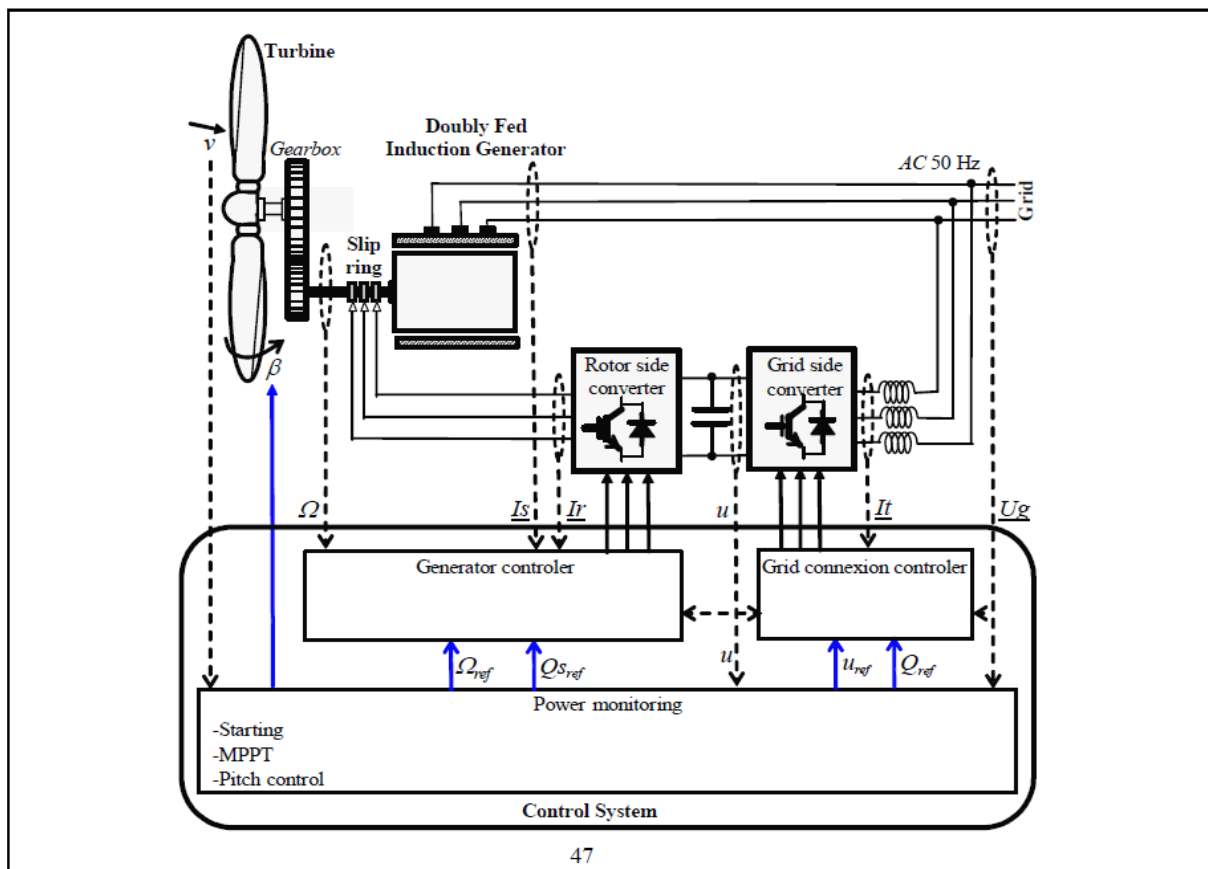


Figure I.13: Schéma de la chaîne de conversion éolienne [01].

### I.2.5.2 L'algorithme M.P.P.T.

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT), et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système [04].

### I.2.5.3 La commande vectorielle de la MADA

Le principe consiste à faire orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant donc d'imposer un flux quadrature  $\Phi_{qs}=0$  et un flux direct égal au flux statorique  $\Phi_{ds}=\Phi_s$  afin de ramener le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) à celui de machine à courant continu.

Pour les machines de moyenne et forte puissance, on peut négliger la résistance statorique  $r_s$  tout en considérant le flux statorique constant.

### I.2.5.4 Le contrôle de convertisseur MLI 1

Permet de contrôler le flux et la vitesse de la génératrice

### I.2.5.5 Le contrôle de convertisseur MLI 2

Permet de contrôler la tension du bus continu et les puissances actives et réactives échangées avec le réseau et d'établir les courants à la fréquence du réseau de distribution.

## I.3 Intégration d'une éolienne a un réseau électrique

Le but de cette partie est d'étudier l'impact de l'éolienne sur le réseau électrique et aussi l'influence de ce dernier sur l'éolienne lors d'un défaut qui apparait dans le réseau électrique.

Au début de la partie on va présenter les principales perturbations qui ont un impact sur le fonctionnement de l'éolienne après on va voir les différents problèmes causés par l'insertion des éoliennes dans les réseaux électriques et la possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien dans le réseau électrique. On terminera par déterminer l'influence du réseau électrique sur l'éolienne.

### I.3.1 Perturbation de la tension

L'alimentation est d'autant plus faible que le nombre annuel d'interruptions est petit et que leur durée moyenne est faible. On peut distinguer trois principales perturbations de tension :

### I.3.1.1 Fluctuations de tension

Dans les installations où il y a des variations rapides de puissance absorbée ou produite aux démarrages fréquents (soudeuses, éolienne, fours à arc...), on observe des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires. Le principal effet des fluctuations de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).

### I.3.1.2 Les variations de tension

Elles sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale.

### I.3.1.3 Les creux de tension

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Ils ont pour principale origine le court-circuit affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance [06].

L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et la distance entre le point de défaut et le point où est situé l'utilisateur sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont de l'utilisateur est élevée ou plus le défaut est éloigné du point de raccordement de l'utilisateur, moins l'amplitude du creux de tension ressentie est importante, ou plus la profondeur est faible [01].

La durée du creux de tension est liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées [06].

#### I.3.1.3.1 Caractérisation des creux de tension

Un creux de tension est caractérisé par son amplitude, sa durée et sa profondeur, la figure suivante montre les caractéristiques d'un creux de tension :

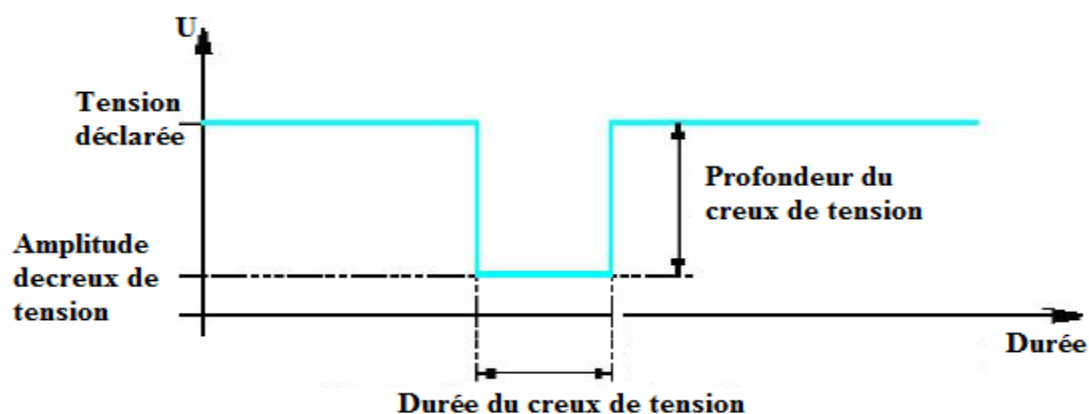


Figure I.14 : Caractéristique d'un creux de tension

On peut trouver deux formes générales des creux de tension :

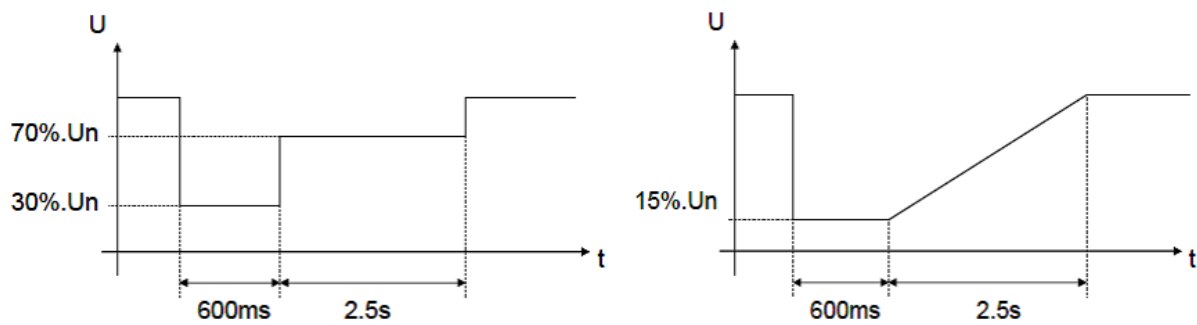


Figure I.15 : Gabarit des creux de tension

I.3.1.3.2 Classification des creux de tension

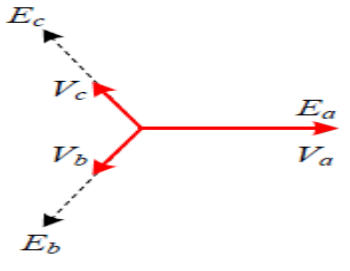
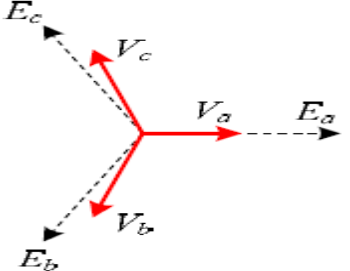
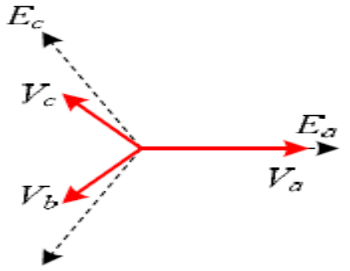
Une classification basée sur une transformation vectorielle permet de représenter de manière intuitive les creux de tension. Cette méthodologie permet d'extraire les caractéristiques du creux de tension et de déterminer son type et sa gravité. Sept types de creux de tension sont obtenus à partir d'une transformation vectorielle qui est due à différentes origines (trois phases, deux phases à la terre, deux phases connectées et une phase à la terre). Avec l'hypothèse, que les différentes impédances sont égales, les expressions pour les tensions complexes dans ces sept cas sont données dans Le tableau suivant : [07]

Tableau : Sept types de défaut causant un creux de tension

Type	Phaseurs	Tensions	Description
A		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$	<p>Trois phases en défaillance :                      Creux de tension identiques dans les trois phases.</p>
B		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}jE$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}jE$	<p>Une phase à la terre: elle provoque une baisse de la tension de ligne tandis que les deux autres tensions</p>

			demeurent inchangées.
C		$V_a = E$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$	<p>Défaut phase-phase: elle provoque le déplacement de deux phases alors que la troisième phase ne change pas du tout.</p> <p>Ou de type B après un transformateur couplé en triangle/étoile (Dy).</p>
D		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jE$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jE$	<p>Défaut phase-phase: elle provoque le déplacement de deux phases alors que la troisième phase ne change pas du tout.</p> <p>ou de Type B après deux transformateurs couplés en triangle/étoile (Dy).</p>



<p>E</p>		$V_a = E$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$	<p>Deux phases à la terre : Provoque un creux de tension sur deux phases alors que la troisième n'est pas affectée.</p>
<p>F</p>		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{3}jE - \frac{\sqrt{3}}{6}jV$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{3}jE + \frac{\sqrt{3}}{6}jV$	<p>Trois phases en défaillance avec deux phases déphasées.</p>
<p>G</p>		$V_a = \frac{2}{3}E + \frac{1}{3}V$ $V_b = -\frac{1}{3}E - \frac{1}{6}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$ $V_c = -\frac{1}{3}E - \frac{1}{6}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$	<p>Un creux de tension sur deux phases avec un déphasage alors que la troisième n'est pas affectée.</p>

Les tensions avant la défaillance sont indiquées par les lettres E. Les tensions dans les phases en défaut ou entre les phases sont indiquées par les lettres V. Un transformateur permet de transférer les tensions déséquilibrées dans d'autres repères selon le type de défaut. Par exemple un transformateur couplé en triangle/étoile (Dy) permet une transformation des tensions composées en tensions simples. Et deux transformateurs couplés en triangle/étoile (Dy) permettent de supprimer la composante homopolaire.

Un des principaux avantages de cette méthode de classification est qu'elle ne nécessite que le calcul des phaseurs spatiaux et des composantes homopolaires pour analyser les creux de tension. De plus, cela permet une interprétation graphique des modifications complexes des creux de tension. Cette méthode permet également une caractérisation et une classification plus concise des défauts. Cela permet d'élaborer plus facilement des protocoles de tests pour les convertisseurs de puissance connectés au réseau. Les types B et E peuvent être négligés

lorsque l'on considère le cas des creux de tension dans les réseaux de production éolien car ils possèdent une composante homopolaire superflue [07].

### I.3.2 Influence de l'éolienne sur un réseau de distribution

L'insertion des générateurs éoliens dans les réseaux électriques pose plusieurs problèmes. Dans cette section, les divers effets de leur intégration dans les réseaux seront introduits.

#### I.3.2.1 Effets sur les flux de puissance

Une forte insertion de production décentralisée à énergies renouvelables comme l'éolien peut faire apparaître sur les réseaux deux types de phénomènes :

- Une modification du sens des flux de puissance, l'énergie circule traditionnellement de l'amont (point de connexion au réseau de transport) vers l'aval (les charges). La connexion d'un groupe de production sur un départ peut inverser le sens du flux de puissance, entraînant par exemple un dysfonctionnement de protections non directionnelles [08].
- Des inversions rapides des flux de puissance qui peuvent poser des problèmes de réglage de la fréquence sur le réseau de transport et amener des pénalités dues à un non-respect des engagements contractuels pris en matière d'importation ou d'exportation d'énergie au niveau des lignes d'interconnexions avec les pays voisins[08].

#### I.3.2.2 Effets sur la tension

La chute de tension dans un conducteur pouvait s'écrire :

$$\Delta V \approx \frac{rP+xQ}{V_2} = V_1 - V_2$$

En examinant cette expression on remarque que la variation lente ou rapide des deux types d'énergie aura des répercussions sur la tension du réseau. On peut citer :

- La modification du plan de tension

La puissance active générée par les éoliennes est par nature fluctuante, ce qui tend d'après l'expression précédente à induire des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT, les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive, contrairement aux réseaux de distribution [08].

- Le flicker

Les fluctuations rapides de faibles amplitudes de la tension sont appelées flicker. Dans le cas des éoliennes, ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne (par exemple du pitch control) et à l'effet d'ombre causé par le passage des pales devant le mât [08].

### I.3.2.3 Effets sur le plan de protection

Sur le réseau de distribution un dispositif de protection simple et peu onéreux a été mis en place. Ce dispositif fonctionne en prenant en compte que les installations des consommateurs sont passives et non génératrice de production. Dans le cas d'insertion de production décentralisée et d'apparition de défauts, différents dysfonctionnements peuvent apparaître au niveau du plan de protection [08].

### I.3.2.4 Effets sur les puissances de court – circuit

La puissance de court – circuit au niveau d'un réseau de distribution diminue de l'amont vers l'aval. Avec le raccordement de production sur le réseau cette loi n'est plus valable. Plusieurs cas peuvent alors être énumérés selon l'endroit du court – circuit :

- A : Dj1 doit supporter les courants de court – circuit issus des sources S2 et S3 ;  
Dj2 et Dj3 doivent supporter, respectivement, les courants de court – circuits des sources S2 et S3 ;
- B : Dj1 doit supporter les courants de court – circuit issus de la source S1 ; Dj2 et Dj3 doivent supporter, respectivement, les courants de court – circuits des sources S2 et S3 ;
- C : Dj2 doit supporter les courants de court – circuit issus des sources S1 et S3,  
Dj1 et Dj3 doivent supporter, respectivement, les courants de court – circuits des sources S1 et S3 ;
- D : Dj4 doit supporter les courants de court – circuit issus des sources S1, S2 et S3 ; Dj1, Dj2 et Dj3 doivent supporter, respectivement, les courants de court – circuits issus des sources S1, S2 et S3 [04].

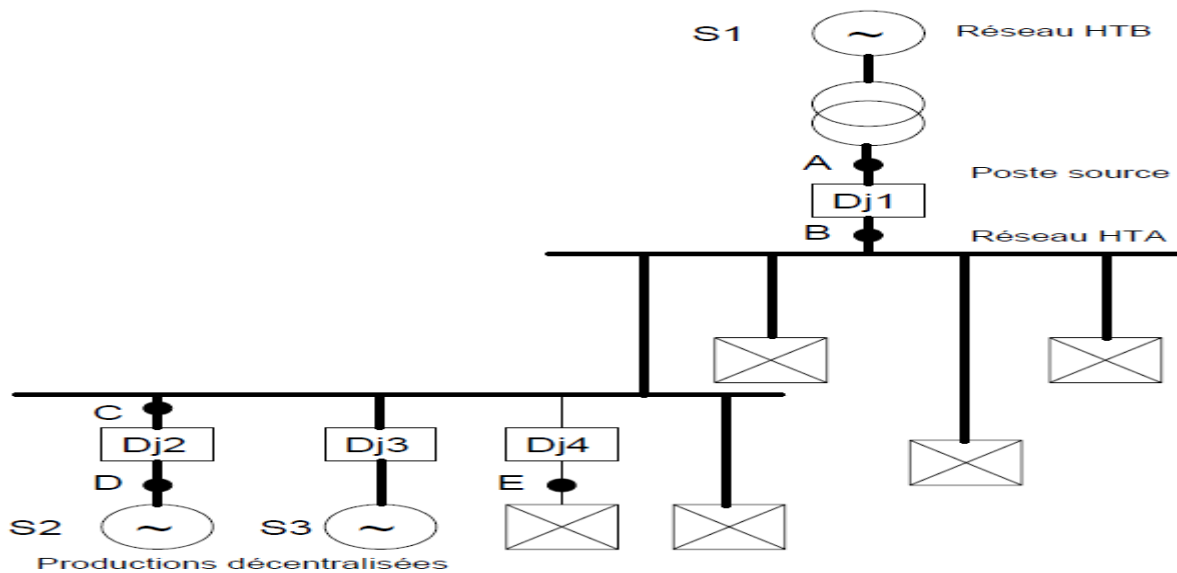


Figure I.16 : Modification des puissances de court – circuit.

### I.3.2.5 Capacité d'accueil du réseau public de transport

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas de l'éolien un problème aigu, car les lieux de production (sites ventés) sont souvent éloignés des lieux de consommation. L'adaptation et le renforcement des postes peuvent concerner les postes HTA-HTB suite au développement de l'éolien dans le réseau de distribution (modification des protections, augmentation de la puissance de court-circuit,...). Afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau, de nouvelles lignes devraient être construites en particulier aux interconnexions entre les réseaux gérés par des opérateurs différents [08].

### I.3.2.6 Prévision de la production

Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent sur les sites éoliens induisant une incertitude sur la production des fermes éoliennes. Les erreurs de prévisions à 24 h peuvent atteindre des valeurs de plus de 50% en négatif (sous-production) ou en positif (sur-production) avec des changements de signe rapides en cours de journée [08].

