

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**TECHNIQUE DE MAXIMISATION DE LA
PUISSANCE D'UN SYSTEME DE GENERATION
EOLIEN BASE SUR UNE MADA**

Dirigé par:

Pr: SERHOUD Hicham

Réalisé par:

SOUID Salah Eddine

TOUIL Boukhari

2012/2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ...

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

A mes adorables sœurs.....

A mes frères

A mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: SERHOUD Hicham, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelles,

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté,

Remerciement spécial aux responsables de l'université D'El-Oued et à tous ceux-là nous présentons nos remerciements et nos respect

TABLE DES MATIERES

Notations symboliques

Liste des figures

Résumé

Introduction générale..... 1

CHAPITRE.I

Les éoliennes à vitesse variable

I.1. Introduction.....	3
I.2. Description de l'éolienne	3
I.3. Principe d'une éolienne	4
I.4. Les différents types d'éoliennes	4
I.4.1 .Les éolienne à axe vertical.....	4
I.4.2. Les éolienne à axe horizontal	5
I.5. Constitution d 'une éolienne modern.....	6
I.6.Fonctionnement d'un éolienne.	7
I.6.1. Efforts sur une pale.....	7
I.6.2. Contrôle de la puissance.....	9
I.7. Régulation de la vitesse de rotation d'éolienne	10
I.7.1.Système à décrochage aérodynamique 'stall'.....	10
I.7.2. Système à orientation des pales 'pitch'.....	11
I.8. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable...	11
I.8. 1.Système utilisant une génératrice synchrone.....	11
I.8.2.Système utilisant une génératrice asynchrone	12
I.8.3. Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation.....	12
I.9. Présentation de la machine asynchrone a double alimentation	13
I.10. description du fonctionnement de la MADA.....	13
I.10.1. Structure de la machine.....	14
I.10.2. Modes de fonctionnement de la MADA.....	15
I.10.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	15

II.10.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	15
I.10.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	15
I.10.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	15
I.11. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	16
I.12. Domaines d'application de la MADA.....	17
I.12.1.Application de la MADA dans les système éoliens.....	17
II.13. Avantage et inconvénients de la MADA	17
I.13.1. Avantage de la MADA.....	18
I.13.2. Inconvénients de la MADA	18
I.14.conclusion.....	19

CHAPITRE.II

Modélisation et commande de la MADA

II.1.Introduction.....	20
II.2.Modélisation d'une turbine éolienne	20
II.2.1.Modélisation de la turbine.....	20
II.2.2.la puissance d'un éolienne.....	20
II.2.3.La puissance aérodynamique	21
II.2.4.Le coefficient de la puissance.....	21
II.2.5.Modèle de multiplicateur	22
II.2.6.Equation dynamique de l'arbre.....	23
II.3.Schéma bloc de la modèle de la turbin.....	24
II.4.Modélisation de la MADA.....	24
II.4.1.Description de machine asynchrone à double alimentation	24
II.4.2.Hypothèse simplificatrices	25
II.4.3.Modèle mathématique de la MADA.....	25
II.4.3.1.Equations électriques.....	25
II.4.3.2.Equations mécaniques.....	27
II.4.4.Modèle diphasé de la MADA.....	27
II.4.4.1.Equation des tension.....	29
II.4.4.2.Equation des flux.....	29
II.4.4.3.Equation du couple électromagnétique.....	29
II.5.Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation.....	30

II.5.1.Principe	30
II.5.2.Commande de la MADA avec orientation du flux statoriques	30
III.5.3.Commande vectorielle de la MADA.....	31
II.5.3.1.Relation entre les courants statoriques et rotoriques.....	31
II.5.3.2.Expression des puissance active et réactive dans le repère synchrone.....	31
II.5.3.3.Expression des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques	32
II.6.4.contrôle indépendant des puissances active et réactive.....	33
II.6.4.1. Commande direct.....	34
II.6.4.2. Commande indirect.....	35
II.6.4.2.1.Commande en boucle ouvert.....	35
II.6.4.2.2.Commande en boucle fermé	36
II.6.4.3. Type du régulateur PI.....	36
II.6.5. Onduleur de tension a deux niveaux.....	36
II.6.5.1.Stratégie de commande.....	38
II.6.5.2.Algorithme de commande	38
II.7.Simulation de la commande de la MADA.....	39
II.7.1.Résultats de simulations.....	40
II.7.2.Interprétations des résultats.....	42
II.8.Architecture du dispositif de commande	43
II.9.Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI et avantage	43
II.10. Commande du convertisseur côté MADA-CCM	44
II.11. Commande du convertisseur côté réseaux-CCR.....	45
II.11.1.Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	45
II.11.2.Méthode de synchronisation.....	47
II.11.2.1.Boucle a verrouillage de phase PLL.....	47
III.11.3.Contrôle vectoriel du redresseur MLI.....	48
II.11.3.1.Schéma fonctionnel de contrôle a tension orientée(VOC).....	48
II.11.3.1.1.Etude de la boucle des courants du coté alternatif.....	50
II.11.3.1.2.Boucle de régulation de tension du bus continu.....	51
II.12. Simulation du système éolien basé sur une MADA.....	53
II.13.Résultat et simulation.....	53
II.13.1.Interprétations des Résultats.....	56

II.14.Conclusion.....	56
-----------------------	----

CHAPITRE.III

Techniques d'extraction du maximum de la puissance

III.1.Introduction.....	57
III.2. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes.....	57
III.3.Bilan de puissance.....	59
III.4.Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	60
III.4.1.Conception du correcteur de vitesse.....	61
III.5.Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	62
III.6. Orientation de pales.....	64
III.6.1.Génération de l'angle d'orientation.....	65
III.6.2.Réglage de l'angle d'orientation.....	66
III.6.3.Régulation de la vitesse de variation de l'angle d'orientation.....	66
III.7.Simulation et résultats.....	67
III.8.Interprétations des Résultats	71
III.9.Conclusion.....	74

Conclusion générale

Annexe

Références bibliographiques

NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification	Unité
C_p	Coefficient de puissance	
C_e	Couple électromagnétique	$N.m$
C_r	Couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
J	Moment d'inertie des parties tournantes	$K.g.m^2$
f	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m.s/rad$
G	Rapport de vitesse du multiplicateur	
g	Glissement	
K_p, K_i	Gains du régulateur PI classique	
M_{sr}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	Inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	Inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_s	Puissance active statorique	W
P_v	Puissance portée par le vent	W
P_{aer}	Puissance aérodynamique	W
Q_s	Puissance réactive statorique	VAR
R	Rayon de la turbine	m
R_s	Résistances statorique	Ω
R_r	Résistances rotorique	Ω
L_s	Inductances propres statorique	H
L_r	Inductances propres rotorique	H
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	m
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	W
i_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
v_{abcr}	Tensions instantané des phases rotoriques	V
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques	A

v_{abcs}	Tensions instantané des phases statoriques	V
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
p	Nombre de paires de pôles	
s	Opérateur de Laplace	
v_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
v_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
β	Angle de calage des pales	°
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
Ω_{ref}	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique .	rd
θ_s	Position de stator	rd
θ_r	Position électrique de rotor	rd
λ	Vitesse spécifique	
λ_{cpmax}	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne	
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	rd/sec
ω_s	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
Φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	Wb
Φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	Wb
Φ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q)	Wb
Φ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q)	Wb
PI	Proportionnelle intégrale	
$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$[\mathbf{P}(\theta)]$	Transformation de Park directe	
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation	
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation	

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions	
CCM	Convertisseur côté MADA	
CCR	Convertisseur côté Réseau	
MPPT	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale	
$\Omega_{cut-out}$	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est arrêtée Puissance mécanique fournie par l'arbre	Rad/sec
Ω_{cut-in}	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est démarrée	Rad/sec
$S_{a,b,c}$	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension	
K_i	Paramètre intégrateur	
K_p	Paramètre proportionnel	
i_{ch}	Courant de la charge non-linéaire	A
i_{dc}	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu	A
\bar{e}	Vecteur de la tension de ligne	
\tilde{e}	Tension instantanée de phase du réseau estimée	
VOC	Contrôle à tension orientée	
h_a et h_d	La largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive.	

Liste des Figures

Figure I.1: Les éoliennes à axe vertical.	5
Figure I.2: Eoliennes à axe horizontal.....	6
Figure I.3: Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N6.....	6
Figure I.4: Efforts sur un élément d'une pale.	8
Figure I.5: Structure générale de contrôle d'un système éolien.....	10
Figure I.6: Système d'orientation des pales.....	11
Figure I.7: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs.	12
Figure I.8: Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs.	12
Figure I.9: Eoliennes à vitesse variable.....	13
Figure I.10: Représentation de la machine asynchrone à double.....	14
Figure I.11: Principe du rotor bobiné.....	14
Figure I.12: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	16
Figure II.1: Schéma d'une turbine éolienne.....	20
Figure II.2: Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe).....	21
Figure II.3: Puissance disponible d'une éolienne donnée.	23
Figure II.4: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	24
Figure II.5: Représentation simplifiée de la MADA.	25
Figure II.6: Modèle de PARK de la MADA.....	27
Figure II.7: Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	28
Figure II.8: Orientation de flux.....	30
Figure II.9: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	33
Figure II.10: Schéma bloc de la commande directe.....	34
Figure II.11: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.	35
Figure II.12: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.....	36
Figure II.13: Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	37
Figure II.14: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse.....	39
Figure II.15: Schéma bloque de la modèle de commande.....	40
Figure II.16: Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA.....	42
Figure II.17: Architecture de commande du système éolien.....	43
Figure II. 18: Principe de la commande du CCM.....	44

Figure II.19: Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.	46
Figure II. 20: Structure classique d'une PLL triphasée	47
Figure II.21: Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).....	49
Figure II.22: Schéma fonctionnel pour le réglage du courant	51
Figure II.23: Modèle dynamique pour le circuit du bus continu.....	51
Figure II.24: Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu	52
Figure II.25: Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA.....	55
Figure III. 1: Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne	58
Figure III.2: Stratégies de commande de la turbine étudiée.	60
Figure III. 3: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.	61
Figure III.4: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	64
Figure III. 5: schéma de principe de l'implantation du contrôle de l'angle de calage.....	65
Figure. III. 6: schéma bloc du contrôle de l'angle de calage.	65
Figure. III.7: modèle du système de régulation de l'angle de calage.....	67
Figure. III.8: Résultat de simulation d'une chaine de conversion éolienne (avec asservissement de la vitesse mécanique)	69
Figure III.9: Résultat de simulation d'une chaine de conversion éolienne (sans asservissement de la vitesse mécanique)	70
Figure III.10: Résultat de simulation d'une chaine de conversion éolienne (avec commande de la turbine commandé par orientation des pales).	73

Résumé

Ce travail présente une étude et une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans les systèmes de la production d'énergie électrique à vitesse variable. Après une présentation de l'état de l'art de l'énergie éolienne, nous avons développé un modèle simplifié de la turbine avec sa commande afin d'atteindre le point de fonctionnement optimal. Une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique avec différentes techniques de puissance produite maximale (MPPT) a été élaborée.

Les performances du système complet avec une variation de la vitesse du vent ont été analysées en utilisant Matlab / Simulink. Les résultats obtenus montrent le bien-fondé et la faisabilité de la stratégie de commande proposée.

Mots Clés: Machine asynchrone à double alimentation, Commande vectorielle, Modélisation, MPPT, Onduleur MLI.

Abstract

This work presents a study and modeling of double-fed induction machine (DFIM) in variable speed wind power generation. After a presentation of the state of wind energy, developed a simplified model of the turbine with its control is presented to achieve the maximum wind energy captured, a vector control strategy of the active and reactive power with different technique of maximum power point tracking (MPPT) was developed.

The operational performances of the wind turbine system with DFIG with wind speed variation were analyzed using Matlab/Simulink. The results show the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

Keywords

doubly fed induction machine, Vector control, Modeling, Maximal power point tracking MPPT, PWM converter



INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique.[5]

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de La Chine, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 75 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 60 GW et l'Allemagne avec 31 GW[5]

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché ont une hélice de plus de 120 m de diamètre et une tour qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ, ce qui l'équivalent d'un immeuble d'environ 50 étages ! Cette contrainte mécanique a poussé les chercheurs à mener une nouvelle voie de recherche qui s'intéresse à la maximisation de la puissance et à l'amélioration du rendement et des performances des systèmes éoliennes et à leur intégration dans les réseaux électriques.[22]

Donc Ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes, les éléments constitutifs ainsi que la modélisation de l'éolienne. Ensuite on va présenter la machine asynchrone double alimentation (MADA).