L'intégration massive de sources non-programmables génère des coûts supplémentaires à plusieurs niveaux :

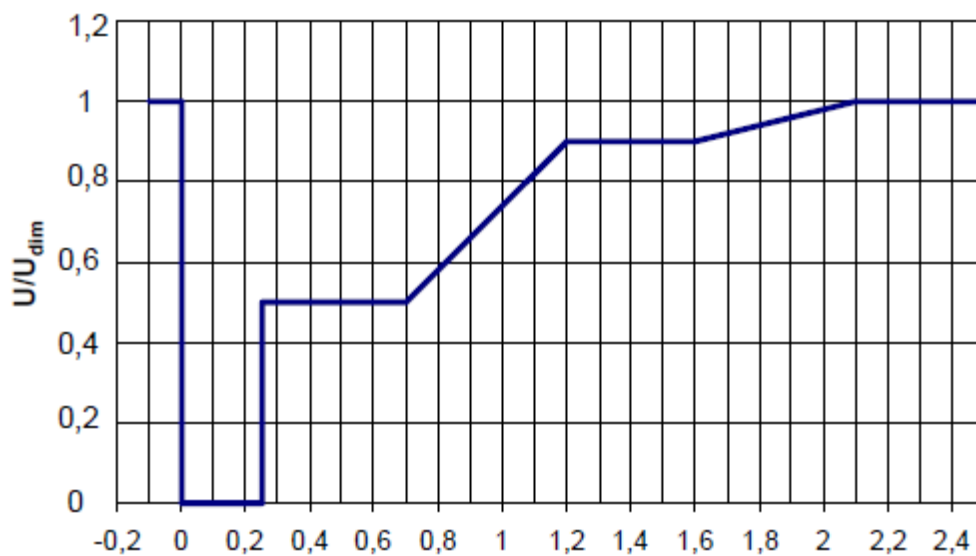
- des coûts d'installation de réserves supplémentaires pour faire face à la demande de pointe (sécurité du système) du fait d'un accroissement de la proportion de sources intermittentes [08].

- des coûts liés au besoin de disposer de réserves plus importantes pour maintenir en temps réel l'équilibre entre consommation et production d'électricité [08].

### I.3.2.7 Déconnexions intempestives

Les générateurs éoliens, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence.

Afin d'éviter un déclenchement simultané de toute ou partie de la production éolienne sur un défaut normalement éliminé, il est demandé aux éoliennes installées depuis 2003 de pouvoir rester connectées au réseau en cas de baisse de tension et de variation de fréquence suivant des contraintes pouvant varier d'un opérateur à l'autre. Par exemple, RTE demande que les éoliennes restent connectées au réseau tant que le creux de tension reste supérieur au gabarit présenté à la Figure I.15 (valable pour les réseaux de répartition : réseaux de transport régionaux à 225 kV, 90kV et 63 kV) [08].



**Figure I.17** : Gabarit de tension auquel doivent satisfaire les éoliennes connectées au réseau de répartition.

Concernant les variations de fréquence, l'arrêté [09] précise que les installations de production doivent rester connectées pour des durées limitées dans les plages exceptionnelles de fréquence situées entre 47 et 52 Hz. De plus, même si l'installation ne participe pas à la constitution des réserves comme c'est le cas de l'éolien, elle doit être capable de réduire la puissance produite lorsque la fréquence dépasse un seuil réglable entre 50,5 et 51 Hz [08].

### I.3.3 Possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien

Une des possibilités d'amélioration de l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux est de les faire participer au réglage primaire de fréquence et de les faire fonctionner en îlotage. Dans le cas d'unités de production connectées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance comme les éoliennes modernes de grande puissance. Certains travaux de recherche ont montré qu'il était possible d'introduire un lien « artificiel » entre les variations de puissance demandées par les consommateurs et la fréquence de fonctionnement des interfaces électroniques de puissance.

Pour permettre aux unités de production basées sur des sources aléatoires (éolien, photovoltaïque) de participer pleinement aux services système, il faudra leur associer des systèmes de stockage de l'énergie électrique. L'électricité ne se stocke cependant pas facilement, et nécessite sa transformation sous une autre forme énergétique (chimique, mécanique, thermique) [08].

### I.3.4 Influence d'un réseau de distribution sur l'éolienne

L'apparition d'un défaut dans un réseau électrique conduit à l'apparition d'un affaiblissement de la tension. Dans cette partie, on cherchera à déterminer le comportement des grandeurs internes de l'éolienne à base d'une MADA [01].

Un creux de la tension imposée par le réseau va causer une augmentation du courant statorique. A cause du couplage magnétique entre le stator et le rotor, le courant du défaut va traverser le rotor et son convertisseur de puissance. Cela entraîne un sur-courant dans le rotor et une augmentation de la tension du bus continu. Sans protections, cela peut détruire le convertisseur. Alors, le principal objectif du contrôle durant une défaillance réseau est de limiter le courant de défaut et de limiter l'augmentation de la tension de bus continu [07].

## Conclusion

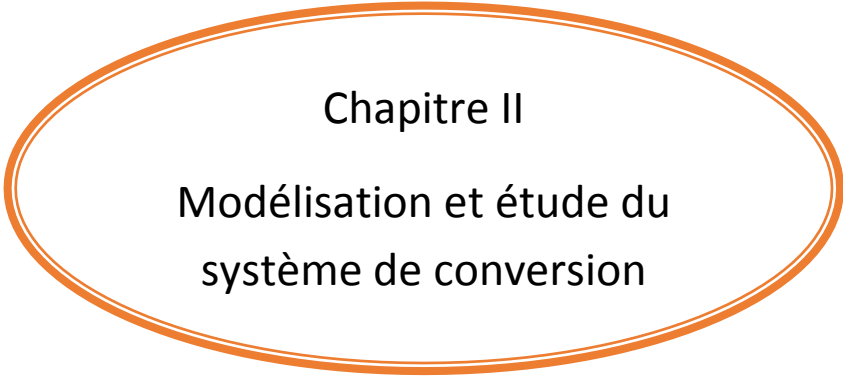
L'objectif de ce premier chapitre était d'étudier l'insertion de l'énergie éolienne dans le réseau électrique et l'impact d'une perturbation dans ce dernier sur le fonctionnement de l'éolienne.

Dans la première partie, nous avons donné une brève description des systèmes éoliens et les différents paramètres relatifs à leurs fonctionnements. Ensuite, nous avons présenté quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique connectées au réseau électrique. Enfin, on a parlé de quelques avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans la seconde partie, nous avons présenté un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les éoliennes à vitesse variable, ses avantages et ses inconvénients et un dispositif de commande utilisé dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne raccordé au réseau électrique basé sur la MADA.

Dans la dernière partie on a parlé de l'impact de l'éolienne sur le réseau électrique et la possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien dans le réseau électrique. On a terminé par déterminer l'influence du réseau électrique sur l'éolienne.

L'objectif de notre mémoire est d'étudier le comportement d'une éolienne à base d'une MADA face un creux de tension apparaît dans le réseau électrique et de donner une stratégie de contrôle vectoriel modifiée de la MADA en cas de creux de tension.



**Chapitre II**  
**Modélisation et étude du**  
**système de conversion**

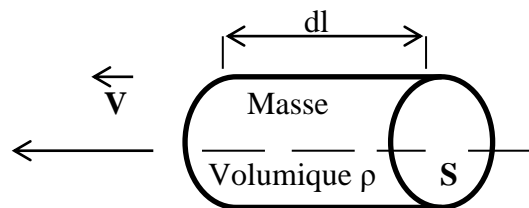


**Introduction :**

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la Compréhension du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le Modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale. Dans ce chapitre on s'intéresse dans un premier temps à la modélisation du système de conversion à savoir l'éolienne et sa commande vectorielles, la machine asynchrone à double alimentation MADA et les convertisseurs d'électronique de puissance, en suite on passera à la l'interprétation des résultats de simulation sous matlab simulink.

**II.1 Modélisation de la turbine éolienne****II.1.1 L'énergie disponible**

On considère une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $V$  conformément à la figure suivante :



**Figure II.1:** colonne d'air.

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot V^2 \text{ Avec } dm = \rho \cdot S \cdot dl \quad (\text{II.1.1})$$

Or nous savons que  $dl = V \cdot dt$  car :  $V = \frac{dl}{dt}$  D'où :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot dt \quad (\text{II.1.2})$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_v = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.1.3})$$

La puissance disponible par  $m^2$  devient alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.1.4})$$

### II.1.2 L'énergie récupérable

On définit un coefficient de performance  $C_p$  propre à chaque éolienne, comparable au rendement d'un moteur thermique, qui dépend directement des caractéristiques de l'éolienne. Ainsi ce coefficient de performance varie avec le vent, comme le montre le graphique ci-dessous :

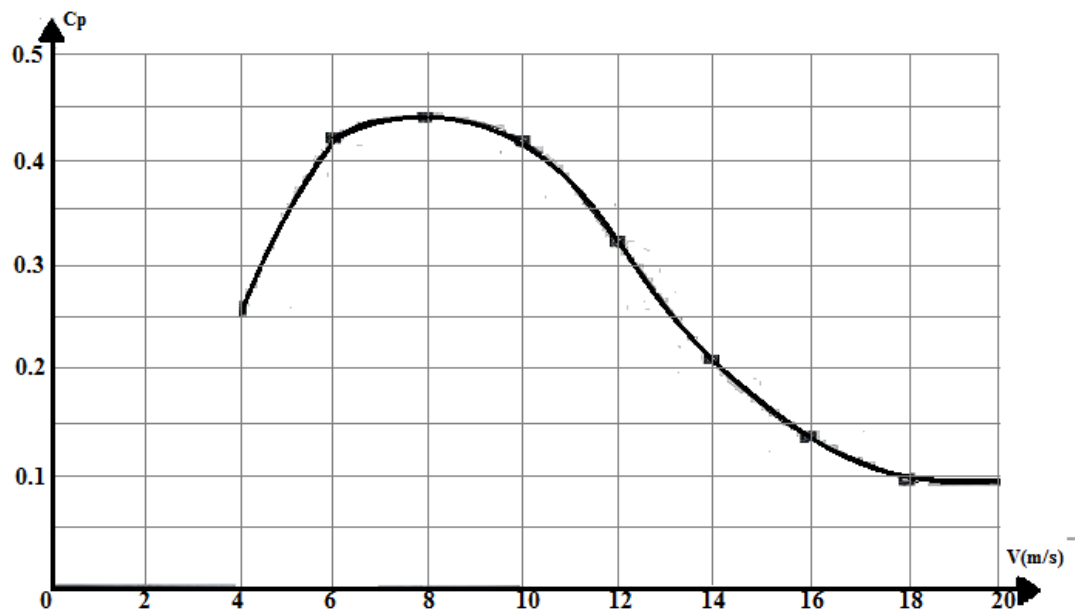


Figure II.2: Caractéristique  $C_p(v)$

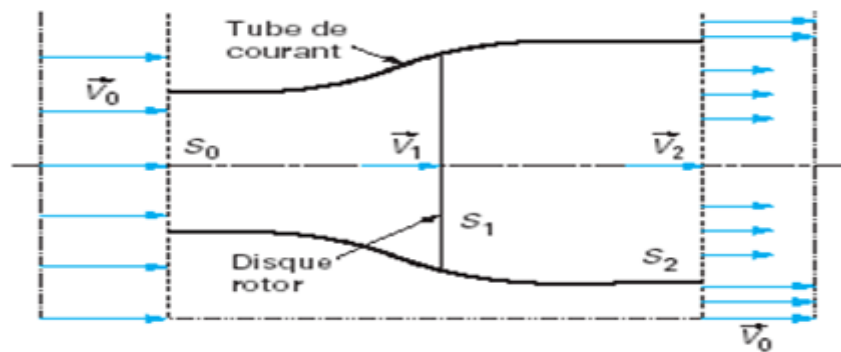
La puissance récupérable  $P_t$  sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_t = C_p \cdot P_v \quad (\text{II.1.5})$$

Où  $P_v$  est la puissance disponible.

### II.1.3 La théorie de BETZ

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur.



**Figure II.3 :** Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur

Avec :  $V_0$  : vitesse axiale initiale du vent.

$S_0$  : surface à l'entrée du tube de courant.

$V_1$  : vitesse du vent dans le plan du rotor.

$S_1$  : surface du rotor.

$V_2$  : vitesse du vent dans à l'aval du rotor.

$S_2$  : surface à l'aval du rotor.

On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{II.1.6})$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force  $F$  s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0 - V_2) \quad (\text{II.1.7})$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur :

$$P = F \cdot V_1 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_2) \quad (\text{II.1.8})$$

De plus, la masse d'air élémentaire  $dm$  traversant l'éolienne pendant le temps  $dt$  est :

$$dm = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot dt \quad (\text{II.1.9})$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse  $dm$  lorsque la vitesse passe de la valeur  $V_0$  à la valeur  $V_2$  est défini par :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{II.1.10})$$

La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{II.1.11})$$

En exprimant que  $P_c = P$ , on en déduit que :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (\text{II.1.12})$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$P_t = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot (V_0 + V_2)^2 \cdot (V_0 - V_2) \quad (\text{II.1.13})$$

#### II.1.4 La limite de BETZ

La relation devant exister entre  $V_0$  et  $V_2$  pour que cette puissance  $P_t$  passe par un maximum est :

$$\frac{dP_t}{dV_2} = 0 \text{ Soit } V_0 = 3V_2 \quad (\text{II.1.14})$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3 = \left(\frac{16}{27}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3\right) \quad (\text{II.1.15})$$

$$P_{\max} = \left(\frac{16}{27}\right) \cdot P_v \quad (\text{II.1.16})$$

Ce qui signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de  $\frac{16}{27} \times 100 = 59,26\%$  de la puissance disponible due au vent, c'est la **limite de Betz**.

En réalité la puissance récupérée est inférieure à cette puissance maximale car « du vent à l'ampoule » dans notre cas, ou « du vent au réseau électrique » à l'échelle nationale français il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec son propre rendement (par exemple le rendement d'une hélice est d'environ 85%). De plus, en pratique tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global. Ainsi une éolienne industrielle aura un rendement global compris entre 50 et 55%, une éolienne artisanale entre 25 et 40%.

Une approximation mathématique de  $C_p$  est donnée en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et aussi de l'angle de calage  $\beta$ :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14 - 0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad [16] \quad (\text{II.1.17})$$

Pour un angle de calage  $\beta=0$  et une vitesse spécifique optimale  $\lambda_{\text{opt}}=7$  on aura un coefficient de puissance maximal propre à cette turbine  $C_{p\text{max}}=0.44$

### II.1.5 Production d'énergie mécanique

La puissance fournie par le vent est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.1.18})$$

La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (\text{II.1.19})$$

On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (\text{II.1.20})$$

Avec  $\lambda$  est le rapport de la vitesse en bout de pales (En Anglais : tip-speed ratio), il est défini comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (\text{II.1.21})$$

Avec :

- $\Omega_t$ , vitesse de la turbine éolienne
- $R_t$ , rayon de la turbine éolienne
- $P_t$ , puissance de la turbine éolienne, elle est donnée par la relation suivante  $P_t = T_t \Omega_t$
- $S = \pi R_t^2$  : surface balayée par la turbine éolienne
- $\rho$  : masse volumique de l'air
- $T_t$  : couple de la turbine éolienne

Le couple de la turbine est déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{\Omega_t} \quad (\text{II.1.22})$$

Le multiplicateur de vitesse est décrit par les deux équations suivantes :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad \text{Et } \Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.1.23})$$

Avec :

- $T_{em}$ , le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone
- $\Omega$ , est la vitesse mécanique de la génératrice
- $G$ , est le gain du multiplicateur de vitesse

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $G$ , le couple mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime :

$$T_g = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{G \Omega_t} \quad (\text{II.1.24})$$

D'où

$$T_g = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{\Omega} \quad (\text{II.1.25})$$

En déduit la puissance disponible sur l'arbre du générateur électrique :

$$P_g = T_g \cdot \Omega = T_g \cdot G \cdot \Omega_t = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3 \quad (\text{II.1.26})$$

### II.1.6 La stratégie de la commande MPPT:

La caractéristique  $C_p(\lambda)$  qui est de forme parabolique admet un maximum  $C_{pmax}$  pour  $\lambda_{opt}$ . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (**M.P.P.T**). Pour une vitesse de vent  $v$  donné correspond une vitesse de rotation qui donne  $\lambda_{opt}$  et par conséquent, pour que le système fonctionne en puissance maximale, la loi de commande pour la référence du couple électromagnétique d'une machine asynchrone est :

$$T_{em} = \frac{C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{G^3} \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.1.27})$$

La transmission mécanique est représentée par l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = T_{em} - T_t \tag{II.1.28}$$

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g$$

Avec :

- J, inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine
- f, coefficient de frottement dynamique

La puissance mécanique optimale fournie par l'éolienne à pour expression :

$$P_{m\_opt} = T_{em} \Omega \tag{II.1.29}$$

On remplace l'expression du couple électromagnétique d'une machine asynchrone, on obtient :

$$P_{em} = \frac{C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{G^3} \cdot \Omega^3 \tag{II.1.30}$$

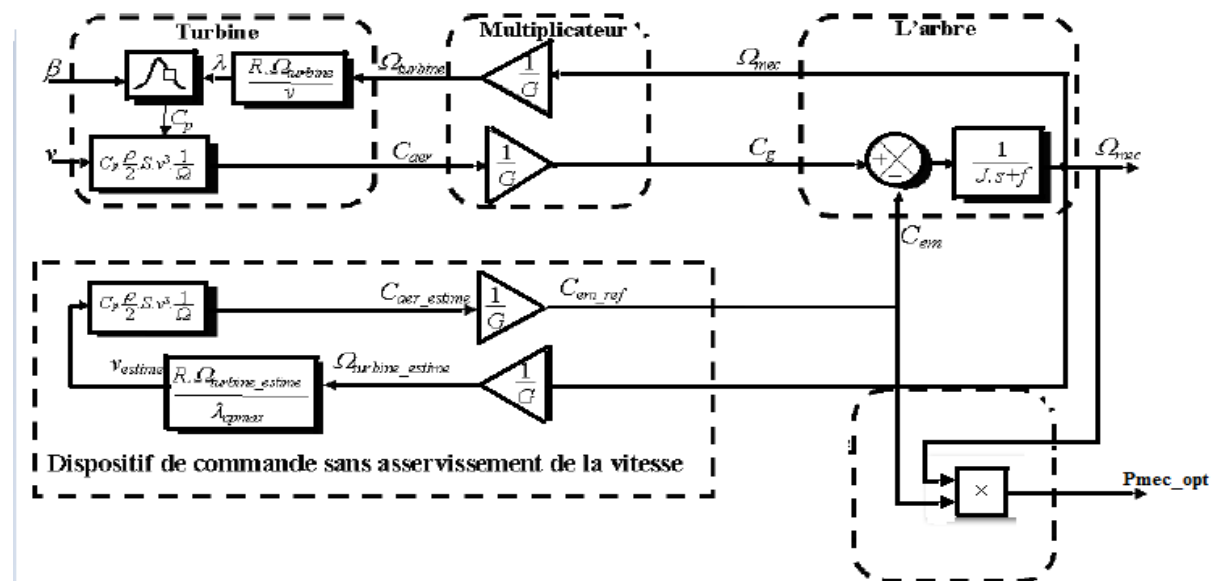


Figure II.4 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine éolienne avec MPPT

### II.1.7 Système d'orientation des pales :

Il existe divers types de systèmes de régulation de l'angle de calage des pales. L'angle peut être variable tout le long de la pale, comme l'exemple ici étudié, ou simplement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la

force centrifuge, Soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externes figure II.5 [10]

Le transfert de cette énergie jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement les couts de fabrication. Le système hydraulique est néanmoins le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance alors que le système électrique est uniquement utilisé pour les éoliennes de forte puissance. Normalement, il faudrait également tenir compte des efforts d'origine inertielle (gravité, force centrifuge) et des efforts d'origine élastique (déformation des pales). Dans cette étude, ces effets ne sont pas pris en compte car ils ont peu d'influence sur les éoliennes à vitesse variable. [1][12]

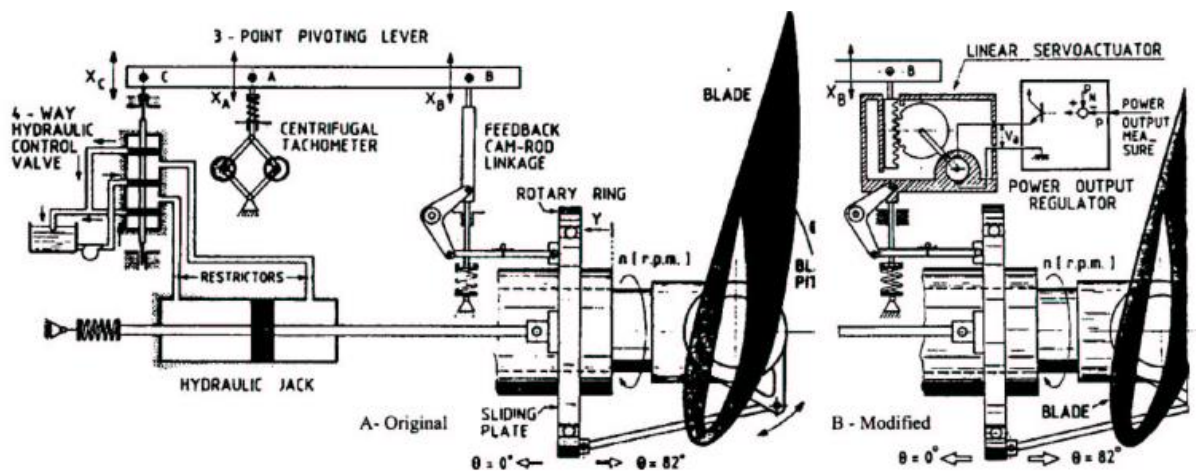


Figure II.5 : Exemple d'actionneur d'angle d'orientation des pales

### II.1.7.1 Principe de fonctionnement

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch contrôle". En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position "en drapeau" pour  $B=90^\circ$  à la vitesse maximale (arrêt de la turbine). Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- Il permet d'effectuer un control actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sûr en dessous de la limite de sécurité).
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.



- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants. [13]

### II.1.7.2 Procédure de limitation de puissance :

Comme nous l'avons déjà cité dans les paragraphes précédent que la limitation de puissance capté par la turbine pour des vents fort ce résume sur la partie mécanique de l'éolienne, le principe est de faire pivoter les pales autour de leurs axes pour réduire la puissance capté par la turbine, cela signifie la dégradation du coefficient de puissance  $C_p$ .

### II.1.7.3 Modélisation du système d'orientation des pales :

L'étude dynamique du système d'orientation des pales nécessite la connaissance des différents couples appliqués sur les pales. La représentation de ces couple d'origine inertielle (gravité, force centrifuge,..), ou d'origine élastique (déformation des pales), exige la modélisation de la dynamique des structures de la pale, du comportement de l'air autour des pales et les frottements dans les paliers [14].

Dans ce travail, on se limite à la modélisation du système de régulation de l'angle de calage sans tenir compte de ces couples. La figure II.6 montre la boucle de régulation du système d'orientation des pales. Elle a pour entrer la puissance électrique générée et doit satisfaire les fonctions suivantes [14].

1. Génération de l'angle de référence  $\beta_{ref}$ .
2. Régulation de l'angle d'orientation.
3. La régulation de la vitesse de l'angle.
4. Le contrôle de l'actionneur.

La génération de l'angle de référence : la conception analytique de ce réglage est complexe à cause des caractéristiques des pales et du modèle non linéaire de la turbine. Il est plus pratique d'utiliser des caractéristiques renseignant les puissances mesurées pour différents angles de calage. Dans le cas de manque de ces informations l'angle de référence est obtenu par le réglage de l'erreur entre la puissance mesurée et celle de référence figureIII.3 Has

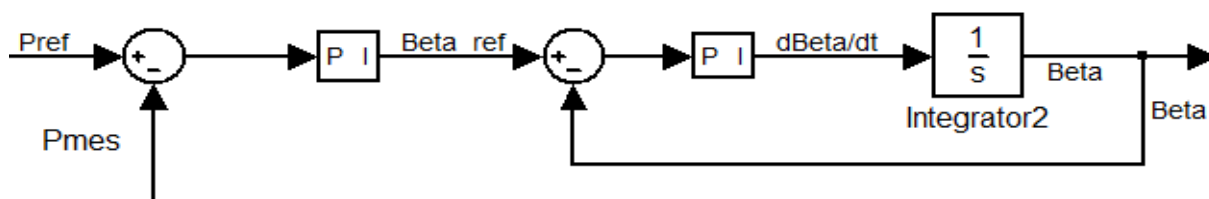
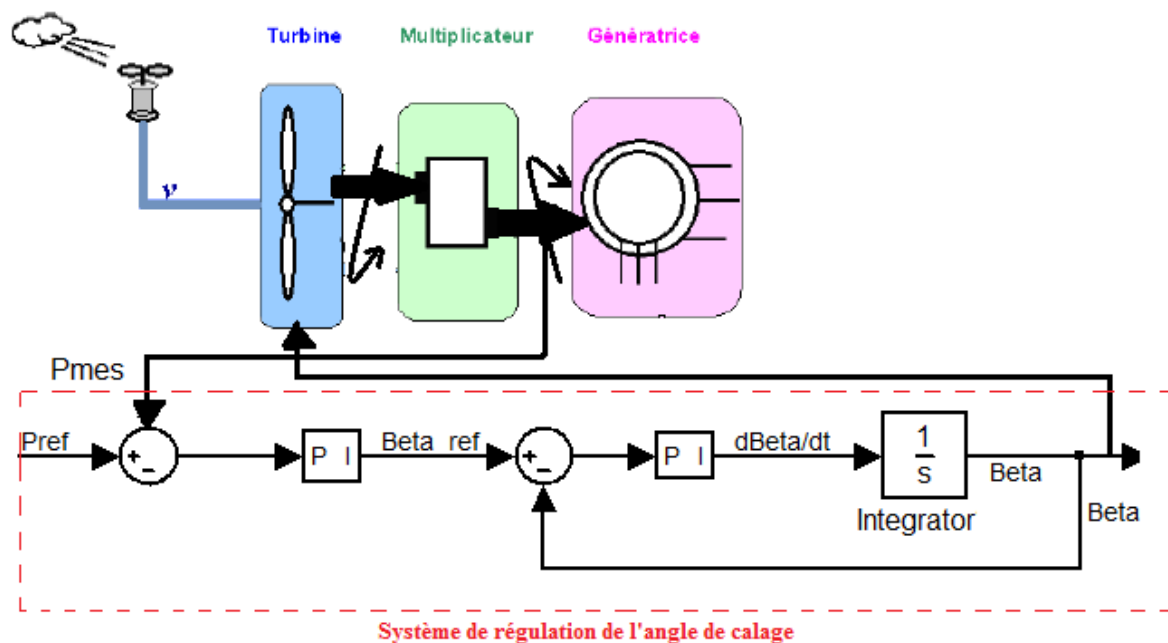


Figure II.6 : Modélisation du système de régulation de l'angle de calage

La première et la quatrième fonction n'ont pas été présentées, cela est dû à la complexité de l'intégration du modèle dans le schéma global, pour la régulation de vitesse qui a deux fonctionnements, la vitesse de variation de l'angle de calage doit être limitée à environ  $10^\circ/s$  lors d'un fonctionnement normal et de  $20^\circ/s$  pour les cas d'urgence de plus les constantes de temps (le temps de repense) des deux boucles (position et vitesse) sont différents. Pour le contrôle de l'actionneur, le manque de données comme le moment d'inertie de la pale et le coefficient de frottement.

#### II.1.7.4 Intégration de la boucle de régulation dans le schéma global :

La figure II.7 montre le système global avec la boucle de régulation simplifiée de l'angle de calage des pales.



**Figure II.7** Schéma bloc simplifié du système d'orientation des pales

#### II.1.7.5 Solution analytique pour la génération de l'angle de calage :

Comme nous l'avons déjà évoqué aux paragraphes précédents, que la conception analytique de ce réglage est complexe à cause des caractéristiques des pales et du modèle non linéaire de l'angle de calage des pales qui sera présenté dans ce qui suit :

#### II.1.7.6 Démonstration du processus :

Le principe est toujours de garder la puissance constante à sa valeur nominale pour des vents qui dépassent la vitesse pour laquelle la puissance est nominale, l'équation suivante

montre la puissance captée par la turbine en fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance  $C_p$  :

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot S \cdot C_p \cdot V_v^3 \quad (\text{II.1.31})$$

$$P_T = K C_p V_v^3 \quad (\text{II.1.32})$$

Avec :

$$K = \frac{1}{2} \cdot S \quad (\text{II.1.33})$$

Comme le montre l'équation précédente, la puissance est en fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance ce qui signifie que l'augmentation du vent provoque directement l'augmentation de la puissance de la turbine, pour la maintenir constante il faut diminuer le  $C_p$  donc agir sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , cela veut dire que pour chaque vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale il faut calculer le  $C_p$  par la formule II.1.34

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14 - 0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.1.34})$$

## II.2 Modélisation de la partie électrique :

### II.2.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation :

La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais).

Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bagues/balais (figure II.8).

Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.é.m.) dans les enroulements rotoriques.

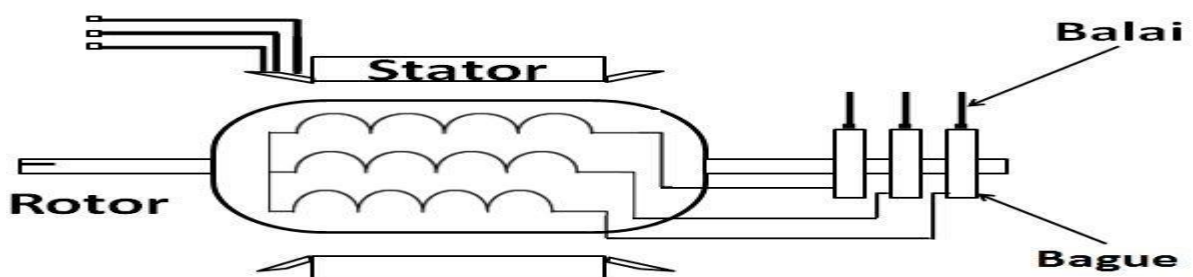


Figure II.8- Structure de la MADA

## II.2.2 Modélisation de la MADA :

### II.2.2.1 Hypothèse simplificatrice :

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation en base sur la transformation de Park qui rapporte les équations statorique et rotoriques triphasé a deux axes perpendiculaire (biphasés) appelés l'axe direct d et l'axe quadratique q.

Pour des raisons de simplification : nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine sera supposée idéale, c'est à dire que les ampères-tours seront supposés distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques d'espace seront négligés.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la variation de la température et on négligé l'effet de peau.
- Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées.
- La saturation du circuit magnétique sera négligée.
- Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles.

### II.2.2.2 Modèle de la MADA dans le repère abc

La machine est représentée par six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle  $\theta$  repère l'axe d'une des phases rotoriques par rapport à l'axe fixe de la phase statorique. Les flux sont comptés positivement selon les axes des phases.

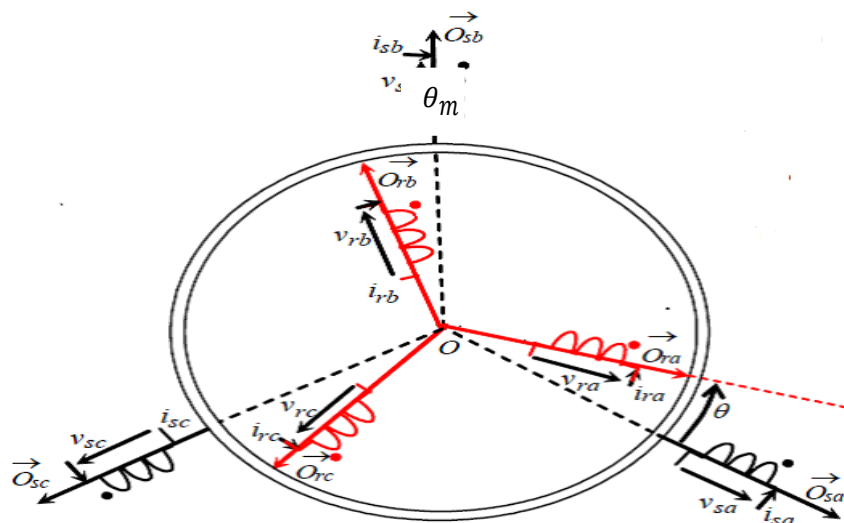


Figure II.9- Représentation de la MADA dans l'espace électrique

### II.2.2.2.1 Equations électriques

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 2.1})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.2})$$

Donc l'équation générale du stator est :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II. 2.3})$$

Avec :

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tensions statorique ;}$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de courants statorique ;}$$

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de flux d'enroulement statorique ;}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances statorique.}$$

Pour les phases rotoriques on a :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 2.4})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 2.5})$$

Donc l'équation générale du rotor est :

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.2.6})$$

Avec :

$$[v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tensions rotorique ;}$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur du courants rotorique ;}$$

$$[\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de flux rotorique ;}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances rotorique.}$$

#### II.2.2.2.2 Equations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} [\Phi_{sabc}] = [L_{ss}] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_{rr}] [i_{rabc}] + [M_{sr}] [i_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{II.2.8})$$

Avec :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rS}] = [M_{sr}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.9})$$

$[L_{SS}], [L_{rr}]$ : Matrices d'inductances statorique et rotorique ;

$[M_{sr}]$ : Matrice d'inductance mutuelle,  $[M_{sr}]^t = [M_{rS}]$

$L_S, L_r$ : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement ;

$M_S, M_r$ : Inductances mutuelles entre deux phases statorique et rotorique respectivement ;

$M_{sr}$ : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique.

D'après les expressions précédentes, on aura :

$$\begin{bmatrix} [\Phi_{sabc}] \\ [\Phi_{rabc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{sabc}] \\ [i_{rabc}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.10})$$

Finalement

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]] \\ [V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{sr}]^t[i_{sabc}]] \end{cases} \quad (\text{II.2.11})$$

### II.2.2.3 Modèle de la MADA dans le repère de PARK

#### II.2.2.3.1 Transformation de Park

La complexité et la non linéarité des équations précédentes rendent leur résolution très difficile, alors il est indispensable d'appliquer la transformation de Park pour avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants ce qui va faciliter sa résolution.

Les relations entre les grandeurs triphasées et les grandeurs biphasées s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.12})$$

Avec :  $P(\theta)$  : La matrice de transformation de Park donnée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.13})$$

Et la transformation inverse de Park est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.14})$$

$\theta$  : Est l'angle de rotation électrique entre l'axe d du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase du stator.

$$\text{Le transfert biphasé vers triphasé se fait par: } \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.15})$$

Et le transfert triphasé vers biphasé ce fait par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.16})$$

En appliquant cette transformation aux équations précédentes (tension et flux) de la MADA (II.2.3), (II.2.6), (II.2.8) on obtient :

### II.2.2.3.2 Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.2.17})$$

### II.2.2.3.3 Equation magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.2.18})$$

Avec :

$$l_s = L_s - M_s: \text{Inductance cyclique statorique de la machine ;} \quad (\text{II.2.19})$$

$$l_r = L_r - M_r: \text{Inductance cyclique rotorique de la machine ;} \quad (\text{II.2.20})$$

$$M = \frac{3}{2} M_{sr}: \text{Mutuelle de la machine.} \quad (\text{II.2.21})$$

### II.2.2.3.4 Equation mécanique

Le couple électromagnétique de la machine en fonction des flux et des courants statorique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = P(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.2.22})$$

Ce couple en fonction des flux statorique et des courants rotoriques est donné par :

$$C_{em} = P \frac{M}{l_s} (\Phi_{ds} i_{qr} - \Phi_{qs} i_{dr}) \quad (\text{II.2.23})$$

Avec :

P : est le nombre de pair de pôles de la machine

## II.2.3 Modèle de la MADA en vue de la commande

### II.2.3.1 Choix du référentiel

En choisissant un référentiel (d q) lié au champ tournant statorique, donc :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{Et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad (\text{II.2.24})$$



On oriente ce champ à fin que l'axe  $d$  soit aligné sur le flux statorique

Donc :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.2.25})$$

L'expression du couple électromagnétique de la machine devient :

$$C_{em} = P \frac{M}{l_s} \Phi_s i_{qr} \quad (\text{II.2.26})$$

Les expressions des flux statorique deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_s = l_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = l_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.2.27})$$

Dans les cas des machines de moyenne et fort puissance, la résistance statorique peut être négligée. Alors les expressions des tensions statoriques de la machine se réduisent à

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d\Phi_s}{dt} \\ v_{qs} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.2.28})$$

Avec :

$\omega_s$ : pulsation électrique des grandeurs statoriques.

De l'hypothèse du flux statorique constant, on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s \end{cases} \quad R_s \ll 0 \quad (\text{II.2.29})$$

### II.2.3.2 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

Les puissances actives et réactive statorique, dans un repère diphasé, d'une machine asynchrone à double alimentation s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.2.30})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées  $v = 0$

Donne :

$$\begin{cases} P_s = v_s i_{qs} \\ Q_s = v_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.2.31})$$

A partir de l'équation (II.2.27), on peut établir une relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{l_s} i_{dr} + \frac{\Phi_s}{l_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{l_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.2.32})$$

En remplaçant  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  dans l'équation (II.2.31), on obtient les expressions des puissances active et réactive, et après avoir approximé  $\Phi_s$  par  $\frac{v_s}{\omega_s}$  :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \frac{M}{l_s} i_{qr} \\ Q_s = -v_s \frac{M}{l_s} i_{dr} + \frac{v_s^2}{l_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.2.33})$$

### II.2.3.3 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( l_r - \frac{M^2}{l_s} \right) i_{dr} + g \frac{M v_s}{l_s} \end{cases} \quad (\text{II.2.34})$$

$$\text{Ou } g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}, \text{ correspond au glissement de la MADA.} \quad (\text{II.2.35})$$

$v_{dr}$  et  $v_{qr}$  sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus, et par conséquent les puissances active et réactive désirées.

### II.2.3.4 La commande direct

La commande direct consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactives injecté au réseau ( $P_g$  et  $Q_g$ ). [11]

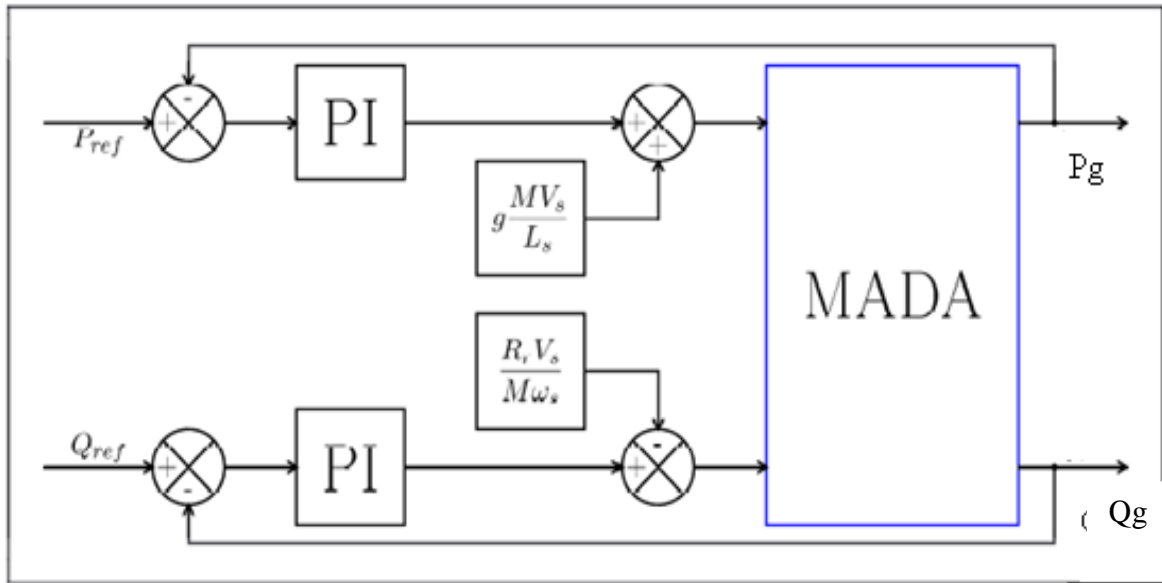


Figure II.10-Schema bloc de la Commande directe

II.2.3.5 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur proportionnel integral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables.

La (figure II.11) montre une partie de notre système corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $kp + \frac{K_i}{p}$ , correspondant aux régulateurs utilisés dans la (figure II.11)[11].

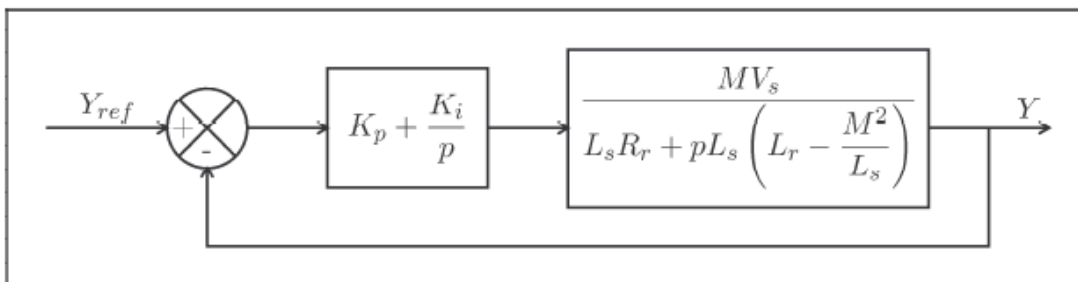


Figure II.11-système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTB = \frac{p + \frac{K_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P + \frac{L_s R_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \tag{II. 2.36}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de poles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_S R_S}{L_S (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{II. 2.37})$$

$$FTBO = k_p \frac{\frac{MV_S}{L_S (L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (\text{II. 2.38})$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (\text{II. 2.39})$$

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_S (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_S} \quad (\text{II. 2.40})$$

Le terme  $\tau_r$  designe ici le temps de reponse du système nous choisissons de fixer celui-ci a 10ms ,ce qui represente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'energie sur le reseau avec la MADA qu'on a choisie.

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

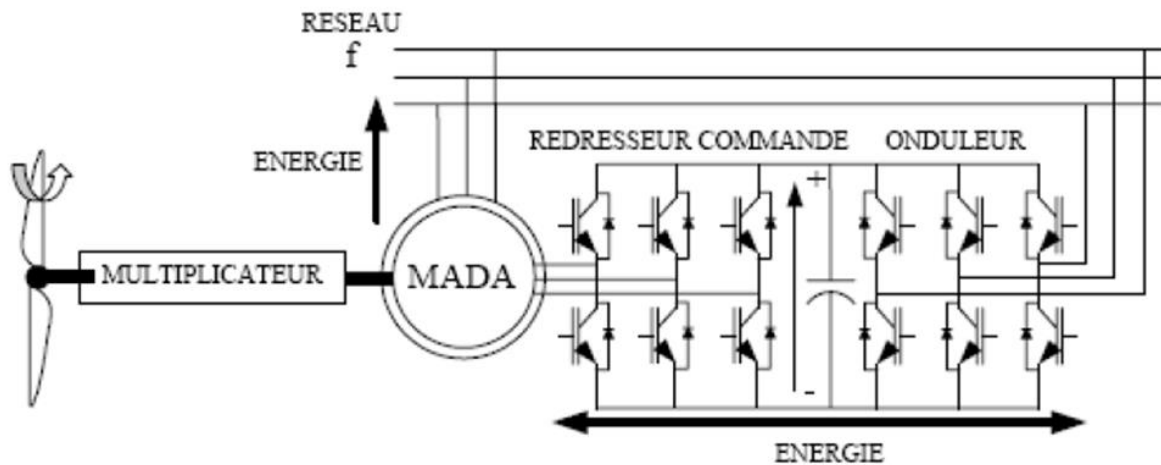
$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_S (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_S} \quad (\text{II. 2.41})$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_S}{MV_S} \quad (\text{II. 2.42})$$

#### II.2.4 Modelisation des convertisseurs statiques :

La structure (figure II.12) utilise deux ponts triphases d'IGBT commondables par modulation de largeur d'impulsion . Ce choix permet d'agir sur deux degres de liberte pour chaque convertisseur :

Un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du cote de la machine ,et un contrôle des puissances actives et reactives transitees du cote reseau.



**Figure II.12-** MADA alimentée par des convertisseurs à MLI

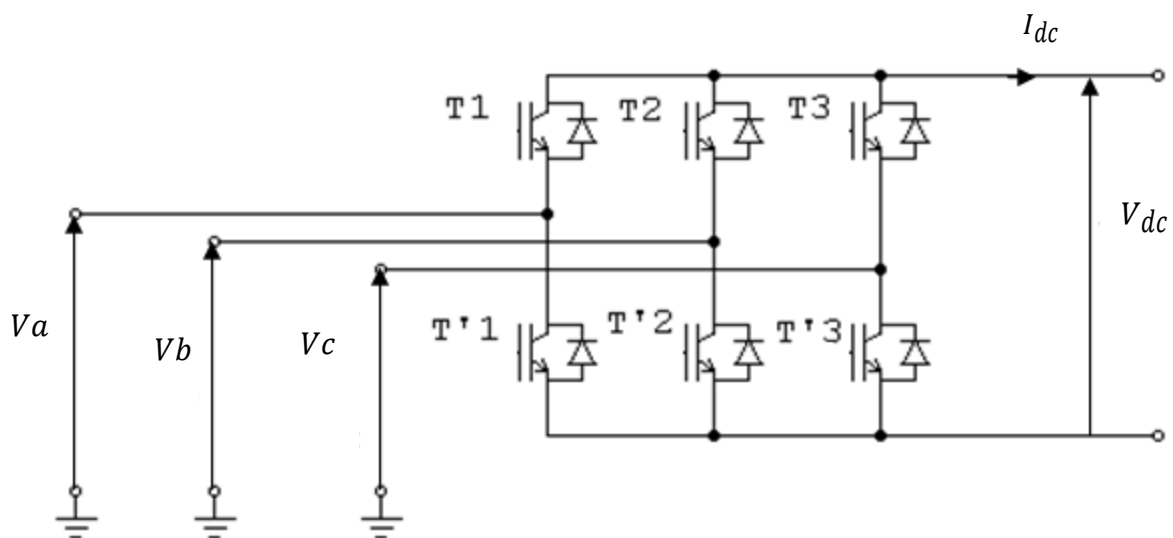
Cette configuration hérite des caractéristiques suivantes :

- La puissance rotorique est bidirectionnelle, ce qui permet les fonctionnements en hypo et hyper synchrone .
- Le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

#### II.2.4.1 modélisation du redresseur MLI

Parmi tous les convertisseurs AC-DC la solution de référence est le redresseur triphase à modulation de largeur des impulsions (La figure II.13) .

Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée.



**Figure II.13-** Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.43})$$

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.2.44})$$

Avec :

$V_{dc}$  :Tension redressée.

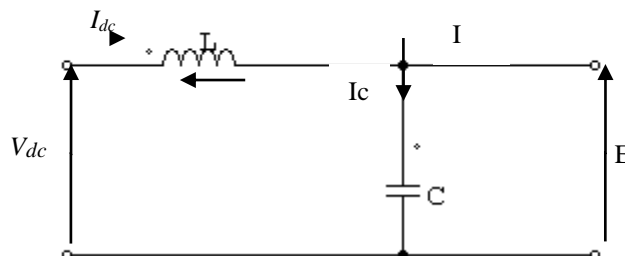
$i_{dc}$  : courant redressée.

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant a l'état de l'interrupteur.

### II.2.4.2 modilisation du filtre de bus continu

Pour corrigé la source de tension continue,on insert a la sortie du redresseur une capacité C,celle-ci absorbe la différence entre le courant unidirectionnel  $I_{dc}$  et supprime les brusques variations de E lors des commutations , par contre ,pour réduire l'ondulation du courant I et proteger l'onduleur contre la vitesse critique de croissance du courant  $di/dt$  ;on place en série une inductance de lissage L.

Le schéma représentatif du filtre est donné par la figure II.14.



**Figure II.14**-Représentation du filtre

Les equations du filtre sont :

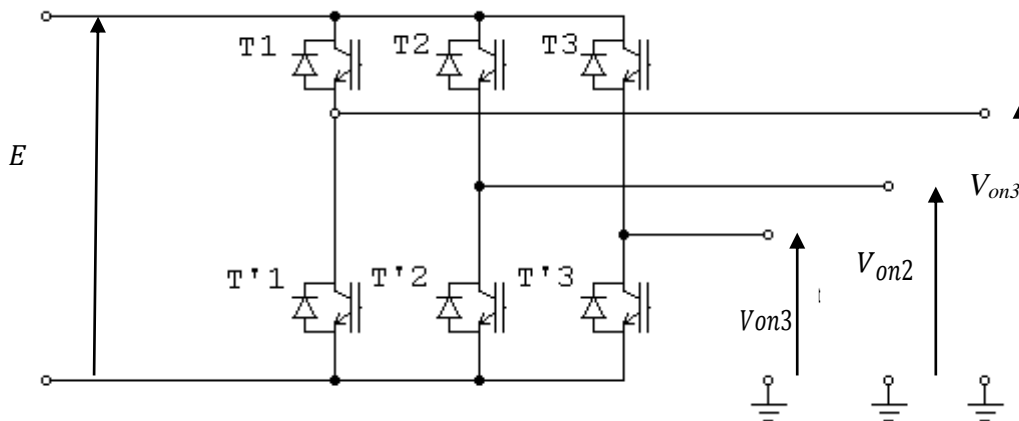
$$\begin{cases} \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{1}{L} (V_{dc} - E) \\ \frac{dE}{dt} = \frac{1}{C} (I_{dc} - I) \end{cases} \quad (\text{II.2.45})$$

### II.2.4.3 Modélisation de l'onduleur MLI

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continue en une alimentation de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif.

L'onduleur triphasé possédant six cellules de commutation (IGBT) et six diodes de roue libre. Chaque bras de l'onduleur est composé de deux cellules de commutation constituées chacune de l'interrupteur avec sa diode, la sortie correspondant au point milieu du bras.

Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires pour éviter le court-circuit de l'alimentation continue de l'onduleur (La figure II.15).



**Figure II.15** Représentation schématique d'un onduleur MLI

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$F'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction  $S_i$  avec ( $i = a, b, c$ ) tel que :

$$S_i = (F_i - F'_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } F_i = 1 (F'_i = 0) \\ -1 & \text{si } F_i = 0 (F'_i = 1) \end{cases}$$

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matérielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.2.46}$$

Avec :

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur

#### II.2.4.4 Commande MLI des convertisseurs

La commande par modulation en largeur d'impulsion ou commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour les interrupteurs et à fixer à l'intérieur de la période de commutation les intervalles de conduction des interrupteurs connectés à une borne de la (source de courant) en fonction d'un signal de référence qui correspond au potentiel souhaité pour cette borne.

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur.

Plusieurs types de MLI sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI sinus avec porteuse triangulaire, la MLI pré-calculée et la MLI vectorielle. Toutefois, nous adaptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration.