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse fixe. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle qui permettant de contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Ensuite on va présenter la modélisation de l'alimentation du rotor, basée sur deux convertisseurs électroniques commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). L'un de ces deux convertisseurs (celui du côté réseau) est commandé pour assurer la stabilisation de la tension du bus continu alimentant le deuxième convertisseur et des courants sinusoïdaux purement actifs à l'entrée. Ce dernier est placé du côté du rotor, il est commandé pour garantir un réglage du couple électromagnétique de la machine à sa consigne optimale qui correspond à la production maximale de l'énergie et permettre l'orientation du flux statorique de la machine tout en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au stator.

Dans le troisième chapitre, on présente la stratégie d'extraction du maximum de la puissance .MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour contrôler la puissance électromagnétique convertie et régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.[22]

Chapitre: 1

Les éoliennes à vitesse variable

I.1.Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne.

Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur ("couramment appelé éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants.

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes de manière générale ainsi que le choix de la MADA en fonctionnement génératrice.

I.2.Description de l'éolienne

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques.[1]

Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales. [1]

Lorsque des pales fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles

permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle de l'éolienne pour démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s a fin d'assurer la protection de l'éolienne [01].

I.3.Principe d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [02].

I.4.Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types :

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique

(multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [03].



Figure I-1 Eolienne à axe vertical .[05]

I.4.2. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [02].



Figure I-2 Eolienne à axe horizontal [04].

I.5. Constitution d'une éolienne modern

La figure (I.3) représente une Chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 [05].

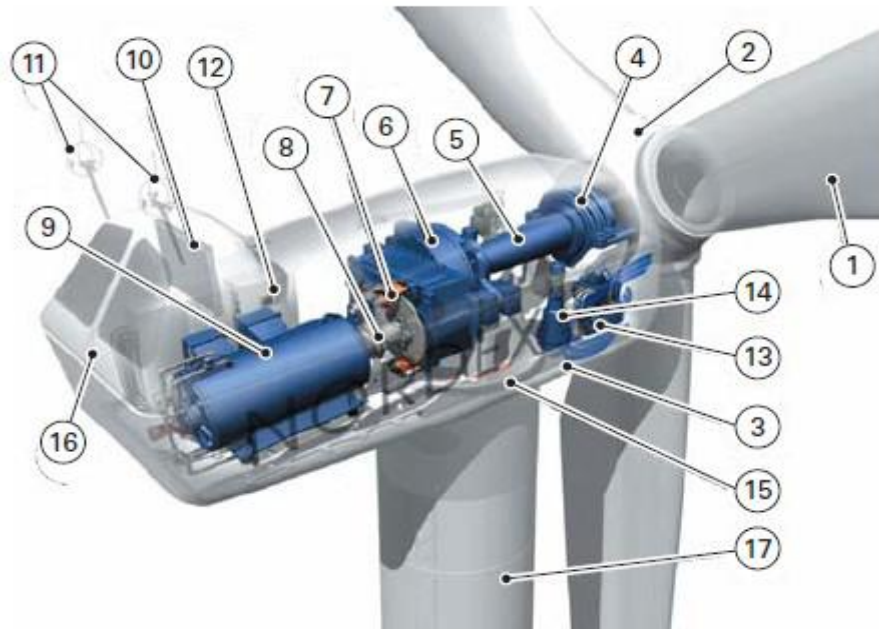


Figure I-3 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N6.[5]

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (12) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).[5]

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.[5]

I.6. Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [05].

I.6.1. Efforts sur une pale

La figure (I.4) illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V . Du fait de la rotation, la pale est soumise en plus du vent incident de vitesse V , à un vent relatif U dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine. La vitesse de ce vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_T \quad (\text{I.1})$$

Où : r est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m .

Ω_T : est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s .

La composition de vitesses de ces deux vents, incident V et relatif U donne la vitesse du vent réel V_{rel} au quel est soumise la pale.

$$V_{\text{rel}} = V + U \quad (\text{I.2})$$

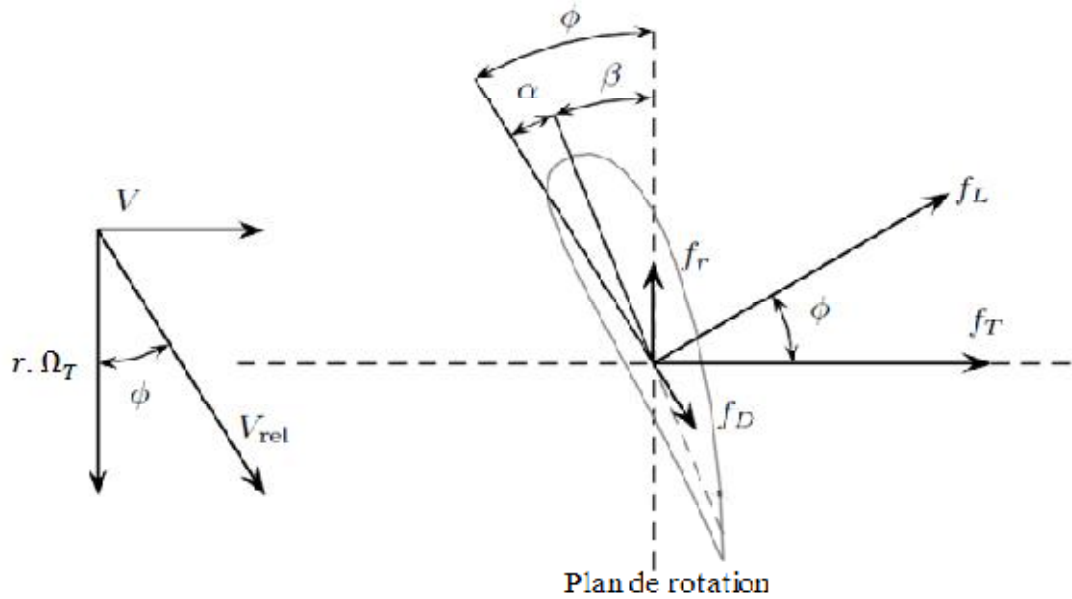


Figure I-4 Efforts sur un élément d'une pale.

L'écoulement d'air crée une différence de pression en dessus et en dessous de la pale qui aura comme conséquence deux forces, l'une perpendiculaire à la direction du vent réel appelée la portance f_L et l'autre dans le même sens que V_{rel} appelée la traînée. Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de traînée C_D [3, 4, 8,9] :

$$f_L = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{\text{rel}}^2 \cdot C_L \quad (\text{I.3})$$

$$f_D = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{\text{rel}}^2 \cdot C_D \quad (\text{I.4})$$

Ou : ρ Densité de l'air.

A : Surface balié par le rotor de la turbine.

(α) , (α) : Coefficient de traînée et coefficient de portance respectivement.

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale par unité de longueur est donnée par :

$$f_T = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{\text{rel}}^2 \cdot [C_L(\alpha) \cos(\phi) + C_D(\alpha) \cdot \sin(\phi)] \quad (\text{I.5})$$

Cette force doit être supportée par le rotor, la tour et les fondations. D'une autre part, la force tangentielle développe un couple de rotation qui produit le travail utile. Ce couple par unité de longueur est donné par :

$$f_r = \frac{\rho \cdot d \cdot A}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot [CL(a) \sin(\varphi) - CD(a) \cdot \cos(\varphi)] \quad (I.6)$$

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la trainée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la trainée CL/CD est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine [06].

I.6.2. Contrôle de la puissance

Comme nous venons de le voir au paragraphe précédent, le couple éolien est en fonction du carré de la vitesse du vent sur la quelle on n'a qu'une action mais aussi il est fonction de l'angle d'incidence α que nous pouvons modifier ça valeur. Le contrôle de puissance peut se faire donc à chacun des deux niveaux de conversion de l'énergie et de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement.[7]

- ü Au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance convertie pour les vents forts. Plusieurs méthodes sont utilisées.
- ü Au niveau du générateur, en particulier pour les structures à vitesse variable. Ceci permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

Le système de contrôle d'un système générateur éolien peut par ailleurs être séparé en trois niveaux fonctionnels essentiels [07].

- Le système de contrôle des grandeurs physiques. Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement des grandeurs autour des valeurs de consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- Le système de gestion et d'élaboration des lois de consignes et de gestion des protections.
- Le système de gestion de l'ensemble dans un parc éolien. C'est le niveau de contrôle supérieur qui gère un certain nombre d'éoliennes en fonction de la demande provenant des contraintes d'utilisation du réseau électrique.[6]

La figure (1.5) montre la Structure de contrôle d'un système éolien.

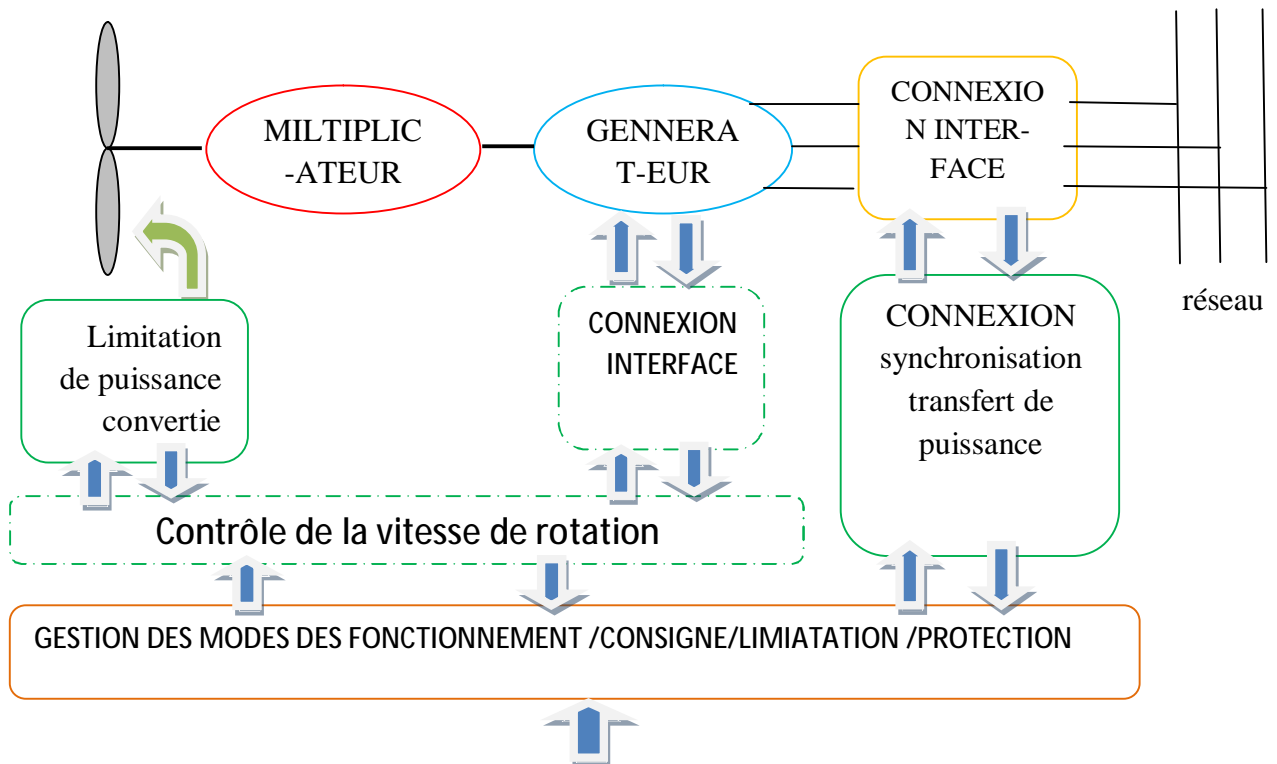


Figure I-5 Structure générale de contrôle d'un système éolien[5].