### II.3 Résultats de simulation

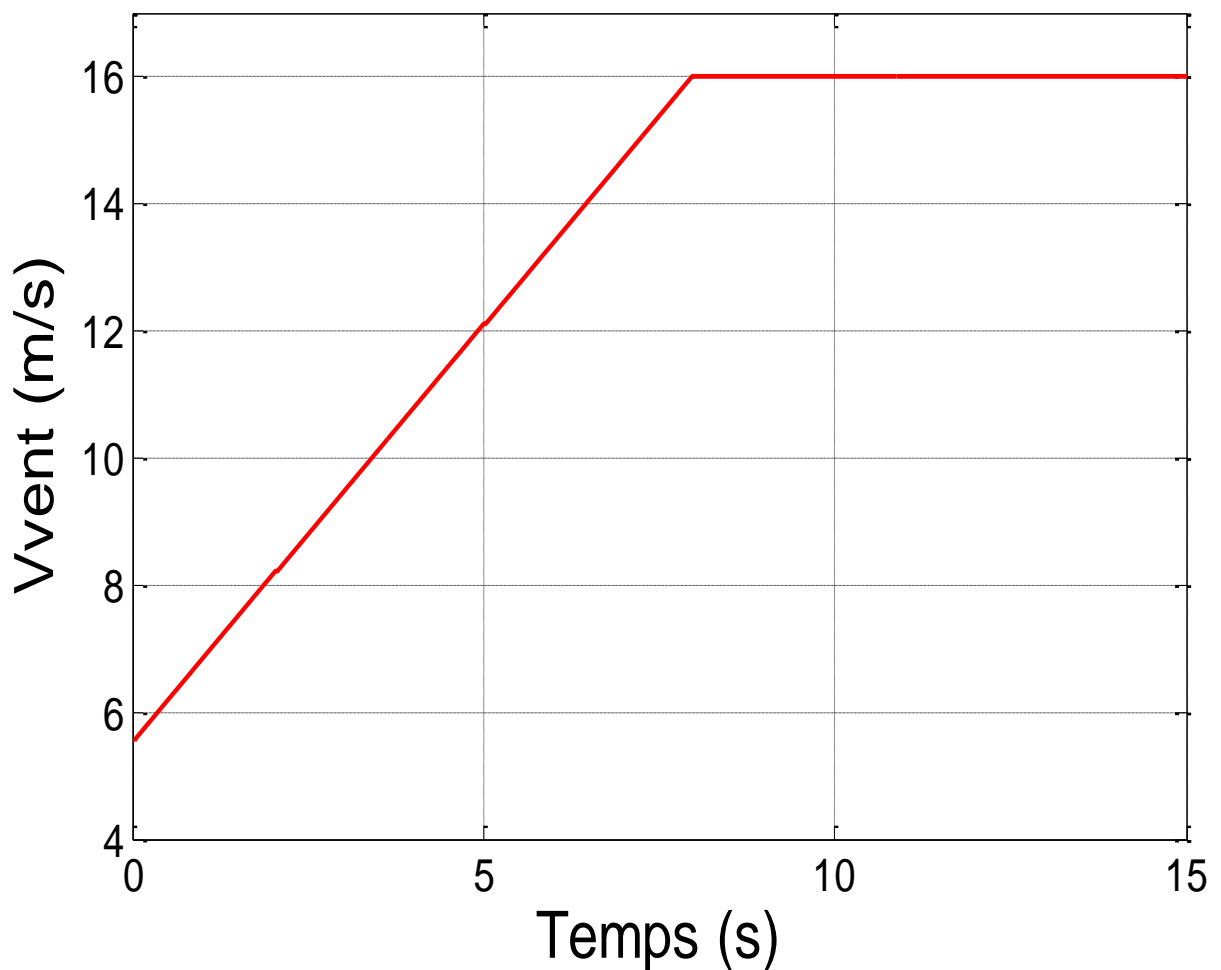


Figure II.16 : Profil de vent



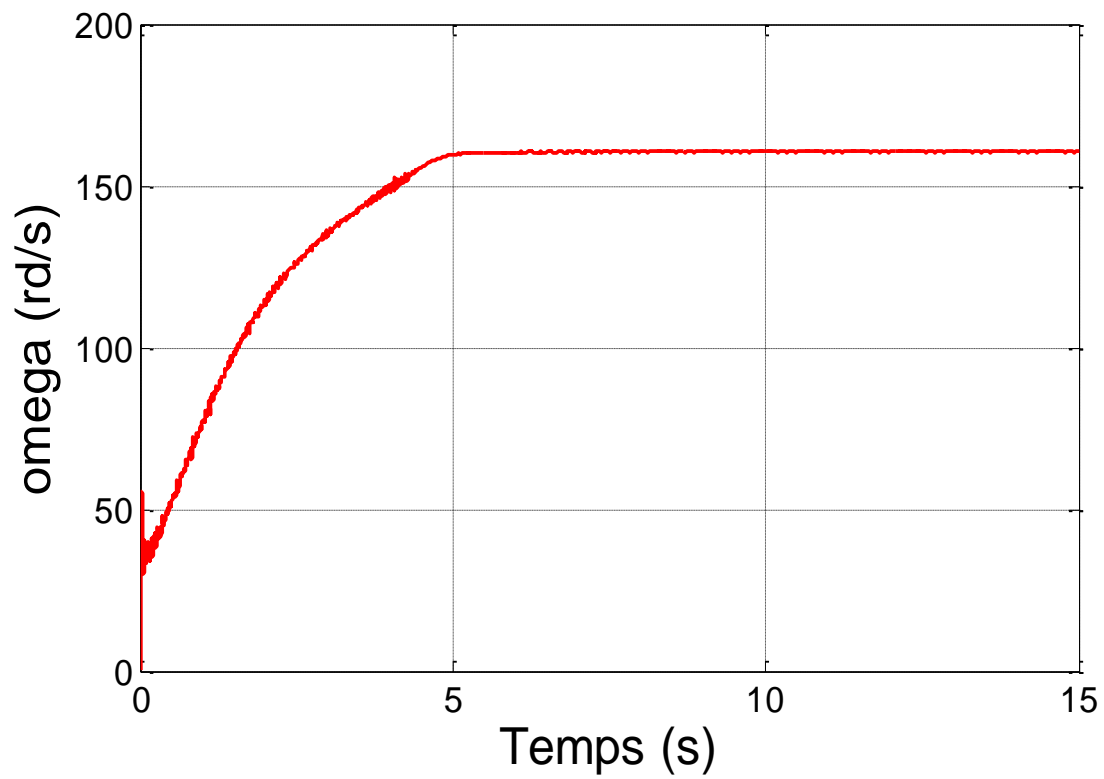


Figure II.17 : Vitesse mécanique de l'éolienne

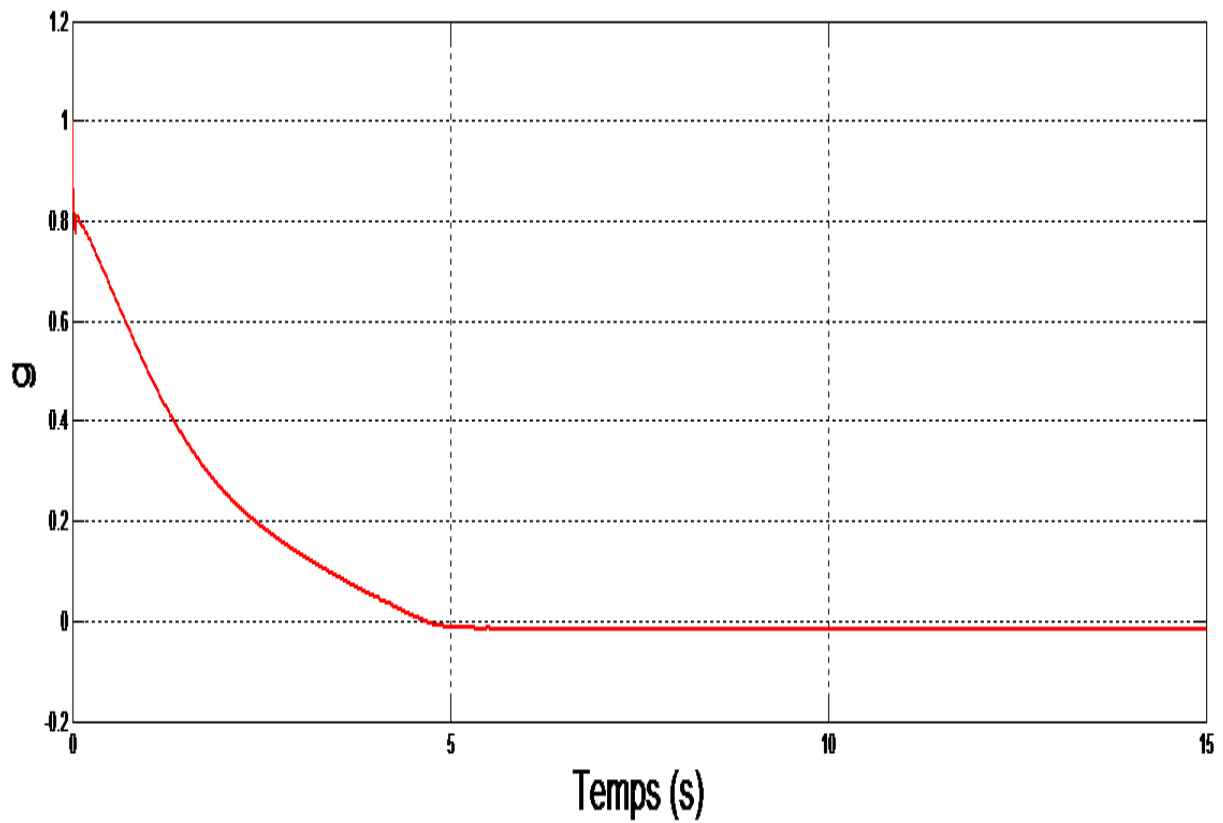


Figure II.18 : Le glissement de la machine

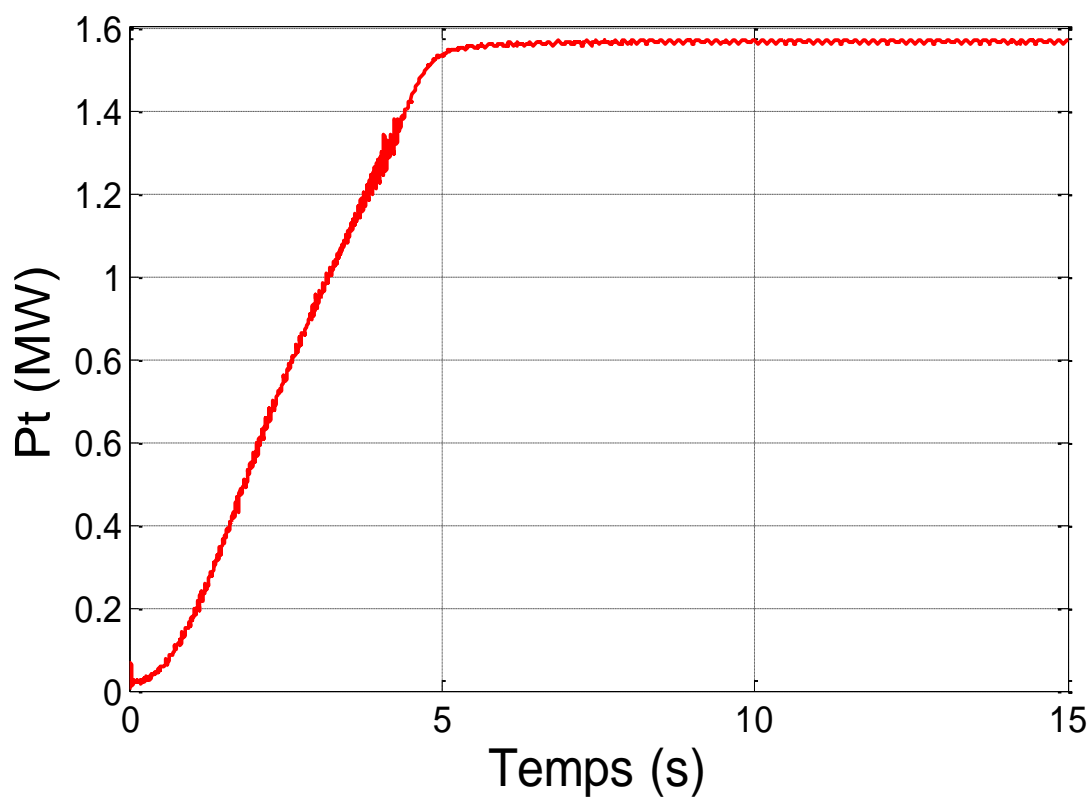


Figure II.19 : Puissance de l'éolienne

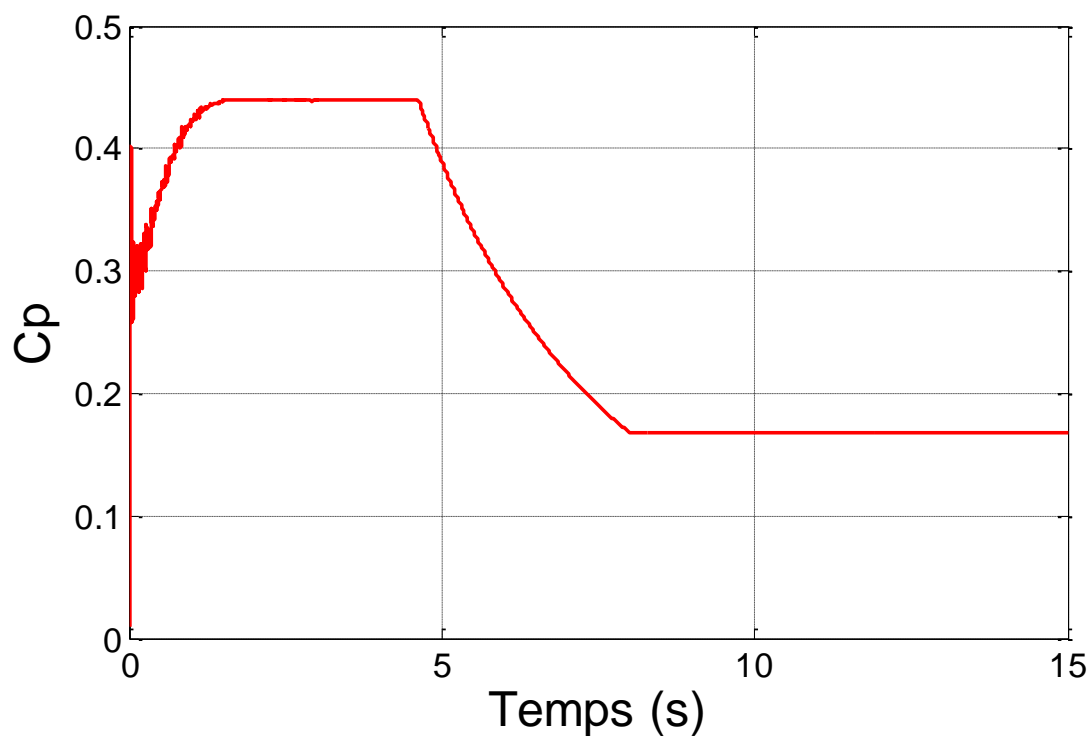


Figure II.20 : Coefficient de puissance

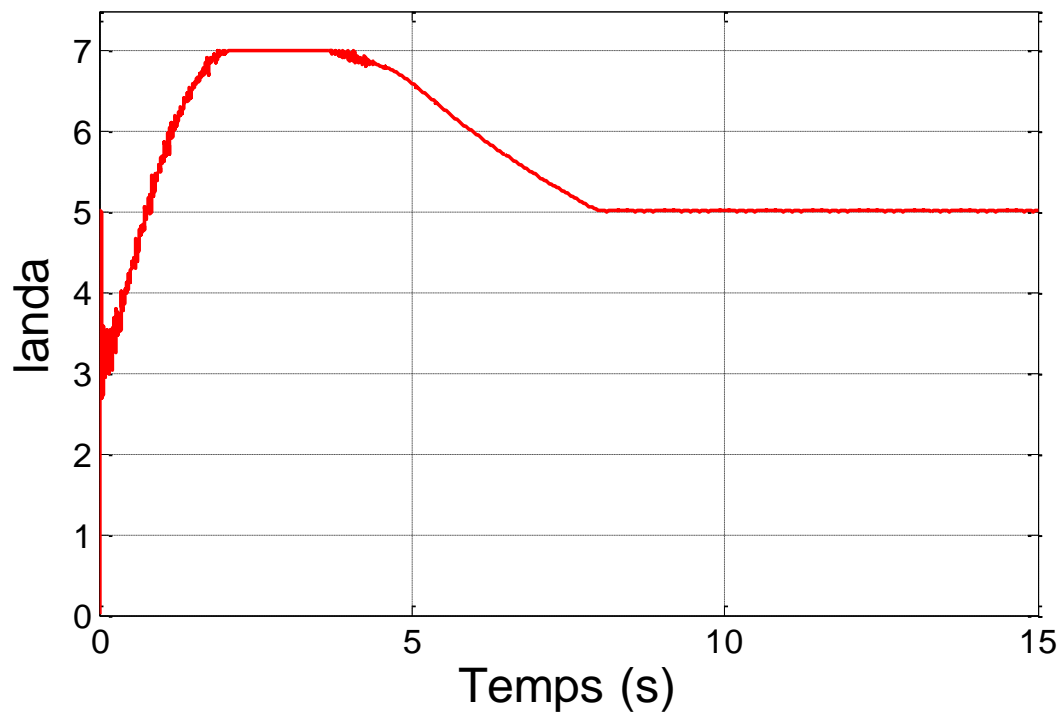


Figure II.21 : Allure de la vitesse spécifique

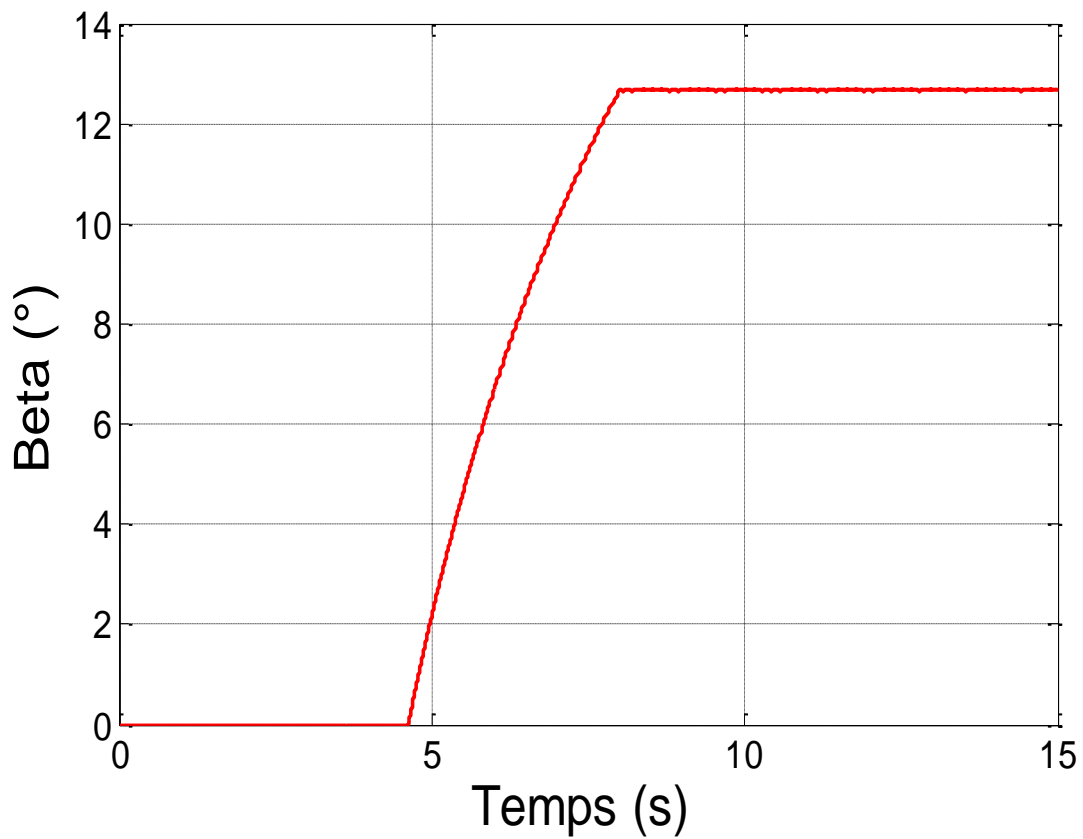


Figure II.22 : Allure de l'angle de calage Beta

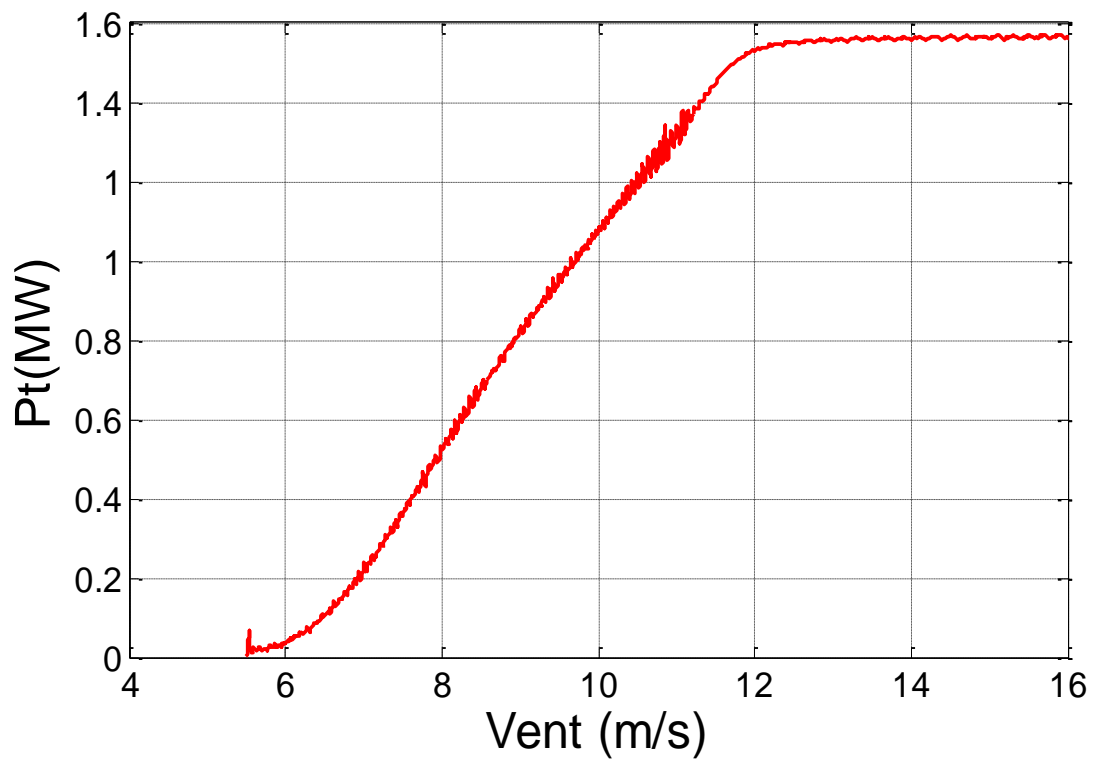


Figure II.23 : Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de vent

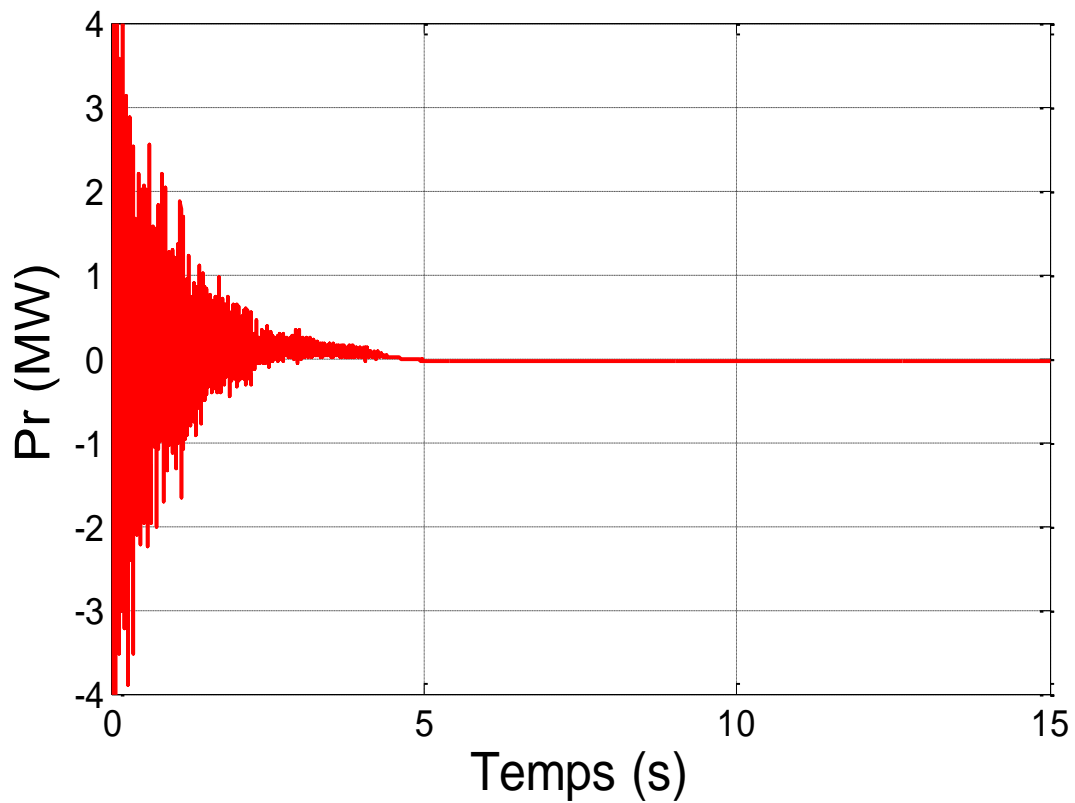


Figure II.24 : Puissance active rotorique

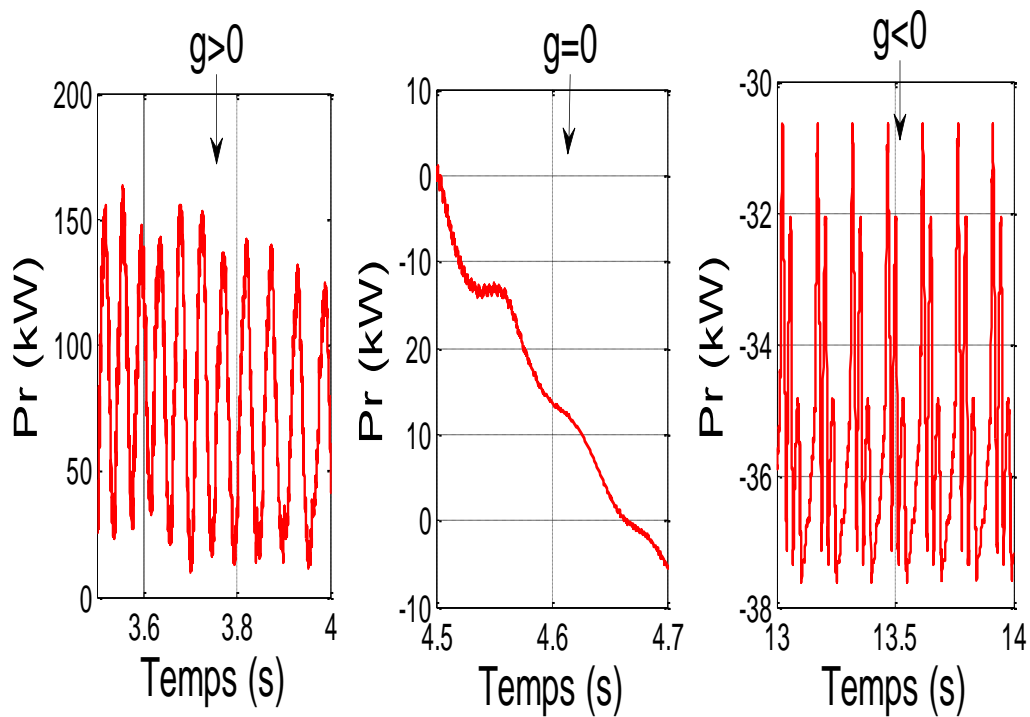


Figure II.25 : Puissance active rotorique pour  $g > 0$ ,  $g \rightarrow 0$  et  $g < 0$