I.7. Régulation de la vitesse de rotation d'éolienne

Au cours de l'année, ou de la journée, le vent n'est pas toujours stable. Il y a des moments où la vitesse du vent devient importante et entraîne la destruction de l'éolienne. Il faut donc limiter la puissance convertie par la turbine pour empêcher sa destruction. Il est donc obligatoire d'envisager des systèmes de réglage et de protection.[09]

I.7.1. Système à décrochage aérodynamique 'Stall'

Cette technique est utilisée pour l'éolienne qui contient des pales fixées par rapport au moyeu. Ces pales ont un profil aérodynamique bien calculé pour qu'on obtienne un décrochage progressif lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur. Ce type de pales est fait pour supporter les efforts importants pendant le décrochage.[09]

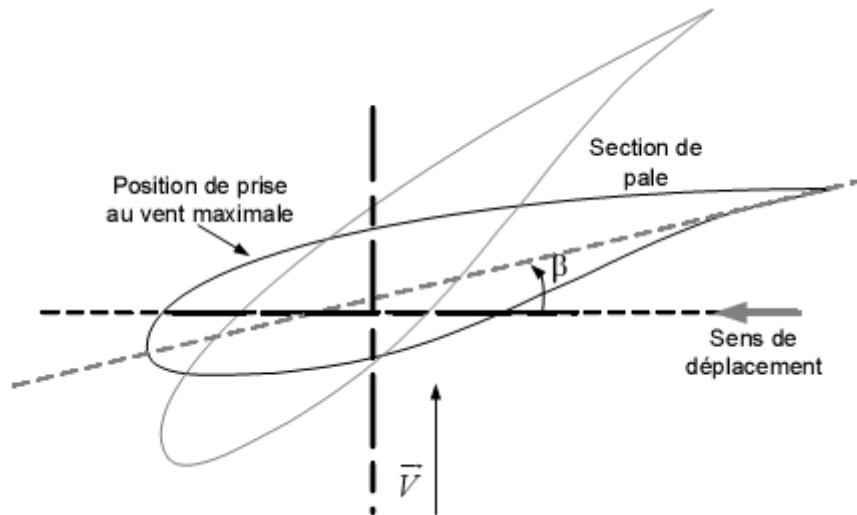


Figure 1-6 Système d'orientation des pales [10].

I.7.2. Système à orientation des pales 'pitch'

Ce système de régulation utilise l'angle des pales face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.[10]

I.8.Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable

I.8.1. Système utilisant une génératrice synchrone

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [16].

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents comme figure suivant:[16]

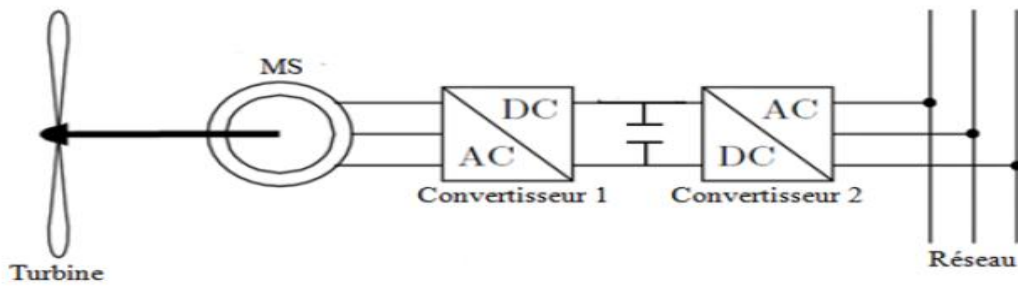


Figure I-7 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs

I.8.2. Système utilisant une génératrice asynchrone

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

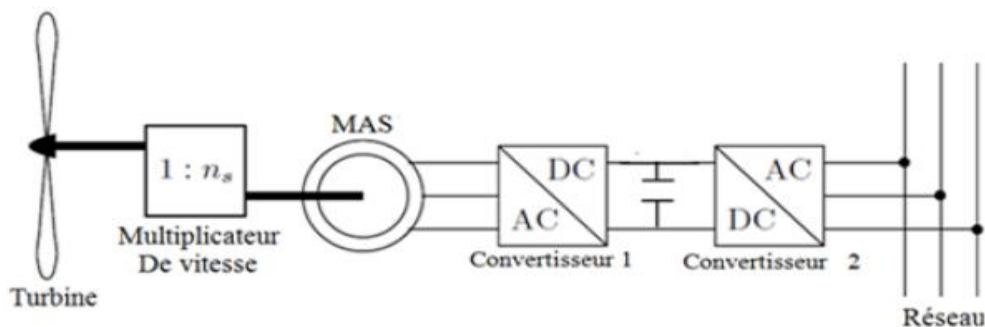


Figure I-8 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs

I.8.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbine éolienne. La structure figure (I.9) dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur électronique qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur la plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la

différence des fréquences mécaniques et électriques par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor.

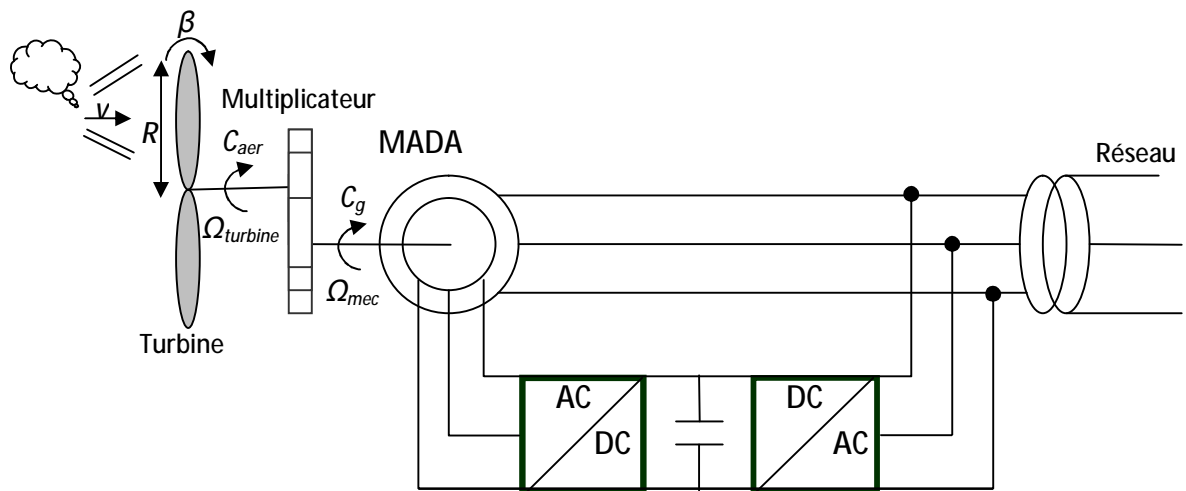


Figure I-9 Eoliennes à vitesse variable.

Malgré la présence des courants glissements, la majorité des projets éoliennes reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau mais également pour la vitesse supérieure au synchronisme, du rotor vers le réseau.

C'est la raison principale pour la quelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.[16]

I.9. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 [11]; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [12].

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écurie coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [11], [13].

La figure I.1 représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

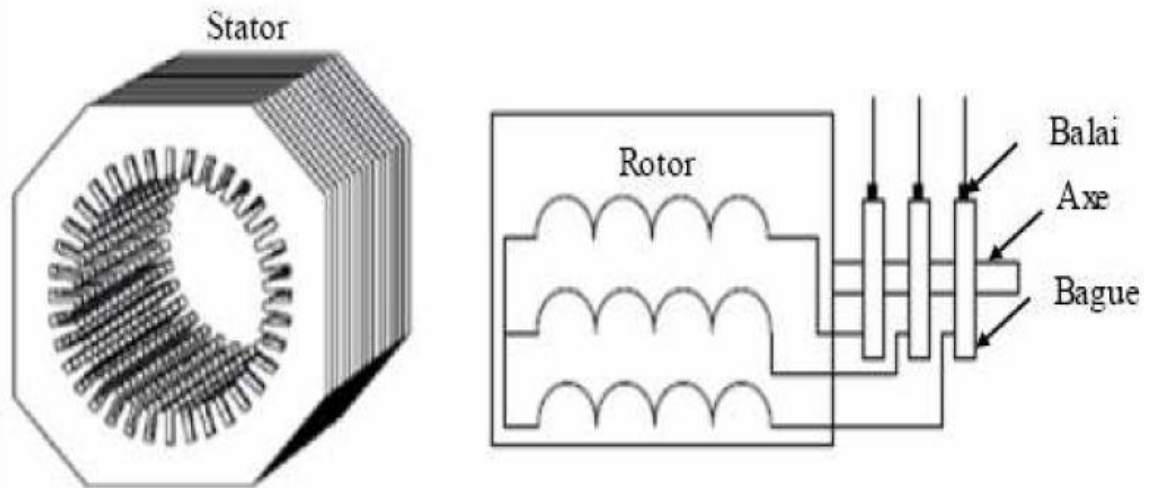


Figure I-10 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation[11].

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

I.10. Description du fonctionnement de la MADA

I.10.1. Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écurueil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la (figure I.11) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [14].

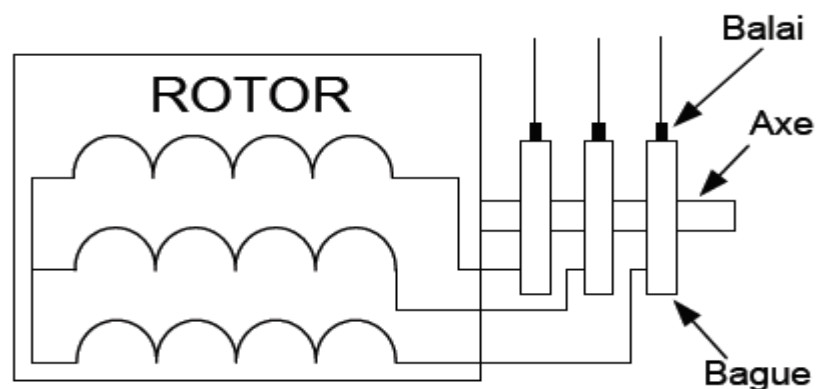


Figure I-11 Principe du rotor bobiné [11].

I.10.2. Modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner émotteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner au dessous de sa vitesse des synchronisme pour être moteur et au dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

I.10.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, " la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.[02]

I.10.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.[02]

I.10.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.[02]

I.10.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.[02]

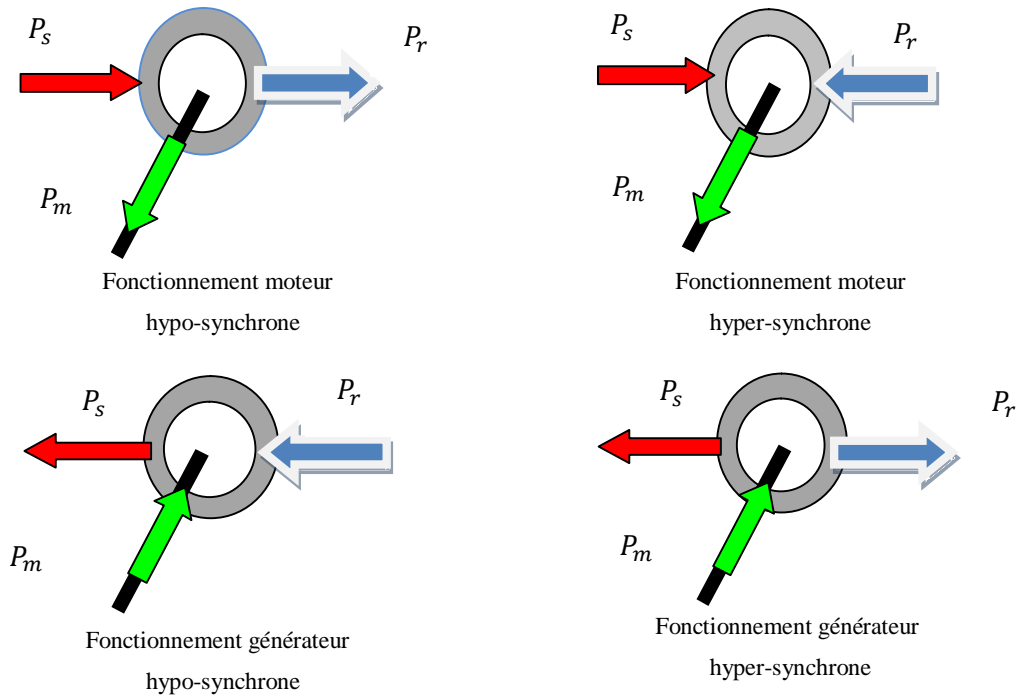


Figure I-12 Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.[15]

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [15].

I.11. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse w_{gl} telle que [12] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_g \quad (\text{I.7})$$

Où : g est le glissement et w_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [12].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $w_{gl} = 2pf_{ro}$; c'est-à-dire:

$$f_{ro} = fg \quad (\text{II. 2})$$

I.12. Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [16].

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.[16]

I.12.1. Application de la MADA dans les systèmes éoliens

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ($\pm 30\%$) en de ça ou au delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7a 1,3 fois la puissance nominale [08].

I.13. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation[19].

I.13.1. Avantages de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer:

- Ø Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- Ø La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Ø Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine.[19]
- Ø Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Ø En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présenté la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- Ø La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale[19]

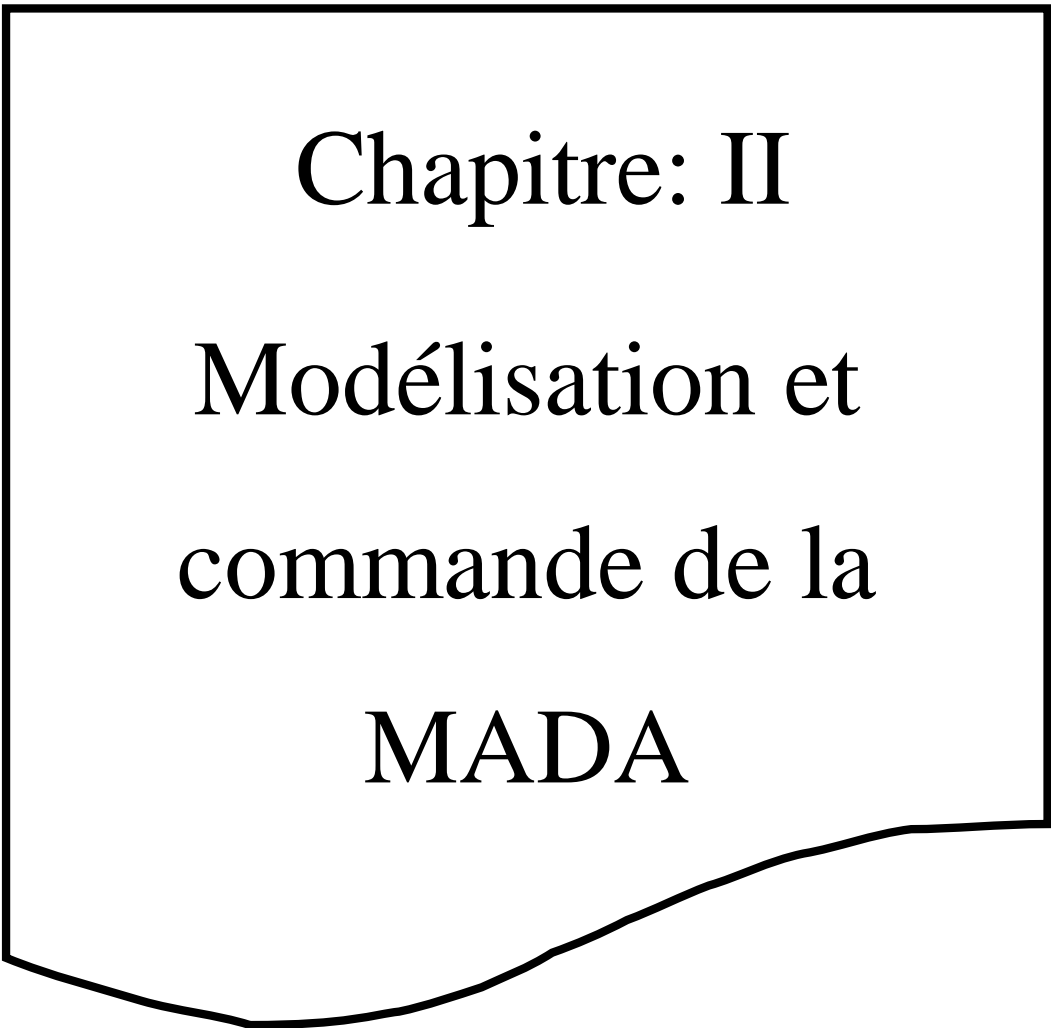
I.13.2. Inconvénients de la MADA

- Ø Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais [19].
- Ø La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Ø Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [19].

I.14.Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Ensuite nous avons fait en premier une description générale de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones à double alimentation.



Chapitre: II

Modélisation et
commande de la

MADA

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter le modèle de la turbine. Ensuite la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, cette modélisation était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, ainsi que la commande vectorielle [04].

Ensuite les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés les modèles de la MADA et de la liaison du CCR au réseau via le filtre RL [04].

II.2.Modélisation d'une turbine éolienne

II.2.1.Modélisation de la turbine

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (II.1) montre le schéma d'une turbine éolienne.[08]

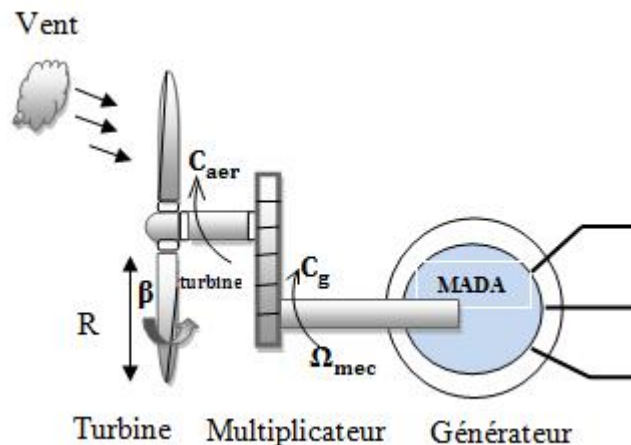


Figure II-1 Schéma d'une turbine éolienne.

II.2.2.la puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers une turbine éolienne de rayon R , est donnée par la relation suivante [08] :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\text{ent}}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{ent}}^3 \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{ent} : est la vitesse du vent en (m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais aussi au cube de la vitesse du vent [08].

II.2.3. la puissance aérodynamique

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après La turbine. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [09], La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

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

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

Avec :

β : est l'angle d'orientation des pales.

Le couple aérodynamique est donné par

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

II.2.4. Le coefficient de puissance

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce

coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ [08]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (II.2).

La figure II.3 présente la puissance disponible d'un éolienne .

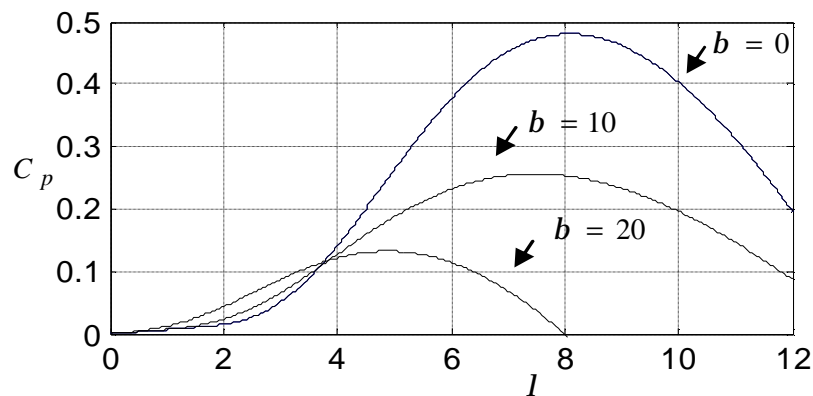


Figure II-2 Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne.

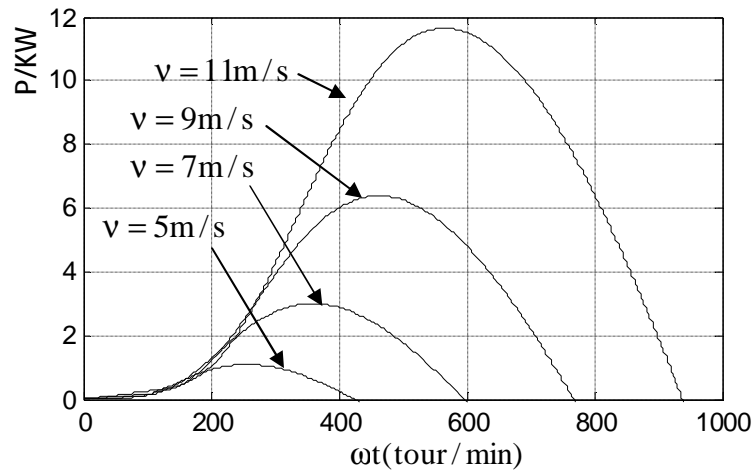


Figure II-3 Puissance disponible d'une éolienne donnée.

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 10KW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [26].

$$C_p(\lambda, \beta) = 05176. \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} - 0.0068. \lambda \quad (\text{II. 4})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

II.2.5. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, mathématiquement elle est modélisée par les équations suivantes [08] :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II. 6})$$

II.2.6. Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [10] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mes} \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

J_t : c'est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice

C_{mes} : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{mes} , le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 8})$$

le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{ves} = f\Omega_{mec} \quad (\text{II. 9})$$

II.3. Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure II.4).

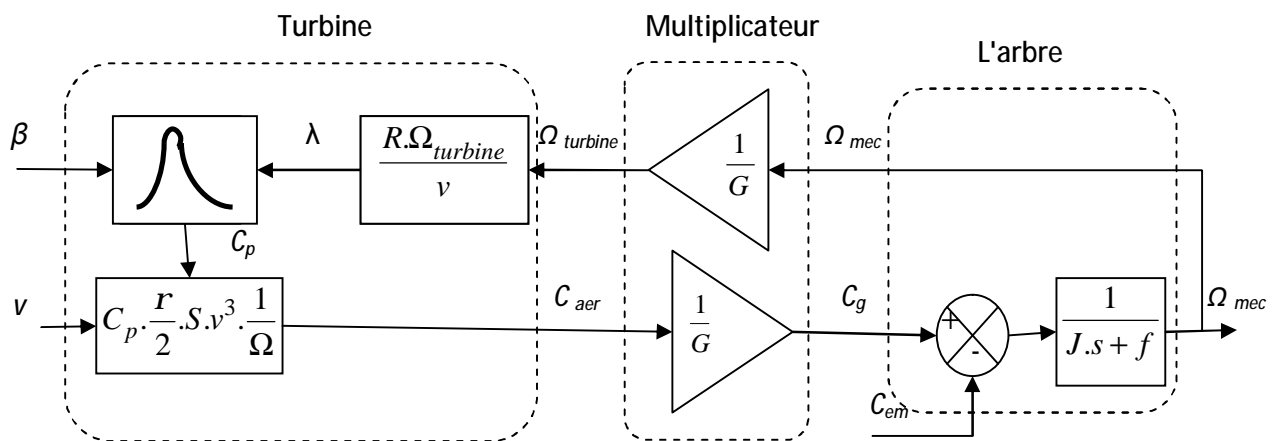


Figure II-4 Schéma bloc du modèle de la turbine .[21]

II.4. Modélisation de la MADA

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

II. 4.1. Description de machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statorique (A_s, B_s, C_s) décalées entre elles par un angle de $(\frac{2p}{3})$, et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (A_r, B_r, C_r).

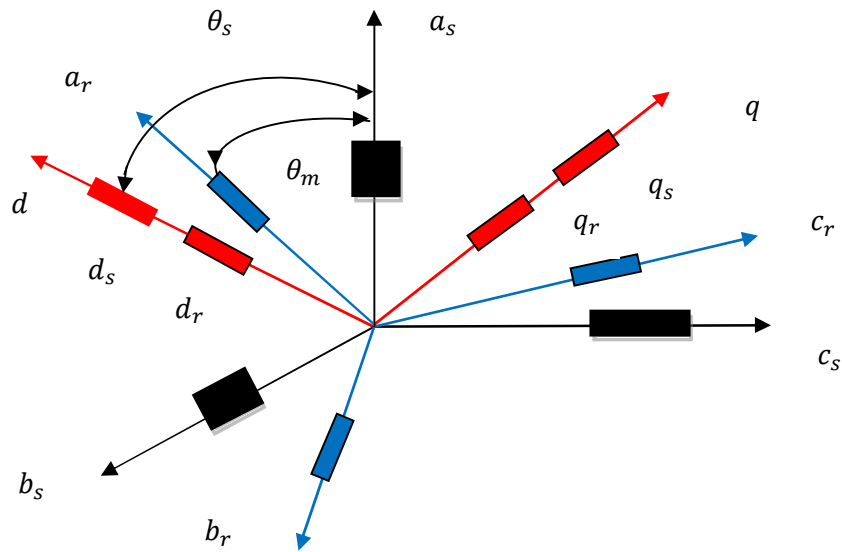


Figure II-5 Représentation simplifiée de la MADA

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

II.4.2. Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.[17]
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.[17]
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.[17]

II.4.3. Modèle mathématique de la MADA

II.4.3.1. Equations électriques

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [21] :

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II. 10})$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par [21]:

$$[\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r][\mathbf{i}_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II. 11})$$

$$\text{Où : } [\mathbf{V}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{as} \\ \mathbf{V}_{bs} \\ \mathbf{V}_{cs} \end{bmatrix}; [\mathbf{V}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ra} \\ \mathbf{V}_{rb} \\ \mathbf{V}_{rc} \end{bmatrix}; [\mathbf{i}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{as} \\ \mathbf{i}_{bs} \\ \mathbf{i}_{cs} \end{bmatrix}; [\mathbf{i}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ar} \\ \mathbf{i}_{br} \\ \mathbf{i}_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix}; [\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_s \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [\mathbf{L}_{ss}] \cdot [\mathbf{i}_s] + [\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{i}_r] \quad (\text{II. 12})$$

$$[\Phi_r] = [\mathbf{L}_{rr}] \cdot [\mathbf{i}_r] + [\mathbf{M}_{sr}]^t \cdot [\mathbf{i}_s] \quad (\text{II. 1.3})$$

$$\text{Talque : } [\mathbf{L}_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [\mathbf{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Et

$$[\mathbf{M}_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (II.12.)et (II.13) respectivement dans les relations (II.10) et (II.11), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II. 14})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II. 15})$$

II.4.3.2.Equation mécaniques

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme:

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II. 16})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.14) et (II.15). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.4.4.Modèle diphasé de la MADA

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II.6).