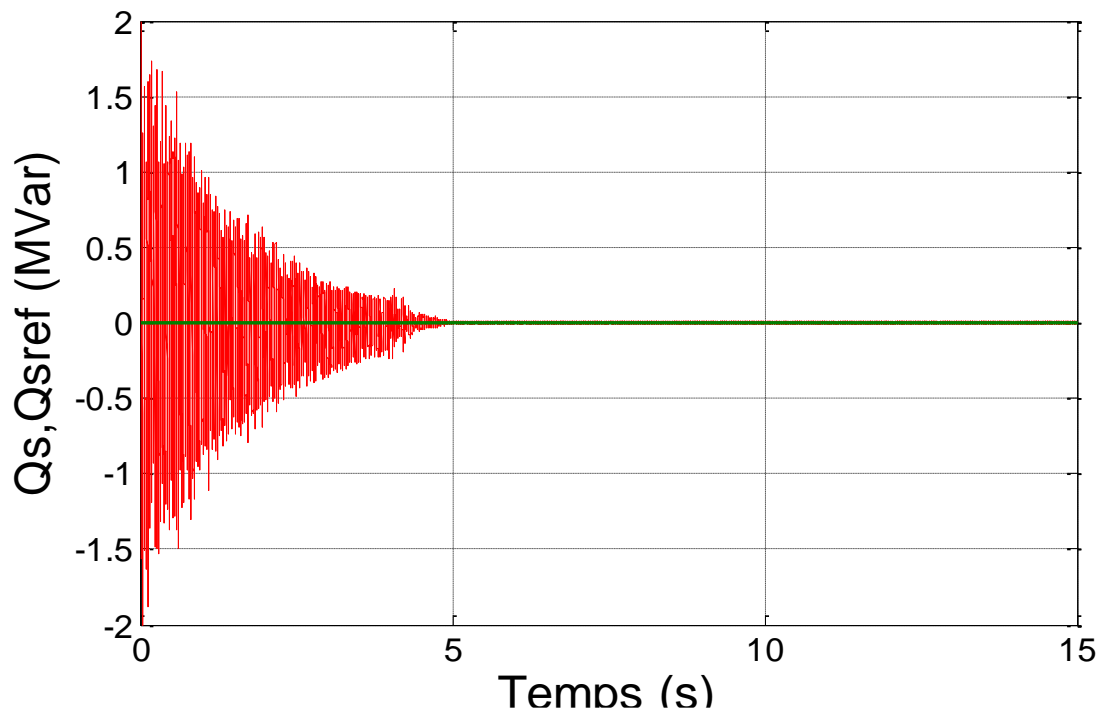


Figure II.26 : Puissance réactive du stator

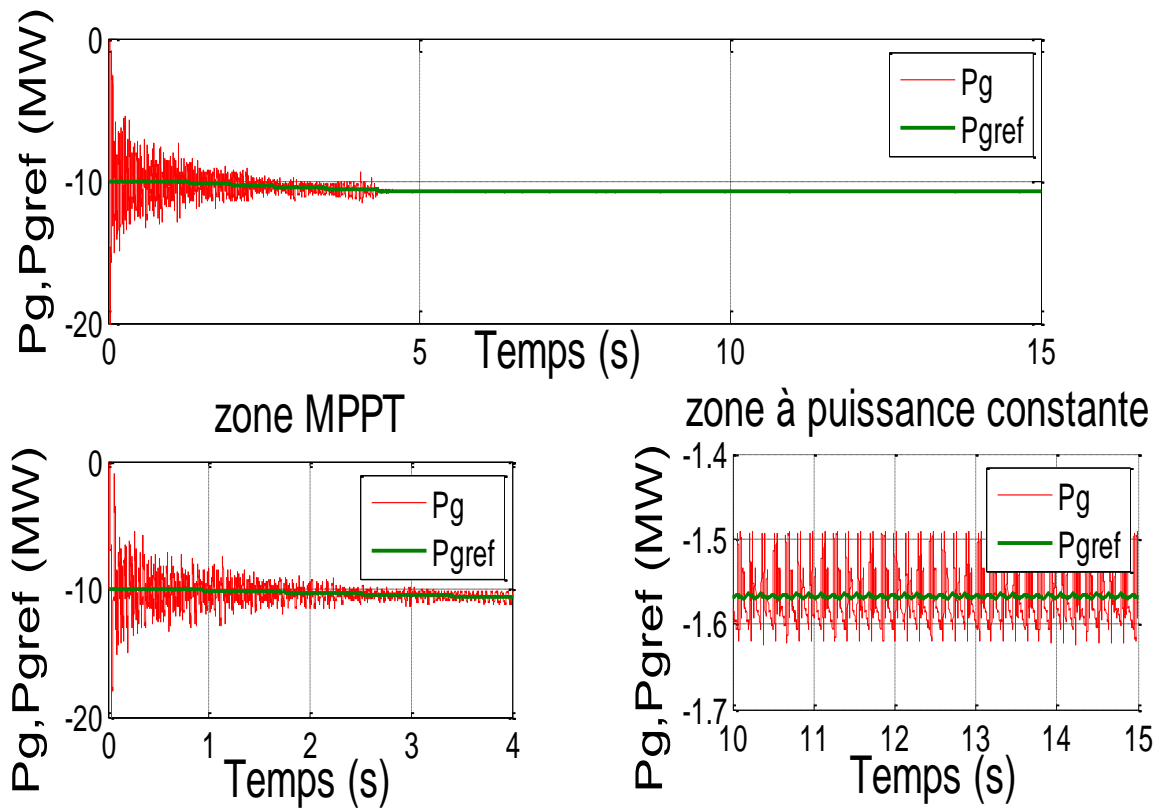


Figure II.27 : Puissance active transmise au réseau

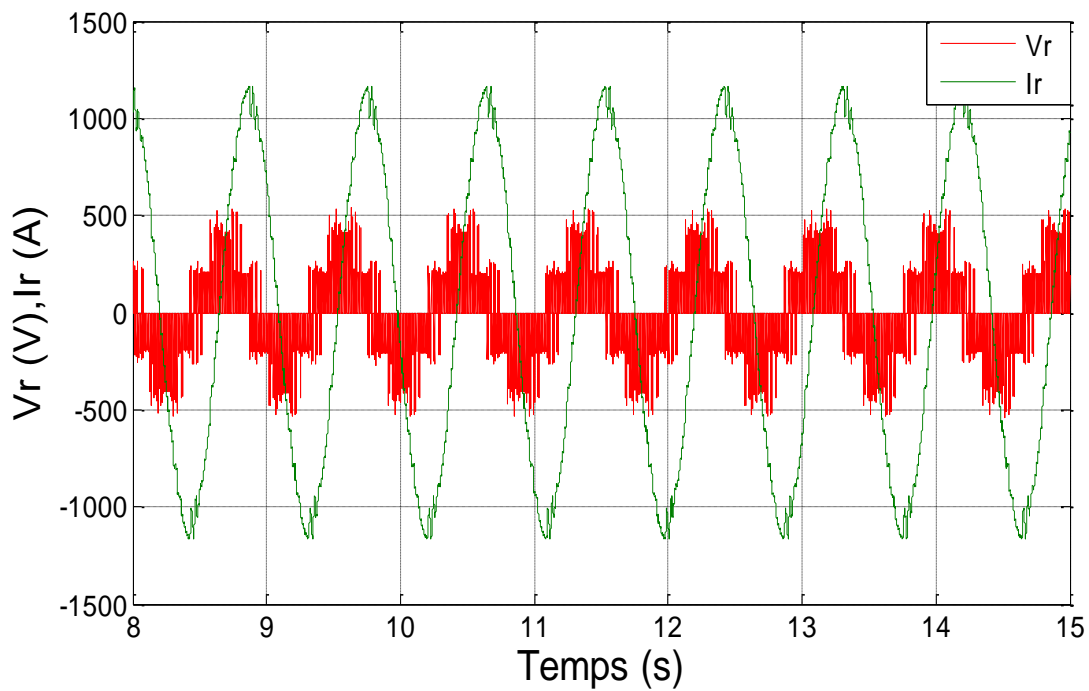


Figure II.28 : Tension et Courant d'une phase rotorique

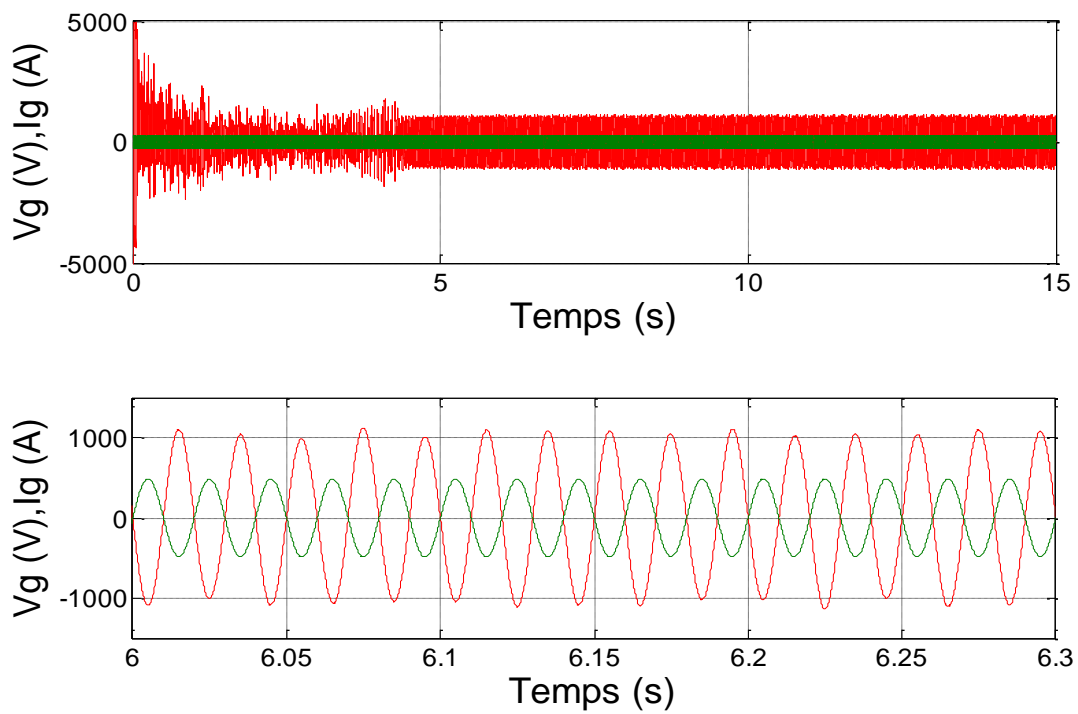


Figure II.29 : Tension et Courant du réseau

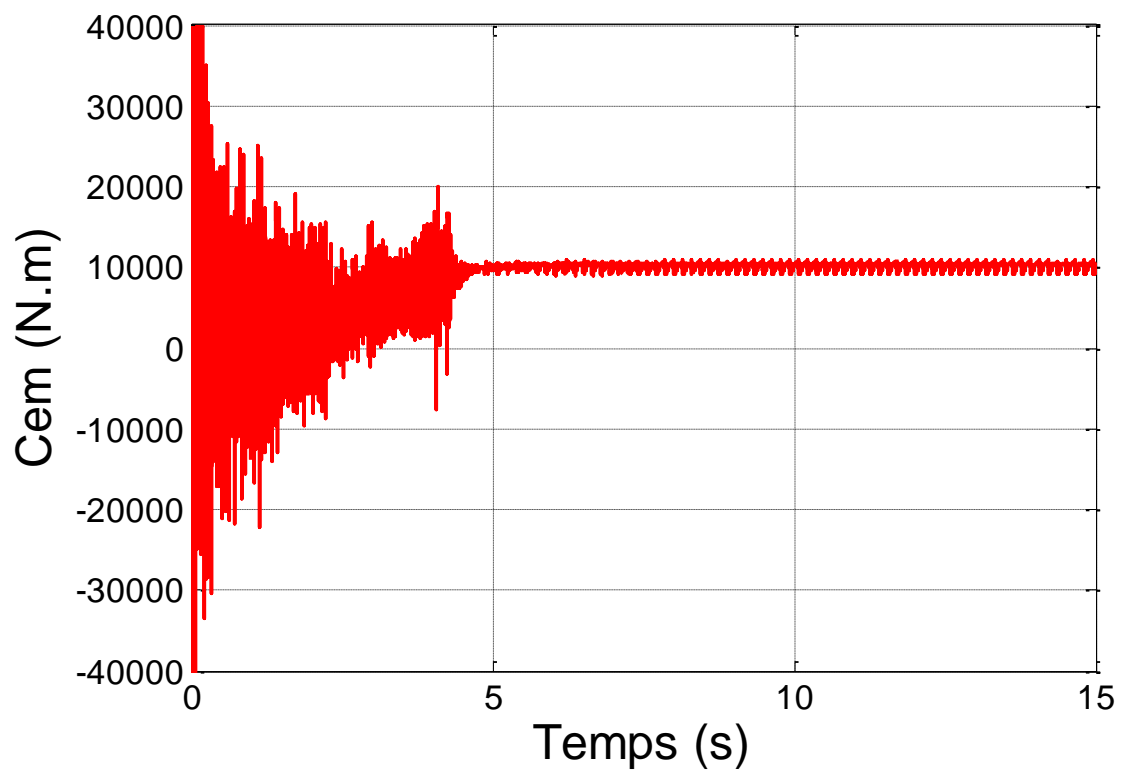


Figure II.30 : Allure de couple électromagnétique

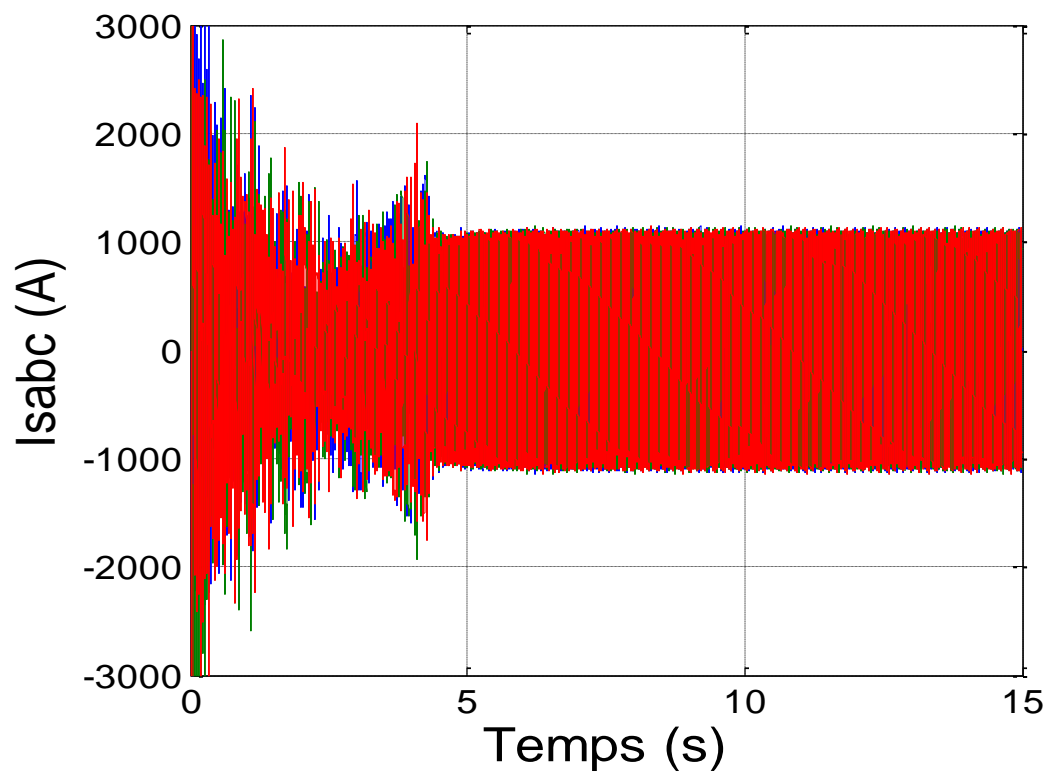


Figure II.31 : Allure des courants statoriques

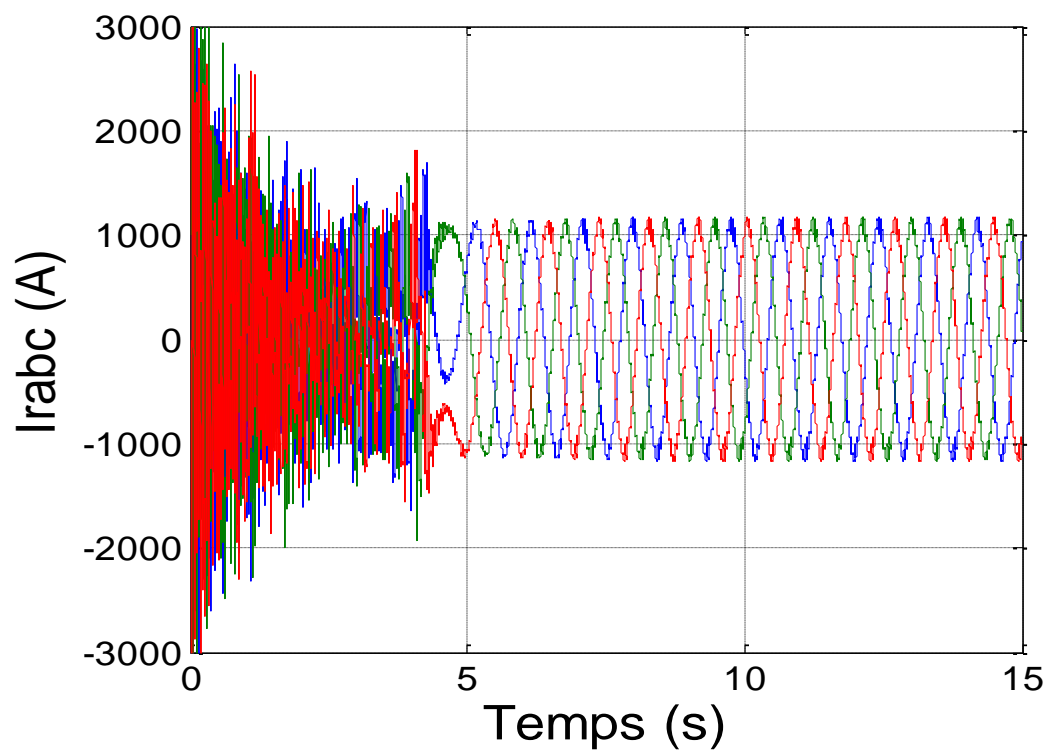


Figure II.32 : Allure des courants rotoriques



## II.4 Interprétation des résultats de simulation

La figure II.17 et la figure II.19 représentent la vitesse mécanique et la puissance mécanique de la turbine respectivement. On constate qu'ils sont l'image de la vitesse du vent sur la zone de fonctionnement MPPT qui est compris entre [0s, 5s], et tend vers une valeur constante dans la zone de limitation de puissance.

La figure II.18 représente le glissement de la machine, qui varie en fonction de la vitesse rotorique. On constate que ce glissement varie entre [-0.024, 1] cela permet avoir les trois modes de fonctionnement (hypo-synchrone, hyper-synchrone et le synchronisme).

La figure II.20, II.21 et II.22 représentant le coefficient de puissance, la vitesse spécifique ( $\lambda$ ) et l'angle de calage ( $\beta$ ), respectivement. On constate que pour les vitesses du vent inférieure à la vitesse nominale ( $\approx 11.2$  m/s), la technique MPPT assure l'optimisation de la puissance captée par la turbine. Cela est assuré en gardant le  $C_p$  à sa valeur maximale  $C_{p_{max}}=0.44$  et le  $\lambda$  optimale  $\lambda_{opt}=7$  ces deux conditions sont vérifiées sur les figures.

Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la puissance est limitée à sa valeur nominale ( $P_n$  proche de 1.5MW). Cette limitation de puissance est obtenue grâce à une dégradation du coefficient de puissance  $C_p$  par augmentation de l'angle de calage ( $\beta$ ).

La figure II.23 représente la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse du vent, on peut observer que la puissance garde une valeur limite pour les grandes vitesses de vent cela grâce au système d'orientation des pales (pitch contrôle).

Les figures II.24 et II.25 représentent la puissance active mise en jeu entre le rotor et le réseau, son sens d'écoulement dépend du signe du glissement, pour  $g < 0$  la puissance est transmise du rotor vers le réseau, pour  $g > 0$  la puissance transmise du réseau vers le rotor, pour  $g \approx 0$  la puissance active rotorique est faible.

La figure II.26 représente la puissance réactive du stator, on remarque que la puissance réactive statorique suit la référence imposée, elle est nulle durant toute la plage de fonctionnement.

La figure II.27, illustre la puissance active injectée au réseau, on constate que cette dernière suit parfaitement la référence qui représente la puissance mécanique fournie par la turbine, pour des vitesses de vent faibles inférieures à 11.2 m/s, le fonctionnement en zone MPPT qui est compris entre [0s, 5s] est assuré, on constate que la puissance active injectée

au réseau n'atteint pas les 1.5MW dans cette zone. Par contre pour les vents forts on remarque que la puissance injectée au réseau dépasse les 1.5 MW et garde une valeur constante pour toute la plage qui est comprise entre [5s, 15s]. Entre [4.6s, 4.7s] la machine tourne presque à sa vitesse de synchronisme, et la puissance injectée au réseau  $P_g \approx 1.5\text{MW}$ .

La figure II.28 représente la tension et le courant rotorique d'une seule phase, on constate que le courant est déphasé par rapport à la tension d'un angle égal à  $\pi/2$ .