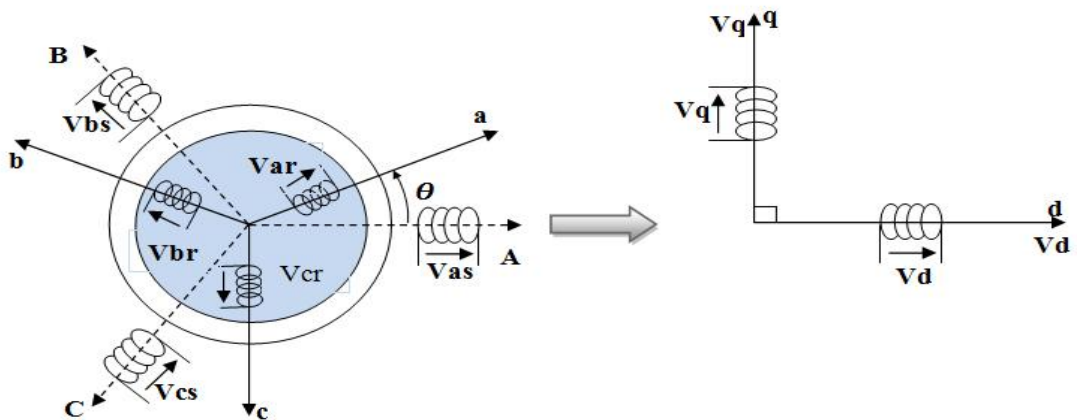


Figure II-6 Modèle de PARK de la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [20]:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

Il est noté par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques ((θ_r). rotoriques) (figure II.7).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$q + q_r = q_s$$

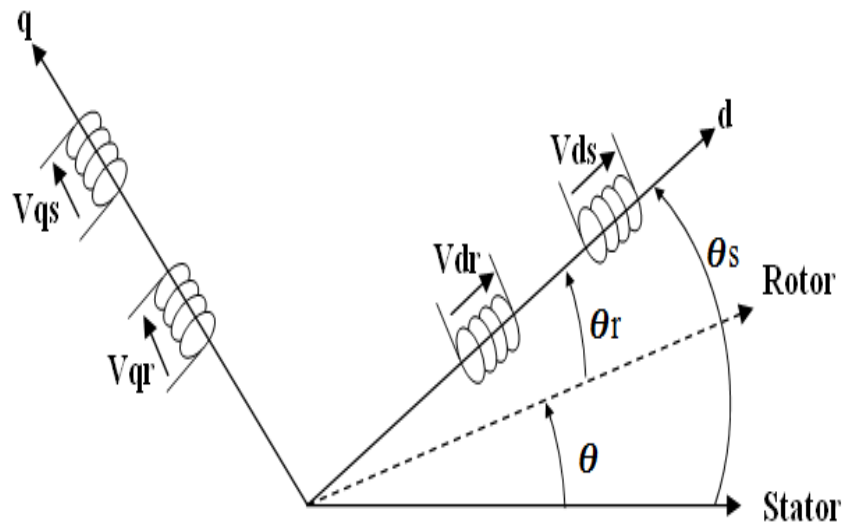


Figure II-7 Représentation de la machine dans le repère diphasé.

II.4.4.1. Equation des tensions

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.10) du stator et l'équation (II.11) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

ω_s Pulsation du champ tournant d'axe (d, q)

ω_r Pulsation électrique du rotor

II.4.4.2. Equation des flux

L'équation des flux statorique et rotorique est donné comme suit:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

II.4.4.3. Equation du couple électromagnétique

Après qu'on effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimé sous différentes formes, on trouve celle-ci [20] :

$$C_e = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II. 20})$$

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 21})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II. 22})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 23})$$

II.5. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie électrique [21].

II.5.1. Principe

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone Φ_s , Φ_r au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple [5].

II.5.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par orientation

du flux statorique. Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d - q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Figure(II.8)

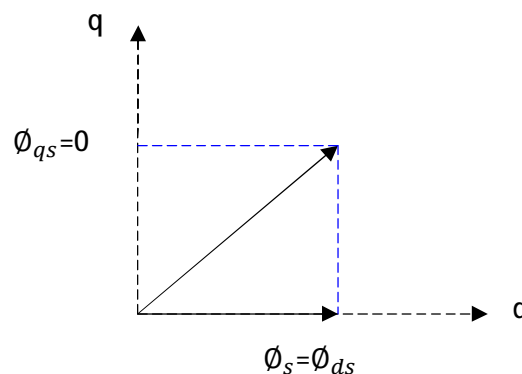


Figure II-8 Orientation de flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement a savoir i_{rq} , i_{sq} , et deux courants contrôler indirectement i_{qr} , i_{qs} .

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine

II.5.3. Commande vectorielle de la MADA

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

R_s Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [13], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\phi_s}{dt} \quad (\text{II. 24})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable, les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{ds} = V_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{ds} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = \frac{M}{L_s} \phi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II. 27})$$

II.5.3.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (II.26), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

II.5.3.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées

par :

$$\begin{cases} P_S = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_S = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante:

$$\begin{cases} P_S = V_S I_{qs} \\ Q_S = V_S I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

Ainsi en remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques

$$\begin{cases} P_S = -\frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot i_{qr} \\ Q_S = \frac{v_S \phi_S}{L_S} - \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

De l'expression (II.25) nous pouvons écrire :

$$\phi_S = \frac{v_S}{\omega_s} \quad (\text{II. 32})$$

D'où d'après (II.31)

$$Q = \frac{V_S^2}{\omega_s L_S} - \frac{v_S M}{L_S} i_{dr} \quad (\text{II. 33})$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d (la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau).

II.5.3.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, da la façon suivante :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

A partir des systèmes d'équations (II.31) et (II.34), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

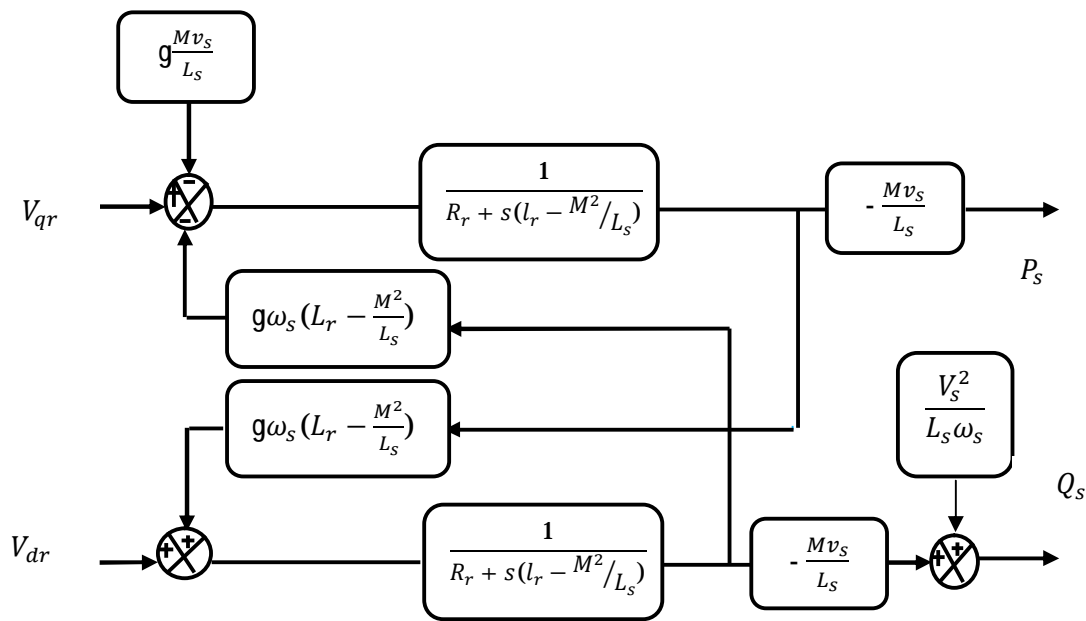


Figure II-9 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

II.6.4. contrôle indépendant des puissances active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser son bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.[22]

II.6.4 .1. Commande directe

Si l'on observe les équations (II.31), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{Mv_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.28) disparaissent en régime permanent [22]. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot v_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{M \cdot v_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure II-10).[22]

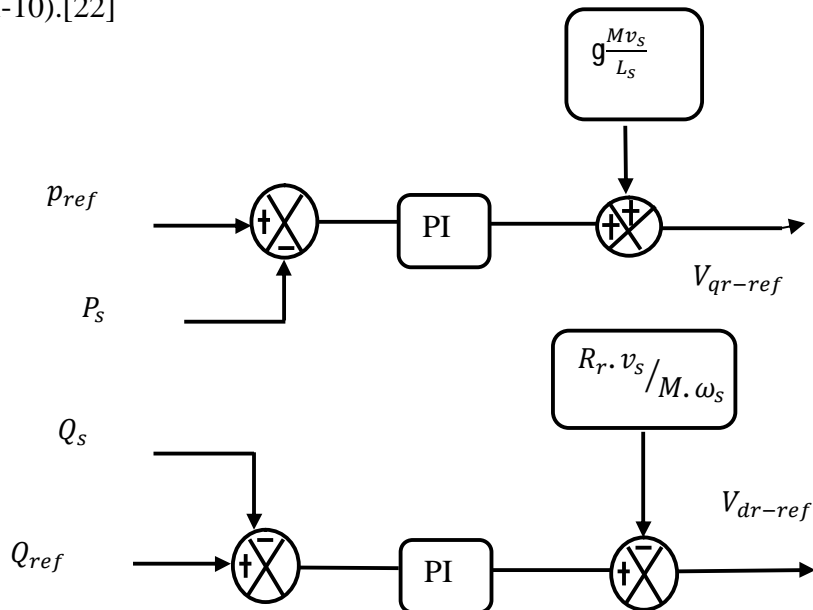


Figure II-10 Schéma bloc de la commande directe.

II.6.4.2. Commande indirecte

II.6.4.2.1. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q .

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (II.31) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} i_{qr\text{ref}} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot P_{s\text{ref}} \\ i_{dr\text{ref}} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot Q_{s\text{ref}} + \frac{v_s}{\omega_s \cdot M} \end{cases} \quad \text{(II.37)}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

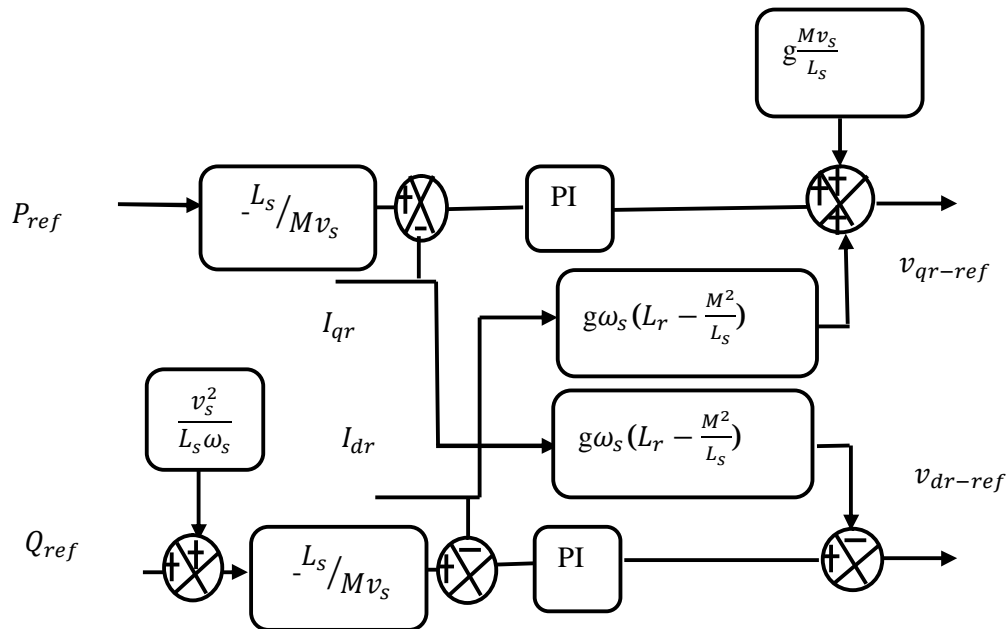


Figure II-11 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

II.6.4.2.2. Commande en boucle fermé

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante.

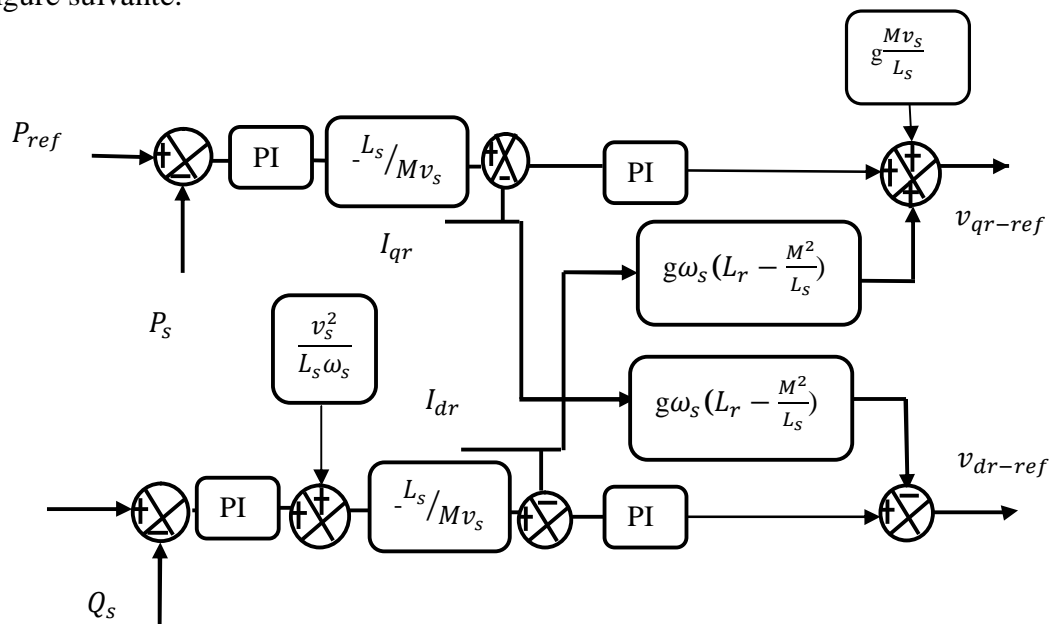


Figure II-12 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

II.6.4 .3.Type du régulateur PI

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.[17]

II.6.5. Onduleur de tension à deux niveaux

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II.13).[17]

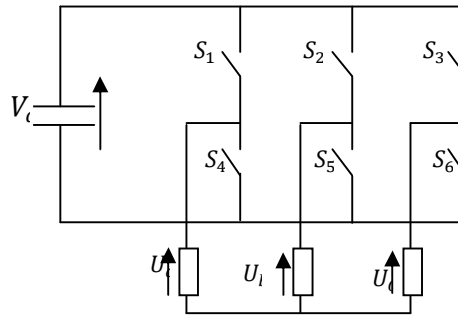


Figure II-13 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.[17]

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé ;
 $S_a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b=0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé ;
 $S_b=1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.
- Branche3 :
 $S_c=0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé ;

$S_c=1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

II.6.5.1. Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsion triangule sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.13).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II. 41})$$

Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II. 42})$$

II.6.5.2. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [10]:

▼ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

▼ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

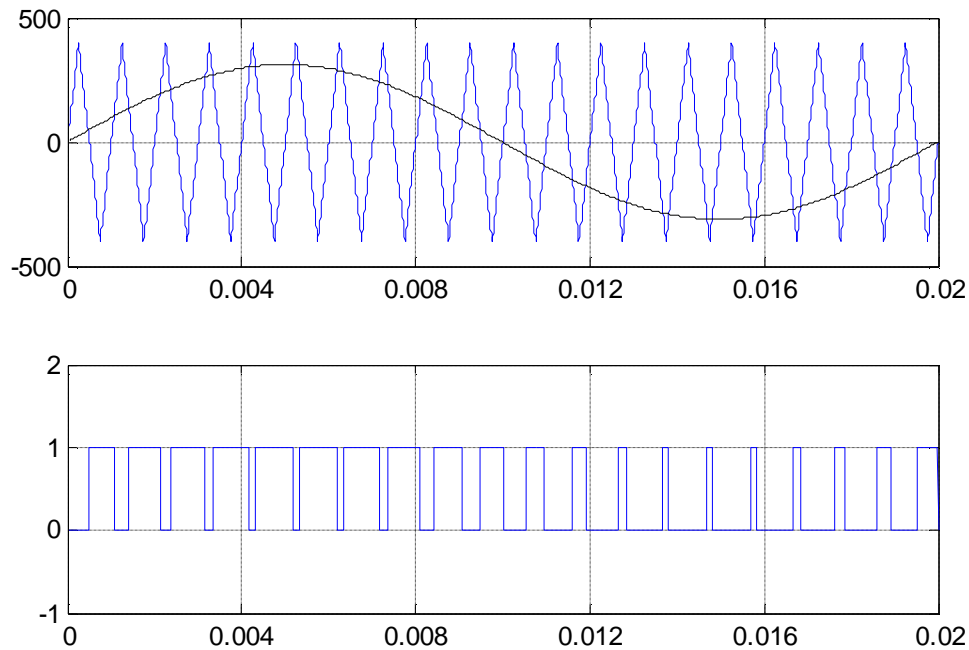


figure II-14 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulaire sinusoïdale à une porteuse.

II.7. Simulation de la commande de la MADA

Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MATLAB-Simulink, à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir la machine, l'onduleur, la commande MLI, les régulateurs et divers composants nécessaires à la commande. Nous avons soumis le système à des échelons de référence afin d'étudier le comportement de la régulation des puissances active et réactive de la machine transmises au réseau.

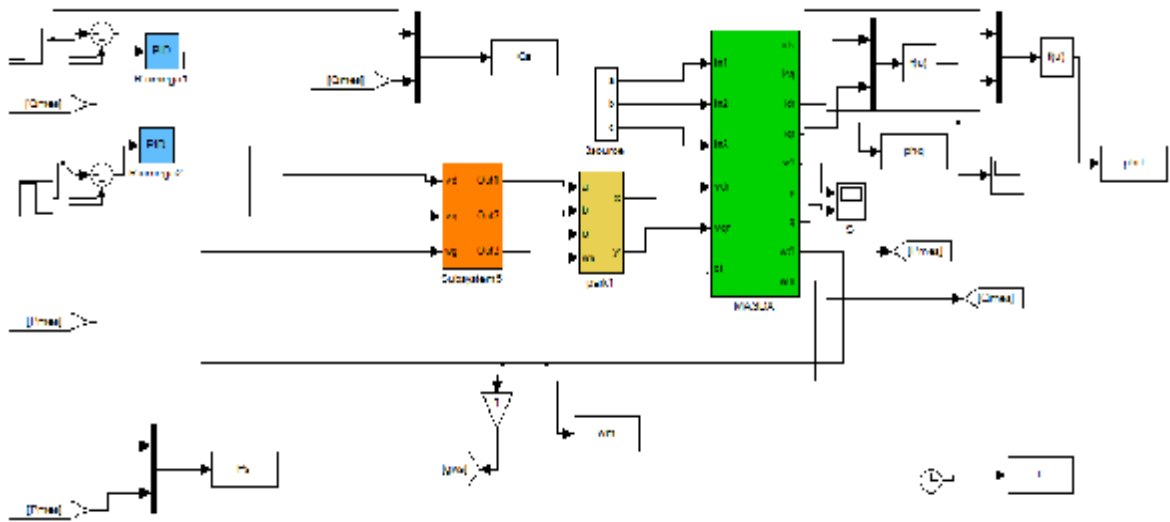
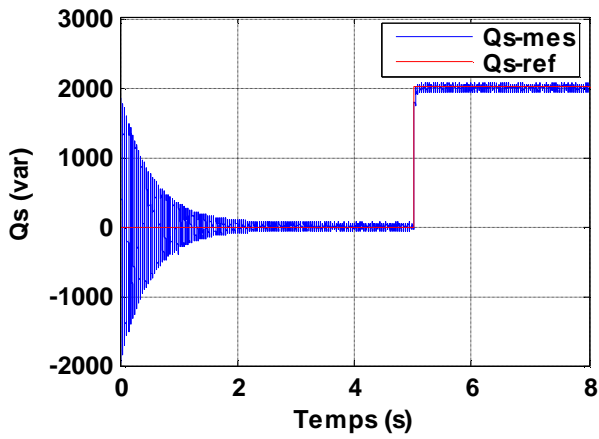


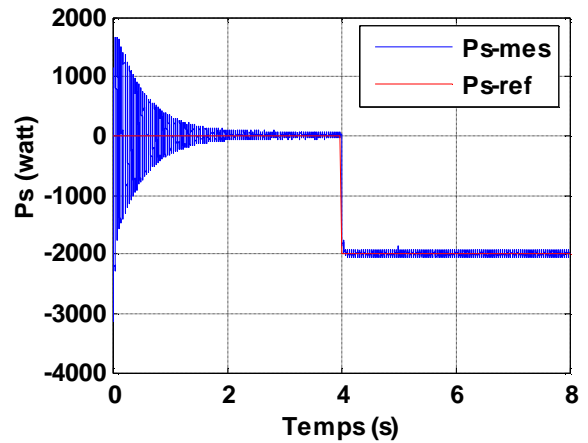
Figure II-15 Schéma bloqué du modèle de la commande

II.7.1. Résultats de simulations:

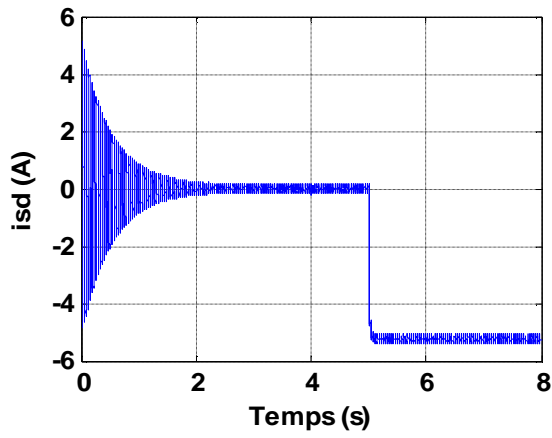
Les résultats de simulation sont présentés sur les figures ci-dessous :



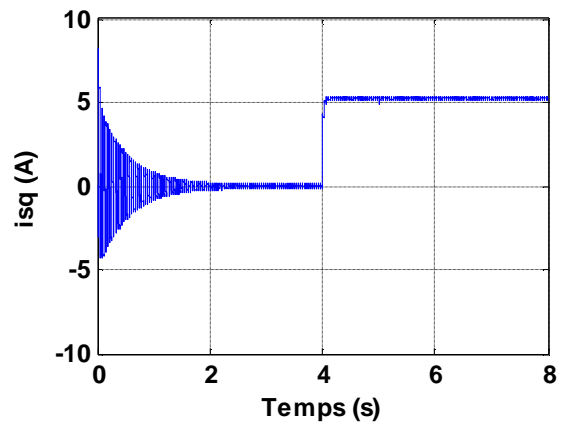
a- Puissance réactive statorique



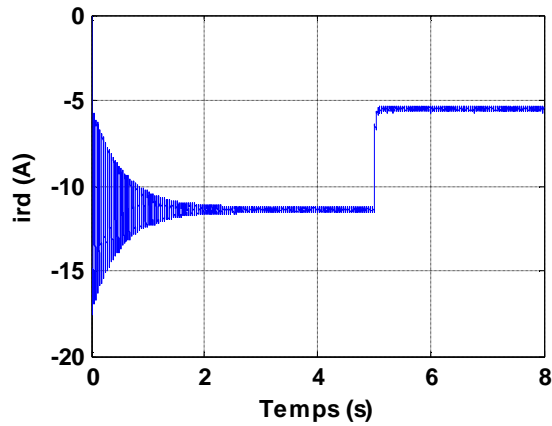
b- Puissance active statorique



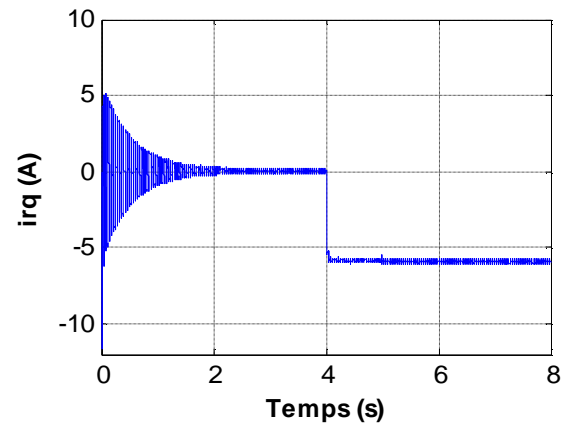
c-courant statorique à l'axe d(A)