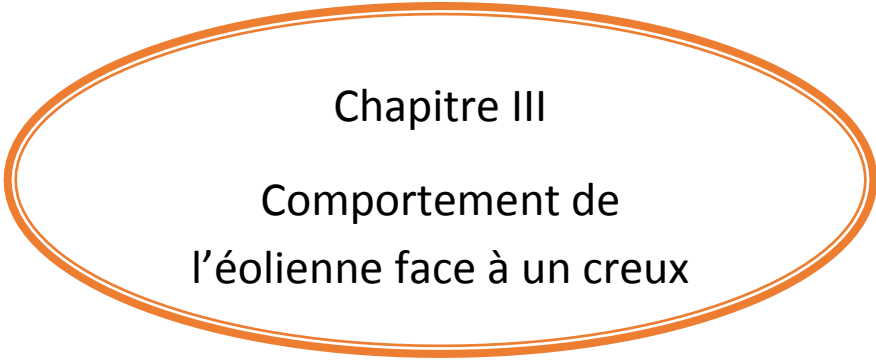
La figure II.29 illustre le courant et la tension d'une phase du réseau, on remarque que le courant et la tension de réseau sont en opposition de phase, cela justifié que le réseau reçoit de l'énergie active.

Les figures II.30, II.31 et II.32 représentant le couple électromagnétique de la machine, le courant statorique et le courant rotorique, respectivement. On constate dans ces figures que la machine fonctionne sur ces trois modes de fonctionnement (hypo-synchrone, hyper-synchrone et le synchronisme).

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différents parties de la chaîne de conversion éolienne à savoir l'éolienne, la machine à synchrone double alimentation MADA les convertisseurs ainsi que son dispositif de commande.

La commande vectorielle directe a été présentée pour montrer les remarquables performances de celui-ci en fonctionnement normal du réseau, ensuite on a passé à l'interprétation des résultats de simulation.



**Chapitre III**  
**Comportement de**  
**l'éolienne face à un creux**

## Introduction

L'inconvénient majeur des aérogénérateurs à base d'une MADA est la sensibilité aux surintensités engendrées par des creux de tension du réseau électrique.

L'apparition d'un défaut dans un réseau électrique conduit à l'apparition d'un affaiblissement de la tension.

Dans ce chapitre on va appliquer un creux de tension provenant du le réseau électrique ensuite on va déterminer le comportement des grandeurs internes de l'aérogénérateur, les résultats obtenue seront comparer avec celle obtenue sans l'apparition du défaut.

### III.1 Comportement de l'aérogénérateur face un creux de tension provenant de réseau

Les réseaux électriques sont caractérisés de différents types de défauts caractérisés par leur forme et leur durée. On distingue [15] :

- Les défauts triphasés.
- Les défauts biphasés.
- Les défauts monophasés.

Le développement des sources d'énergies du type éolien étant constant, de nombreux pays, notamment en Europe, se sont focalisés sur l'étude des réseaux comprenant des générateurs éoliens. Ces études incluent le maintien de la production en régime perturbé au point de connexion au réseau des fermes de production éolienne et le maintien de la production avec l'apparition d'un creux de tension qui ne dépasse pas le gabarit imposé par le gestionnaire du réseau électrique, et certains pays impose aussi que les producteurs doivent fournir de l'énergie réactive a la disparition du creux de tension, en cas ou le creux de tension dépasse le gabarit imposé les éoliennes peuvent être déconnectés. Un profil de creux de tension en fonction du temps sur le réseau est montré à la Figure III.1 [07].

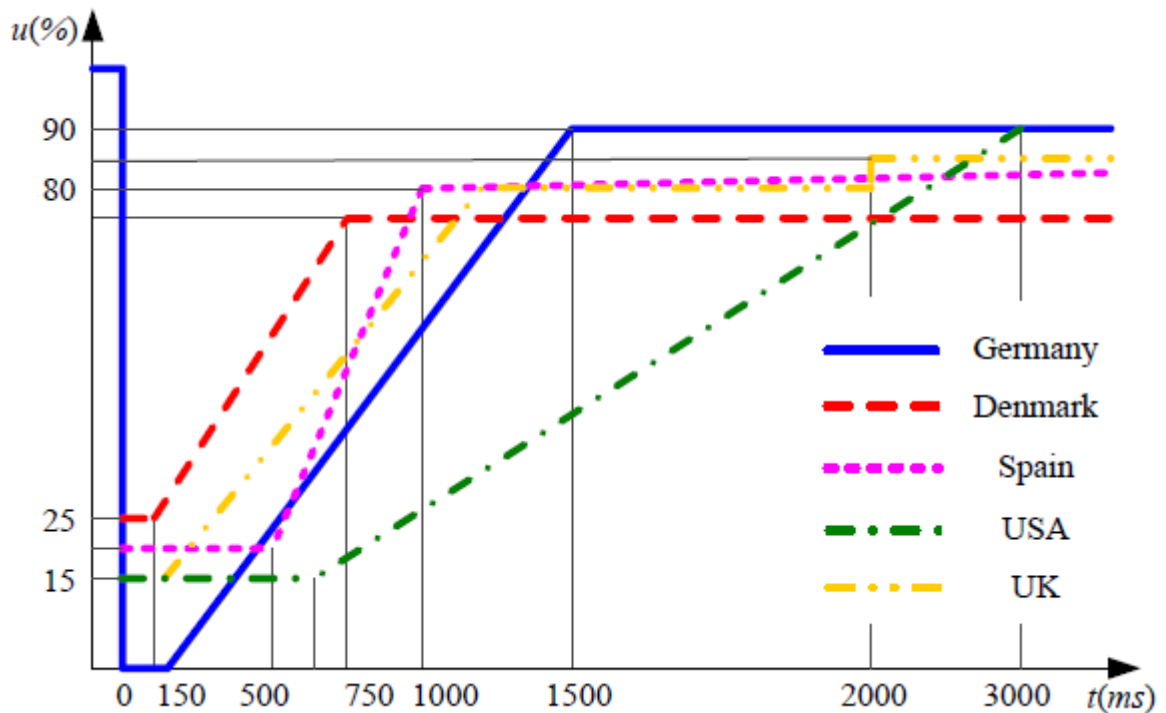


Figure III.1 : Profils de creux de tension dans différents pays.

Dans ce qui suit, nous avons appliqué à la chaîne de conversion un creux de tension de la forme et de type indiqué dans la figure 1 ensuite nous montrerons l'impact de ce dernier sur les grandeurs internes de l'aérogénérateur.

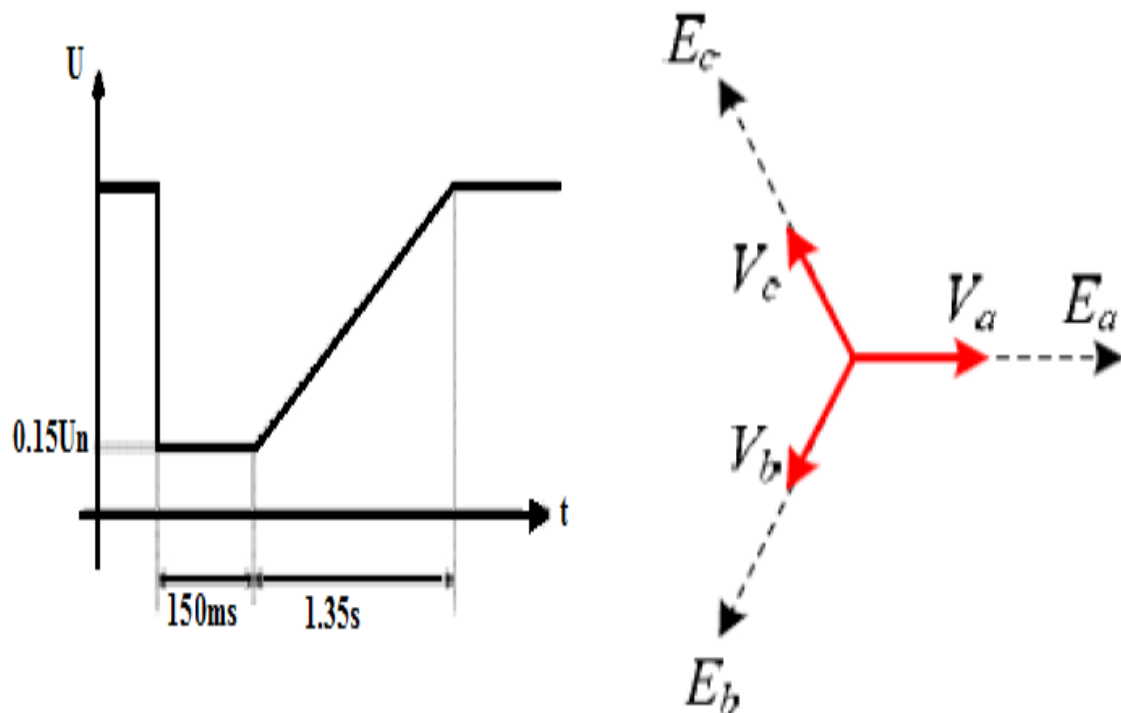
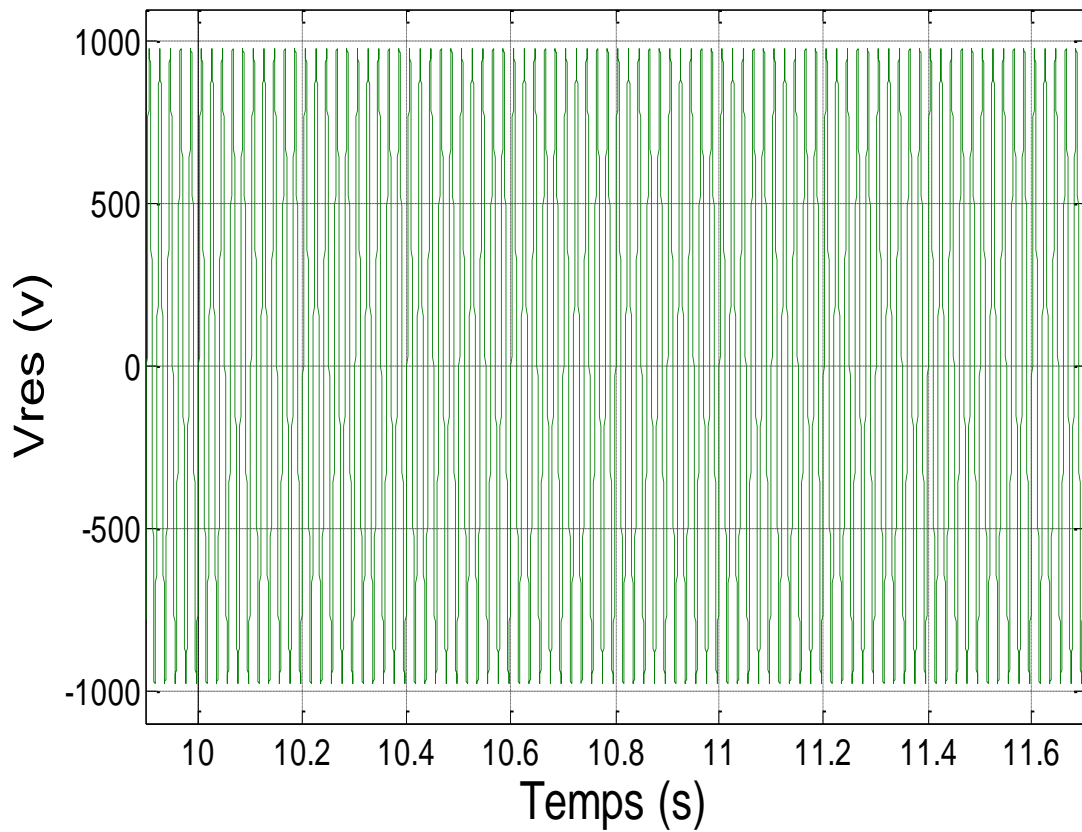
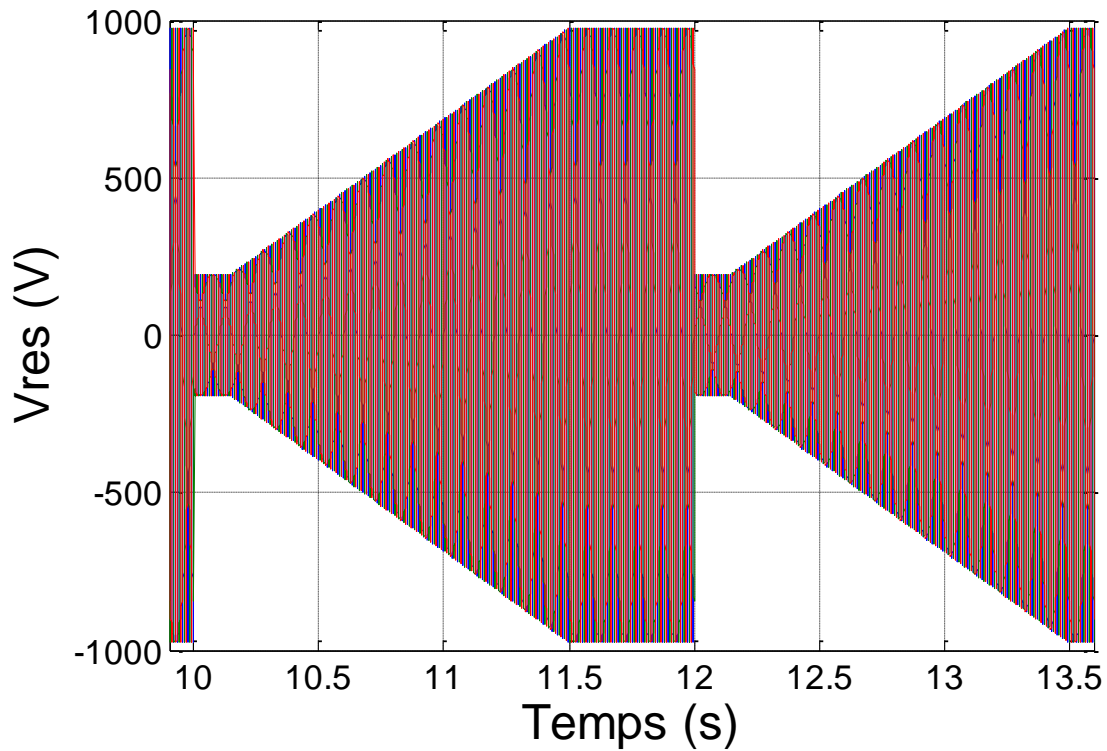


Figure III.2 : Gabarit et Type du creux de tension appliquer à la chaîne de conversion.

## III.2 Résultats de simulations

**Figure III.3.A :** Tension du réseau sans l'apparition du défaut**Figure III.3.B :** Tension du réseau avec l'apparition du défaut