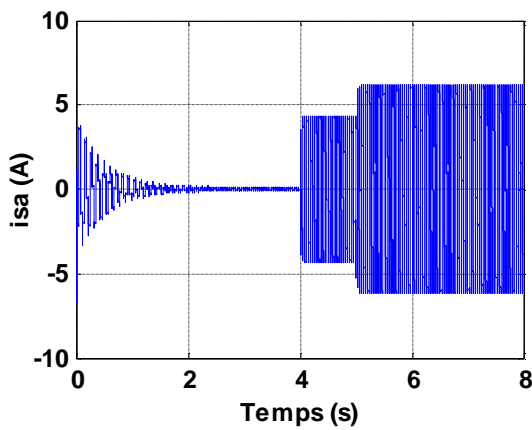
d-courant statorique à l'axe q(A)



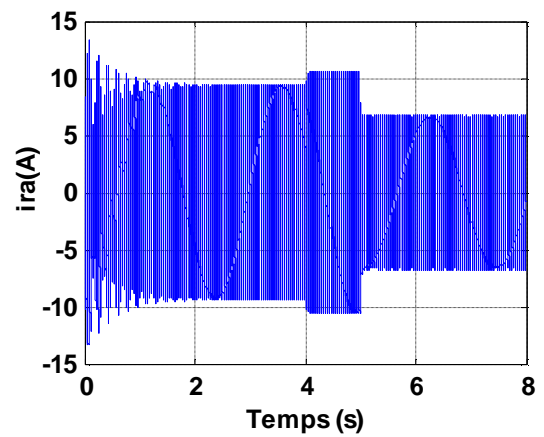
e-courant rotorique à l'axe d(A)



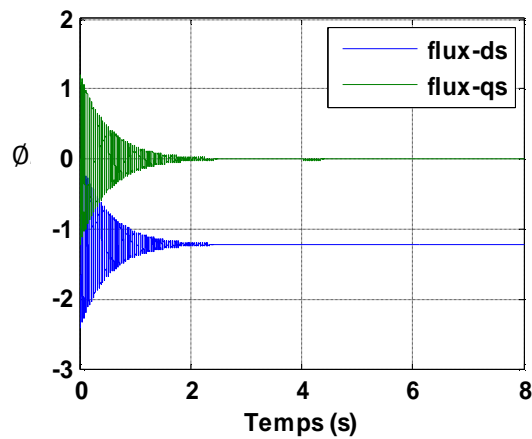
f-courant rotorique à l'axe q(A)



g- Courant d'une phase statorique



h- Courant d'une phase rotorique



J-Flux statorique

Figure II-16 Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA

II.7.2. Interprétations des Résultats

Ces résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle, à l'instante $t=[0\ 4]$ c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.

II.8. Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure (II.17). Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.

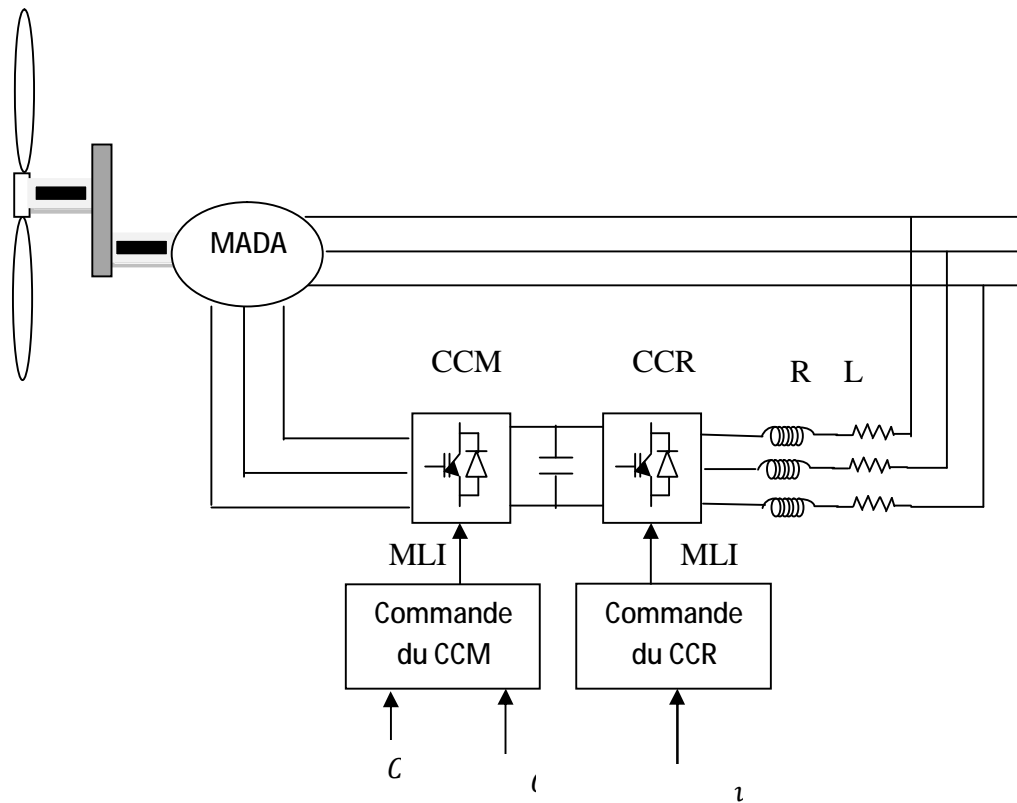


Figure II-17 Architecture de commande du système éolien

II.9. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI et avantage

La structure de la cascade est celle représentée sur la figure (II-17). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Le modèle du convertisseur connecté au rotor était déjà présenté dans chapitre deuxième où les signaux de commande sont déterminés en appliquant la commande vectorielle à la MADA. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que l'autre, sauf que les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le

facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales), ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage [23].

II.10. Commande du convertisseur côté MADA – CCM

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du CCM dont le principe est illustré à la Figure (II-18)

Les contrôles du couple électromagnétique et de la puissance réactive statorique seront obtenus en contrôlant les courants rotoriques d'axes d-q de la MADA

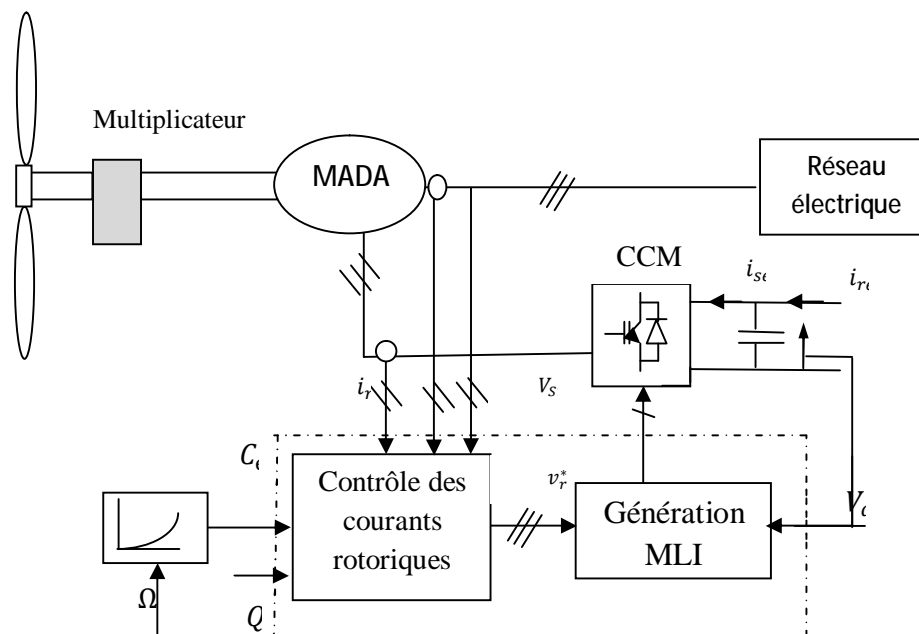


Figure II-18 Principe de la commande du CCM.

En considérant le choix du repère d-q lié au champ tournant statorique et en négligeant la résistance des bobinages statoriques, une simplification des équations de la MADA dans le repère d-q peut être obtenu à partir des équations (II.18) :

Pour le couple électromagnétique, l'équation (II.23) devient :

$$C_{em} = -P \frac{M \cdot L_m}{L_s} \cdot \phi_{sd} \cdot i_{rq} \quad (\text{II. 45})$$

Une fois le flux statorique estimé, il faut générer les courants rotoriques de référence

d'axes d-q. Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation III.45), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{rq}^* et le couple électromagnétique C_{em} [24].

$$i_{rq}^* = -\frac{L_s}{P.M.L_m \cdot \phi_{sd-est}} \cdot C_{em}^* \quad (\text{III. 46})$$

II.11. Commande du convertisseur côté réseau CCR

II.11.1. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 47})$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit

$$v_n = U_{dc} \left(s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n \right) \quad (\text{II. 48})$$

Où $s_n = 0$ ou 1 , sont l'état des interrupteurs, où ($n=a, b, c$),

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

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II. 49})$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{II. 50})$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{dc} \quad (\text{II. 51})$$

Aussi, le courant i_c est la somme du produit des courant de chaque phase par l'état de son Interrupteur

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II. 52})$$

Donc, le coté alternatif du redresseur

$$L \frac{di_a}{dt} + R i_a = e_a - U_{dc} \left(s_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n \right) = e_a - U_{dc} \left(s_a - \frac{1}{3} (s_a - s_b + s_c) \right) \quad (\text{II. 53})$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(s_b - \frac{1}{3} (S_a - S_b + S_c) \right) \quad (\text{III. 54})$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(s_c - \frac{1}{3} (S_a - S_b + S_c) \right) \quad (\text{III. 55})$$

Où les tensions du réseau sont exprimé par:

$$\begin{cases} e_a = E_m \sin wt \\ e_b = E_m \sin \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_c = E_m \sin \left(wt + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{III. 56})$$

Précédent peut résumé comme suit:

$$\left(L \frac{d}{dt} + R \right) i_n = e_n - U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{III. 57})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{K=a}^c i_n S_n - i_{ch} \quad (\text{III. 58})$$

La combinaison des équations (II.57), (II.58) peut être représentée comme le schéma Fonctionnel triphasé, qui montré dans la figure(II.3). [25]

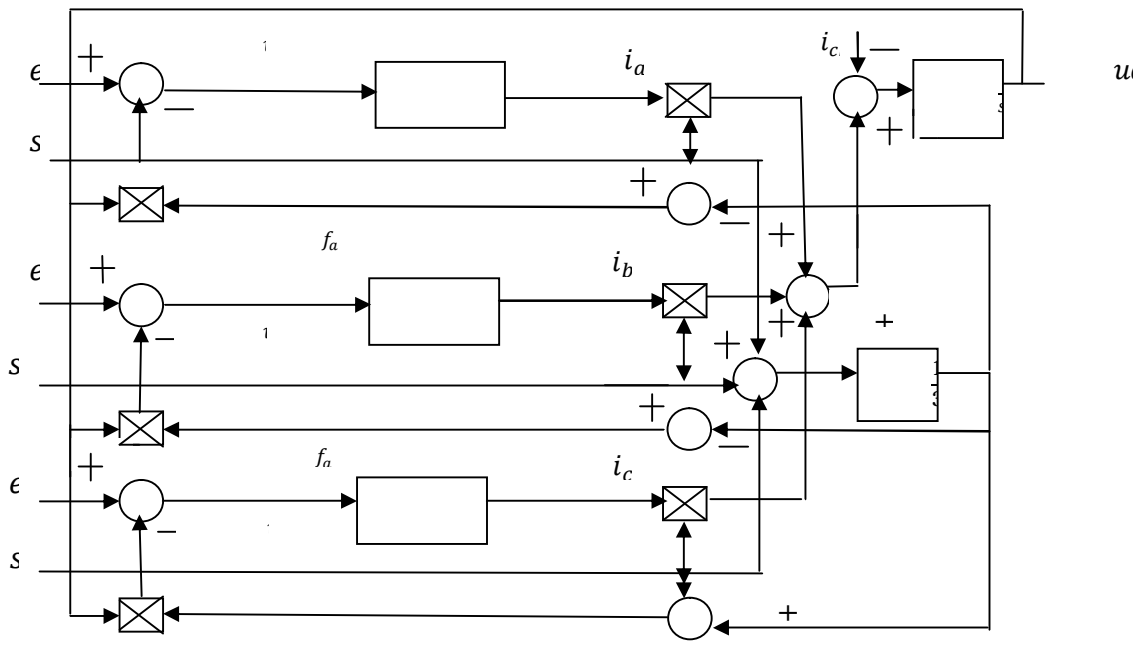


Figure II-19 Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

III.11.2 .Méthode de synchronisation

Afin d'échanger une puissance contrôlée, le redresseur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est donc d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (en anglais PLL, Phase Locked Loop). Cependant, quelques auteurs utilisent aussi une estimation du flux virtuel [25].