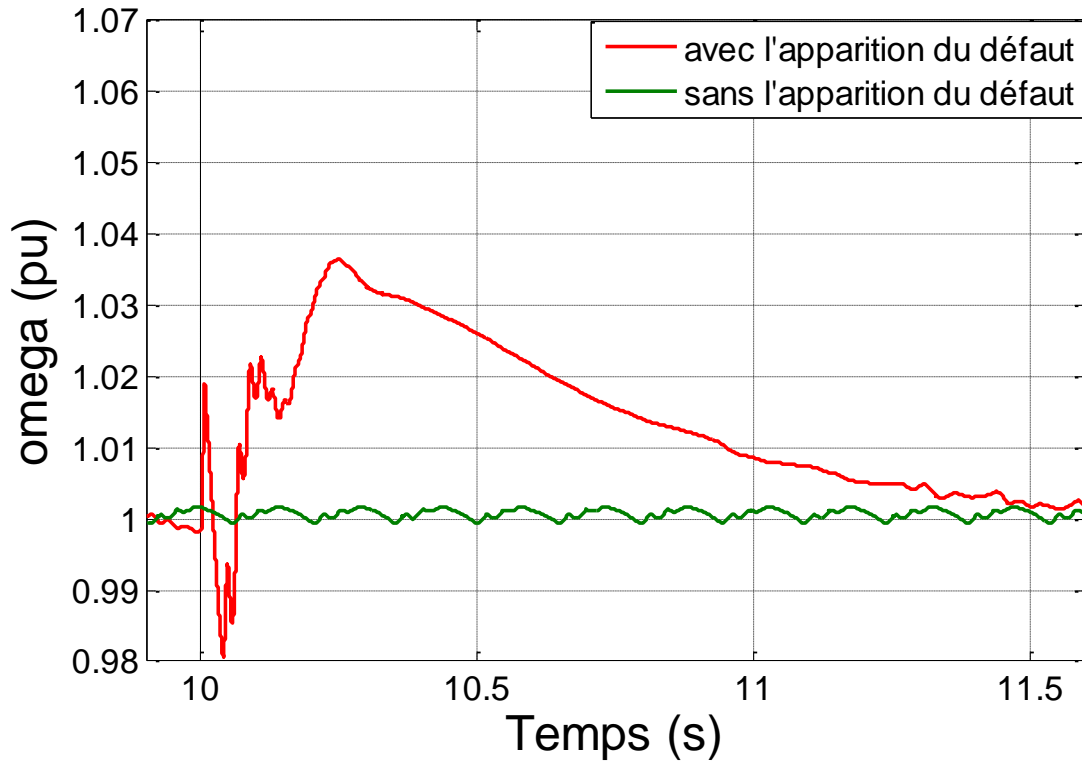


Figure III.4 : Vitesse mécanique de l'éolienne durant le défaut

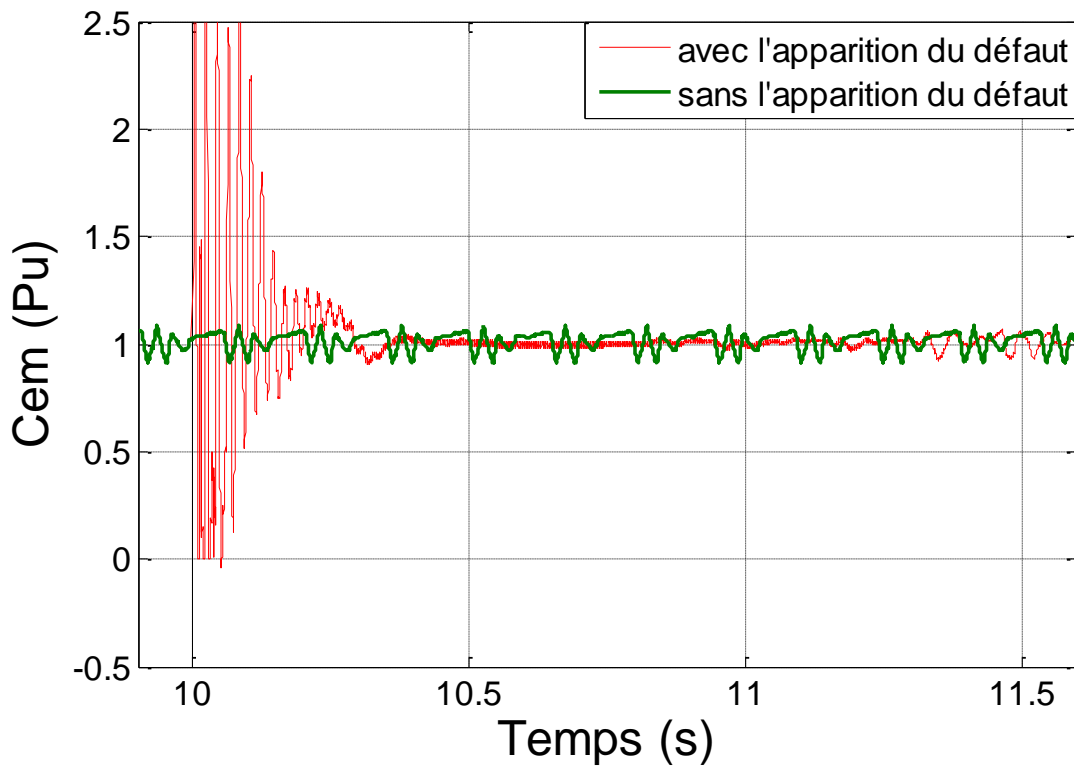


Figure III.5 : Le couple électromagnétique de la machine durant le défaut

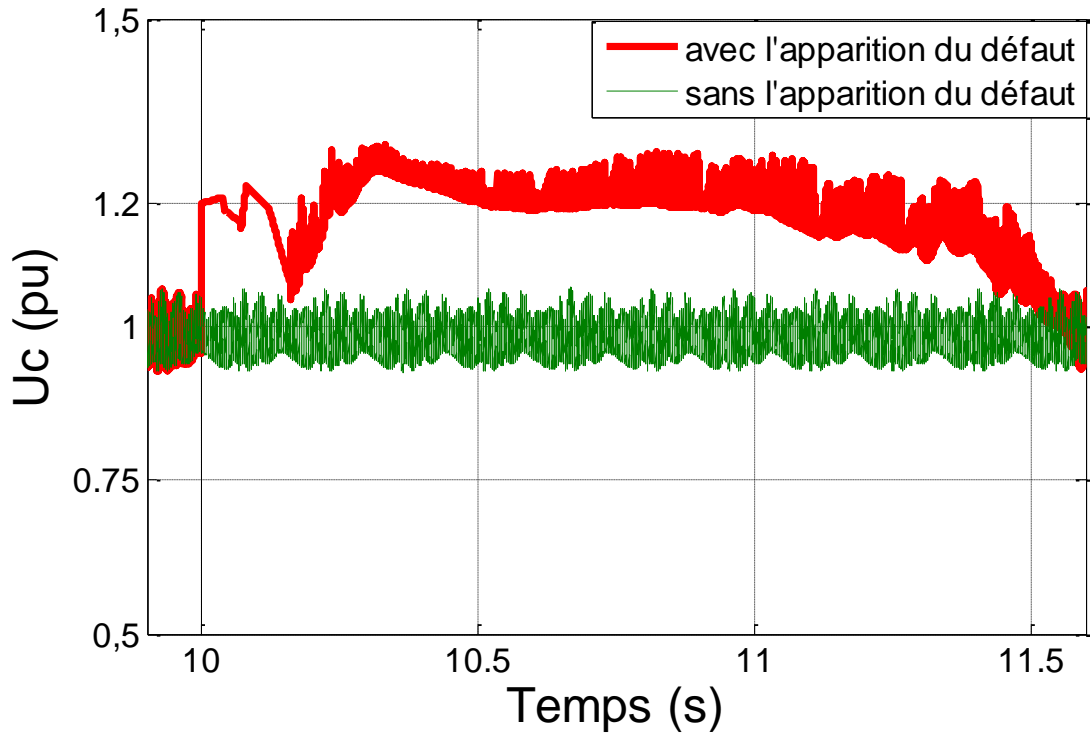


Figure III.6 : La tension du bus continue durant le défaut

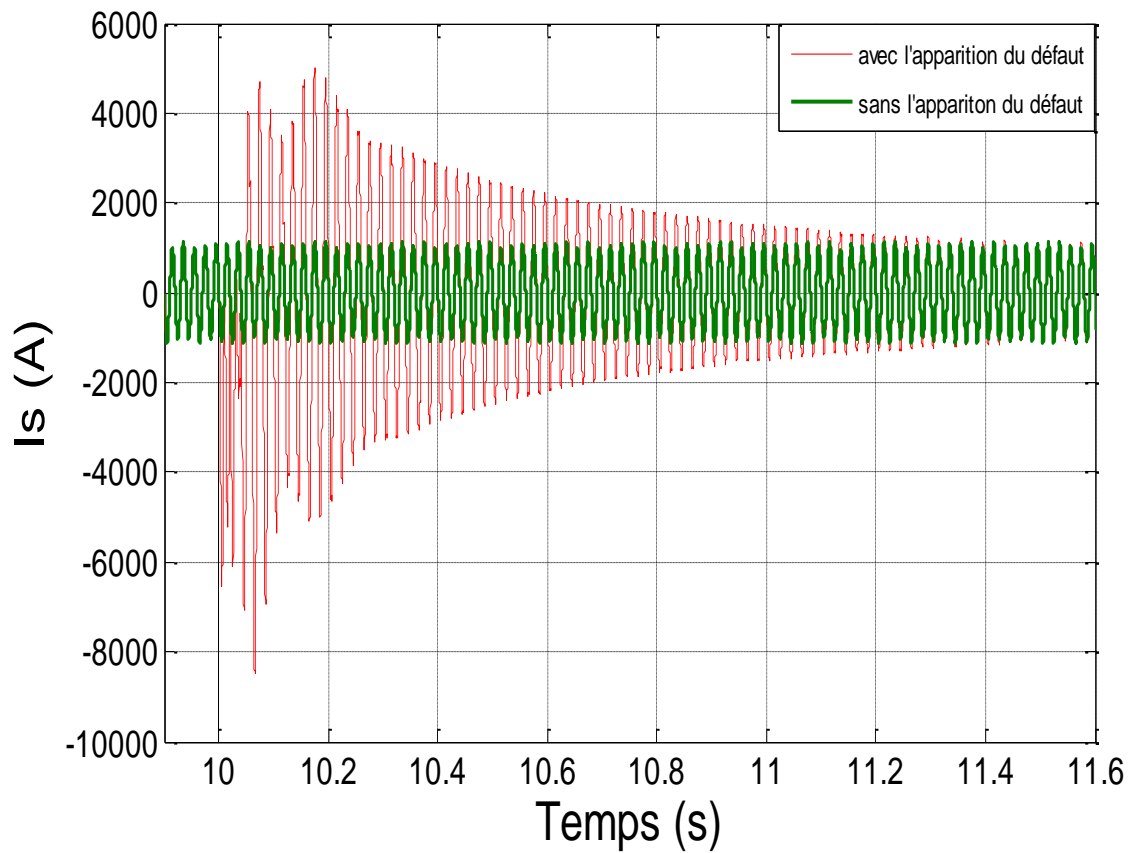


Figure III.7 : Le courant d'une phase statorique durant le défaut



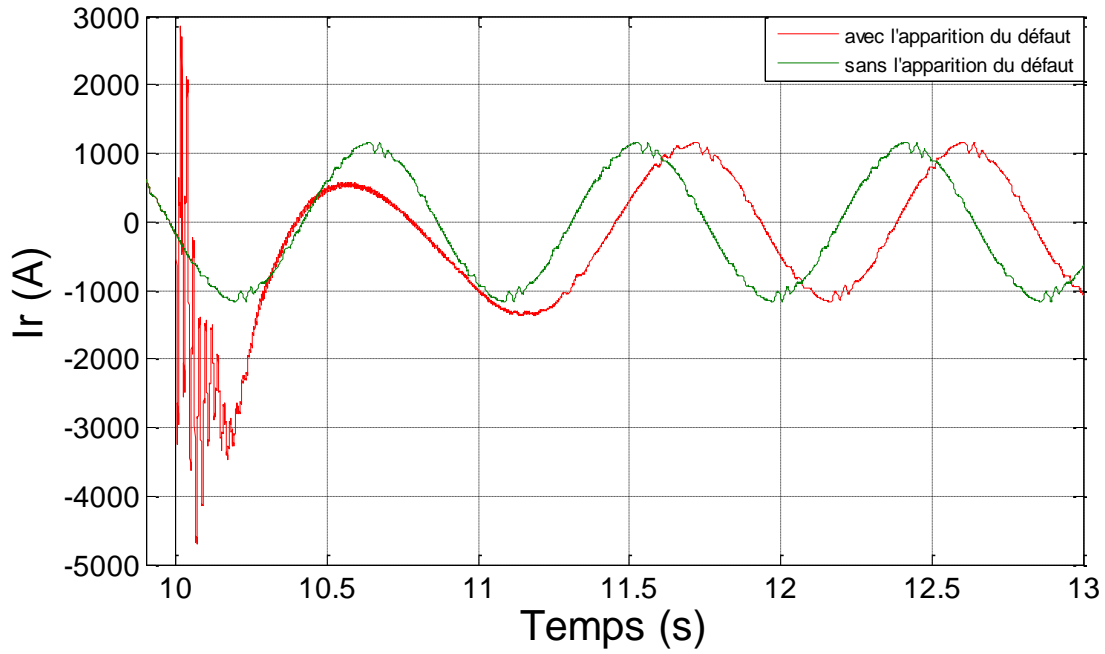


Figure III.8 : Le courant d'une phase rotorique durant le défaut

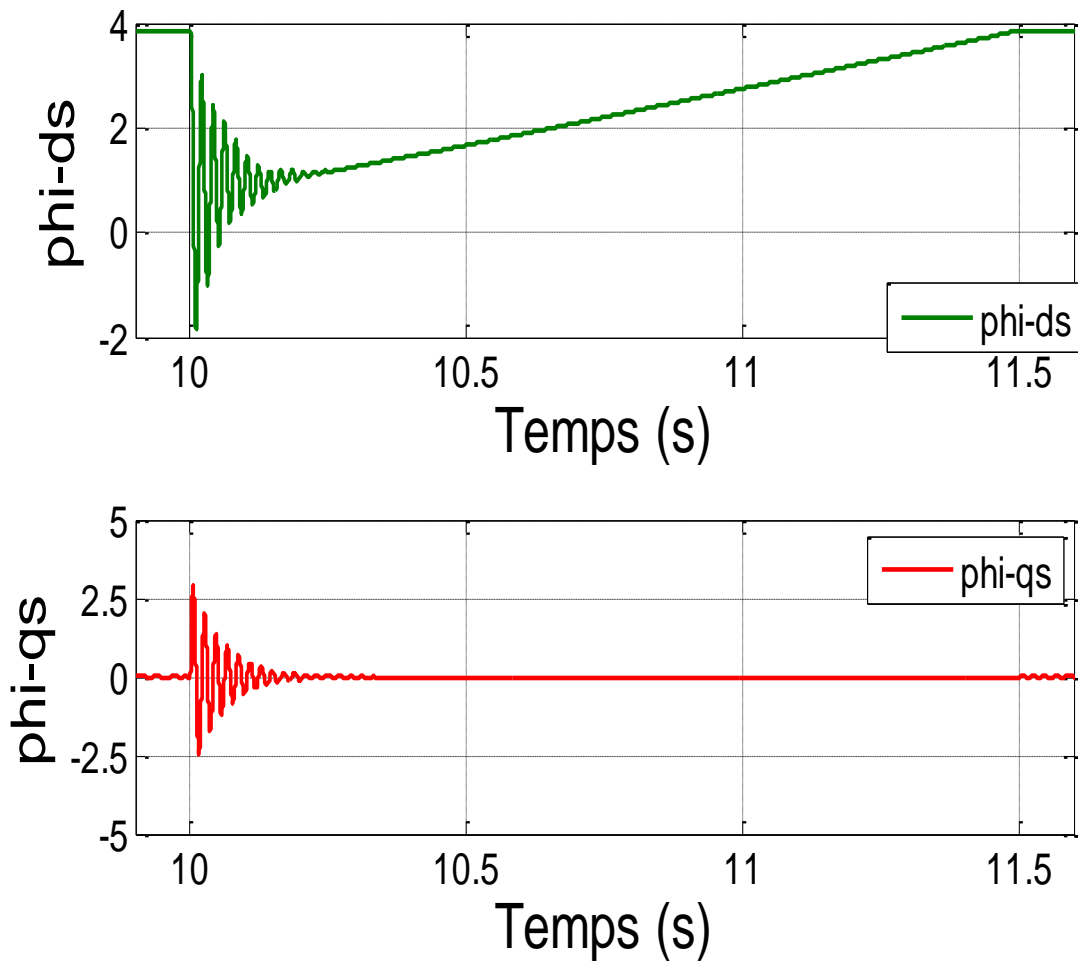


Figure III.9 : Composante du flux statorique directe et quadrature

### III.3 Interprétation des résultats de simulations

La figure III.3.A et la figure III.3.B représentent respectivement la tension du réseau sans et avec l'apparition du défaut.

On constate que la tension de la figure III.3.A est de la forme sinusoïdale par contre celle de la figure III.3.B est déformé quand le défaut est apparait dans le réseau, elle prend la forme de gabarit du creux de tension appliquer.

La figure III.4 représente la vitesse mécanique de l'éolienne sans et avec l'apparition du défaut.

On peut constater que l'augmentation de la vitesse pendant l'annulation de couple électromagnétique, après le dépassement de la période d'apparition du couple la vitesse revient à son état normal.

La figure III.5 représente la variation du couple électromagnétique de la machine pendant le défaut.

On constate que le couple électromagnétique de la machine est perturbé pendant l'apparition du creux de tension, après on remarque une certaine stabilité du couple électromagnétique lorsque on dépasse la période de l'apparition du creux de tension.

La figure III.6 représente la tension du bus continue sans et avec l'apparition du défaut dans le réseau.

On remarque que la tension du bus continue augmente pendant l'apparition du creux de tension et elle revient à son état normal lorsqu'on dépasse la période du défaut.

La figure III.7 représente une comparaison du courant d'une phase statorique sans et avec l'apparition d'un creux de tension dans le réseau.

On remarque une augmentation énorme du courant statorique pendant l'apparition de défaut, le courant revient à son état lorsque on dépasse la période du défaut.

La figure III.8 représente une comparaison du courant d'une phase rotorique sans et avec l'apparition d'un creux de tension dans le réseau.

On constate que le courant rotorique augmente brusquement après un certain temps et il diminue deux fois la valeur max pendant la durée du creux de tension.

Lorsque la durée du défaut est dépassée le courant rotorique sera déphasé par rapport à son état avant l'apparition du défaut.

La figure III.9 représente la composante du flux statorique directe et quadrature, on constate des oscillations sur la composante directe et en quadrature du flux apparaissent durant le défaut.

#### **III.4L'analyse du comportement des grandeurs internes de l'aérogénérateur**

\*La tension de la génératrice chute, le creux de tension conduit à diminuer le flux stator.

\*Des oscillations sur la composante directe et en quadrature du flux apparaissent durant le défaut.

\* Le flux du stator dans l'axe quadrature ne peut être maintenu à zéro à cause du défaut.

\*Le courant rotorique de la génératrice est déformé gravement.

\*Le courant statorique oscille avec des grandes oscillations irrégulières et un déséquilibre transitoire sur le courant.

\*Le couple oscille d'une façon irrégulière à cause du creux et après la disparition du ce dernier comme le flux statorique est perturbé donc le couple sera aussi perturbé.

\*A cause d'une quantité de puissance introduite dans le convertisseur engendré par le creux, la tension du bus continue augmente.

#### **Conclusion**

L'apparition d'un creux de tension dans le réseau électrique peut mener à des pertes économiques et une dégradation des produits manufacturés.

Dans ce chapitre nous avons constaté le comportement des grandeurs internes d'un aérogénérateur face à un creux de tension puis on a interprété et analysé les résultats de simulation.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Notre travail avait comme objectif la modélisation de différents composants d'une chaîne de conversion d'une turbine éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et l'étude de l'interaction de ces générateurs avec le réseau électrique et plus précisément le comportement des grandeurs interne de l'éolienne face à une perturbation provenant du réseau électrique.

Ce travail nous a permis donc de faire un bilan des contraintes de raccordement des éoliennes dans le réseau électrique, des normes à respecter par les producteurs, et du comportement de l'aérogénérateur face à un creux de tension imposé par le réseau électrique.

L'objectif du premier chapitre était d'étudier l'insertion de l'énergie éolienne dans le réseau électrique et l'impact d'une perturbation dans ce dernier sur le fonctionnement de l'éolienne.

Dans la première partie du premier chapitre, nous avons donné une brève description des systèmes éoliens et les différents paramètres relatifs à leurs fonctionnements. Ensuite, nous avons présenté quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique connectées au réseau électrique. Enfin, on a parlé de quelques avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans la seconde partie du premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans les éoliennes à vitesse variable, ses avantages et ses inconvénients et un dispositif de commande utilisé dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne raccordé au réseau électrique basé sur la MADA.

Dans la dernière partie du premier chapitre, on a parlé de l'impact de l'éolienne sur le réseau électrique et la possibilité d'amélioration de l'intégration de l'éolien dans le réseau électrique. On terminera par déterminer l'influence du réseau électrique sur l'éolienne.

Dans le deuxième chapitre nous avons modélisé les différents parties de la chaîne de conversion éolienne à savoir l'éolienne, la machine à synchrone double alimentation MADA les convertisseurs ainsi que son dispositif de commande.

La commande vectorielle directe a été présentée pour montrer les remarquables performances de celui-ci en fonctionnement normal du réseau, ensuite on a passé à l'interprétation des résultats de simulation.

Dans ce chapitre nous avons constaté le comportement des grandeurs internes d'un aérogénérateur face à un creux de tension puis on a interprété et analysé les résultats de simulation.

# Références Bibliographiques

### Références bibliographiques

- [01] S. El Aimani « modalisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse Doctorat délivré conjointement par l'école centrale de Lille et l'université des sciences et technologies de Lille 1 France 2004
- [02] K. Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » Thèse Doctorat en science de l'Université Abderrahmane MIRA – Bejaia (Algérie) et De l'Université Lille 1 (France). 2010.
- [03] K. Mammeri, H. Lahcene « optimisation et gestion d'énergie d'un système hybride (photovoltaïque –éolienne) » Mémoire Master de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie 2013.
- [04] 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 Doctorat Délivré Conjointement Par Ecole Militaire Polytechnique d'Alger Ecole Centrale de Lille (France).2011.
- [05] N. Hamdi « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire Magister de l'Université Mentouri de Constantine (Algérie). 2008.
- [06] V. Ignatova « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique ». Thèse Doctorat DE L'UJF préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble dans le cadre de l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal » Université Technique de Sofia le 20 Octobre 2006.
- [07] L. Peng « Reconfiguration du dispositif de commande D'une éolienne en cas de creux de tension » Thèse Doctorat préparée dans le Laboratoire L2EP à l'Ecole Centrale de Lille et au département Génie Electrique de Tsinghua University. France 2010.
- [08] A. Davingny « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » thèse Doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille. France 2007.



[09] Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Arrêté du 4 juillet 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de transport d'une installation de production d'énergie électrique, [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)

[10] G.Salloum « contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » thèse doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse, 2007 France.

[11] A.Boyette « Contrôle - Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » thèse Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy, 11 décembre 2006.

[12] S.Corsi, M. Pozzi, « control systeme of wind turbine generators: an italian experience », IEEE power engineering society general meeting toronto canada july 13-17, 2003.

[13] B.Boukhezzar « stratégies de commande pour l'optimisation et la regulation de puissance des éoliennes a vitesse variable » thèse doctorat de l'université de pari XI 2006 France.

[14] S.R.Guda « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». mémoire de Master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005.

[15] R. Caire, « Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 2004

[16] H. Haddour, A. Hamane « Contrôle et commande d'une chaine de conversion d'énergie à base d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à une hydrolienne », Mémoire Master de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie 2011.

# Annexes

## ANNEXE

➤ **La machine :**

- Tension d'alimentation :  $V_s = 690V$     50 Hz
- Puissance nominale :  $P_n = 1.5MW$
- Resistance d'enroulement statorique :  $R_s = 0.012\Omega$
- Resistance d'enroulement rotorique :  $R_r = 0.021\Omega$
- Inductance cyclique statorique :  $l_s = 0.013732H$
- Inductance cyclique rotorique:  $l_r = 0.013703H$
- Inductance magnétisante:  $M = 0.013528$
- Nombre de paire de pôles :  $P = 2$

➤ **La turbine :**

- Rayon de l'hélice :  $R = 35m$
- Gain de multiplicateur de vitesse :  $G = 70$
- Inertie totale :  $J = 50Kg/m^2$
- Coefficient de frottement visqueux :  $f = 7.1 * 10^{-3} N \text{ ms/rd}$
- Masse volumique de l'air :  $\rho = 1.225Kg/m^3$

➤ **Paramètre du bus continu :**

- Valeur de la capacité :  $C = 400 \text{ mF}$
- Valeur de l'inductance de lissage :  $L = 0.08H$

➤ **Paramètre du régulateur PI de la commande vectoriel :**

$$K_p = 13 * 10^{-11}$$
$$K_i = 20 * 10^{-4}$$

➤ **Paramètres du régulateur PI de la vitesse  $\beta$  :**

$$\text{Gain intégral : } K_i = 120$$
$$\text{Gain proportionnel : } K_p = 100$$

➤ **Paramètres de régulateur PI de puissance :**

$$\text{Gain intégral : } K_i = -9e^{-7}$$
$$\text{Gain proportionnel } K_p = -60e^{-5}$$