III.11.2.1.Boucle à verrouillage de phase PLL

Dans les applications réseau électrique, la PLL sert essentiellement à estimer et filtrer la phase et l'amplitude instantanée du phaseur équivalent d'un système triphasé. La PLL réalise la suivi de phase de la composante directe de la tension du réseau e_d , afin d'éliminer la composante en quadrature, e_q , ce qui se produit lorsque la phase estimée, γ , est égale à la phase du réseau. La Figure (II.20) montre la structure classique d'une PLL triphasée.[25]

Elle est composée d'un détecteur de phase (la transformée de coordonnées), un filtre passe bas (le correcteur) et un oscillateur (l'intégrateur).

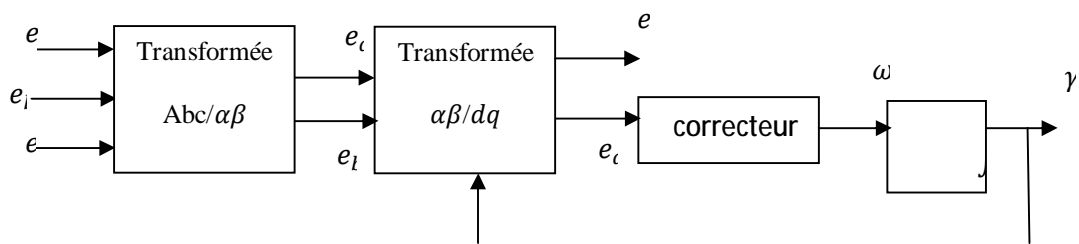


Figure II-20 Structure classique d'une PLL triphasée.

Souvent la tension du réseau n'est pas parfaite et présente des harmoniques. Dans ce cas-là, la vitesse et l'amplitude instantanées du phaseur équivalent de la tension du

réseau ne sont pas constantes. La vitesse moyenne de rotation et l'amplitude moyenne correspondront à la vitesse et l'amplitude de la composante fondamentale, tandis que les oscillations seront dues aux harmoniques.[25]

Du fait de la nature du filtre d'une PLL, l'information de phase obtenue à sa sortie dépend de sa bande passante. Ainsi, si celle-ci est très élevée, la phase de sortie sera une image de celle correspondant au phaseur équivalent instantané de la tension, c'est-à-dire, Conte nant tous les harmoniques. Par contre, si la bande passante est suffisamment réduite, les harmoniques seront filtrés et la sortie sera une image de la phase du phaseur équivalent de la composante fondamentale. Cette dernière méthode est la meilleure solution pour pouvoir rejeter les harmoniques qui agissent sur la phase. Ce fait entraîne une diminution de la dynamique de la PLL. Cependant, dans cette application, il n'y a pas de compromis à faire entre la précision et la vitesse de la réponse, car le but recherché est une bande passante réduite de la PLL. [25]

Evidemment, cette dynamique limitée provoque un ralentissement du temps de synchronisation lors de la mise en route du système.

II.11.3. Contrôle vectoriel du redresseur MLI

Il y a deux méthodes de contrôle vectoriel, la première basée sur la synchronisation par le PLL, et la deuxième basée sur le flux virtuel, comme expliqué dans le paragraphe (II .21). Dans ce qui suit-on développera la techniques de commande vectoriel basée sur la synchronisation par le PLL.

III.11.3.1. Schéma fonctionnel de contrôle à tension orientée (VOC)

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure (II.21).

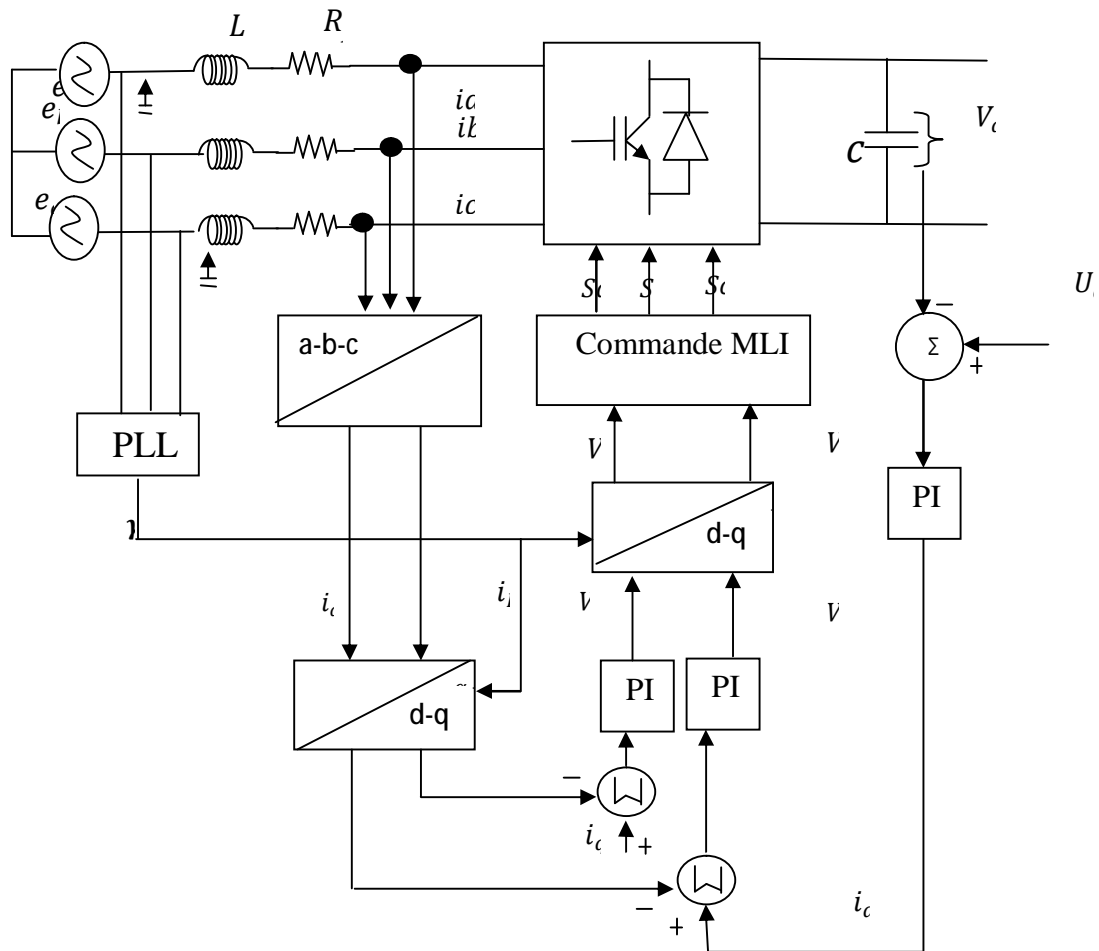


Figure II-21 Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).

La caractéristique de ce dispositif de contrôle en courant est basée sur les transformées dans deux systèmes de coordonnées. Le premier est le système de coordonnées fixe $\alpha - \beta$, et le second est le système de coordonnée tournant $d - q$. Les valeurs mesurées de trois phases sont converties en équivalent système de deux phase ($\alpha - \beta$) et alors sont transformées au système de coordonnées tournant dans le bloc ($\alpha - \beta$) / ($d - q$).

$$\begin{bmatrix} K_d \\ K_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_e & \sin\gamma_e \\ -\sin\gamma_e & \cos\gamma_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \end{bmatrix} \quad \text{(III. 59)}$$

Grâce à ce type de transformation, les grandeurs de commande sont des signaux continus. Une transformation inverse ($d - q$) / ($\alpha - \beta$) est réalisée sur la sortie du système de commande et il donne des signaux des références du redresseur dans les coordonnées fixes

$$\begin{bmatrix} K_a \\ K_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_e & -\sin\gamma_e \\ \sin\gamma_e & \cos\gamma_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_q \end{bmatrix} \quad \text{(III. 60)}$$

La condition pour un facteur de puissance unitaire est obtenue quand le vecteur courant du

réseau \bar{i} est aligné avec le vecteur tension du réseau \bar{e} . [25]

III.11.3.1.1. Etude de la boucle des courants

L'utilisation, des correcteurs PI dans un repère triphasé, présente des problèmes d'application. En effet, des composantes alternatives se retrouvent dans les erreurs à l'entrée des correcteurs PI. Ces grandeurs alternatives sont à l'origine d'erreurs statiques non compensées par les correcteurs PI. Pour résoudre ce problème, des transformées de Park dont le repère qui tourne à la fréquence des tensions du réseau sont utilisées. Ainsi les variables alternatives des courants sont transformées en composantes d'axe d et q continus dès lors que ces signaux ont la même fréquence que le réseau. Cela exige la connaissance de l'angle de référence des tensions du réseau sera nécessaire pour le calcul des transformées.

Cependant, il y a un couplage entre les axes de la transformation de Park, donc une variation sur i_q provoque une variation sur i_d et l'inverse. [25]

Les équations de tension dans le système de coordonnées tournant (d-q) sont :

$$\begin{cases} e_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} + v_d + \omega \cdot L \cdot i_q \\ e_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + v_q + \omega \cdot L \cdot i_d \end{cases} \quad (\text{III. 61})$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par les variables h_d et h_q :

$$\begin{cases} h_d = e_d - v_d - \omega L i_q = L \frac{di_d}{dt} + R \cdot i_d \\ h_q = e_q - v_q - \omega L i_d = L \frac{di_q}{dt} + R \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{III. 62})$$

Le système d'état découplé est présenté donc, par :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_d \\ h_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 63})$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur h_d et h_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

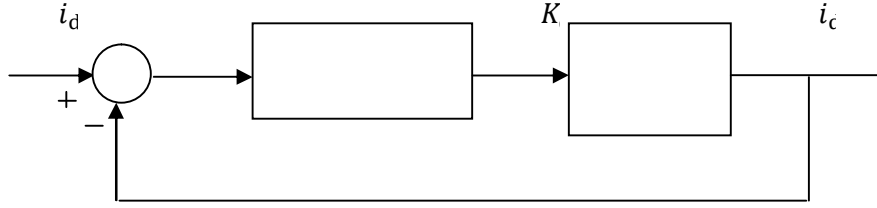


Figure II-22 Schéma fonctionnel pour le réglage du courant.

Dans ce cas, les contrôleurs de courants utilisés, sont de type PI. Les paramètres K_p et K_i sont calculés en fonction de temps de réponse et le coefficient d'amortissement.

$$\begin{cases} K_{pi} = 2. \xi \omega_n L - R \\ K_{ii} = L \omega_n^2 \end{cases} \quad \text{(III. 64)}$$

Où $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω_n dépend de temps de repense choisi. Aussi, le système en boucle fermée pour le courant direct et en quadrature est donné :

$$\frac{i_d}{i_{d_ref}} = \frac{i_q}{i_{q_ref}} \frac{K_P}{L} \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{s^2 + 2. \zeta \omega_n S + \omega_n^2} \quad \text{(III. 65)}$$

On prend $\omega_n = \omega_c / 5$, pour obtenir une régulation interne rapide .

Où $\omega_c = 2\pi f$ la pulsation de commutation.

f_c : Fréquence de commutation.

III.11.3.1.2. Boucle de régulation de tension du bus continu

Le modèle dynamique pour le circuit du bus continu aide sur le calcul de fonction de transfert de tension du bus continu, il est représenté par la figure (II.23).

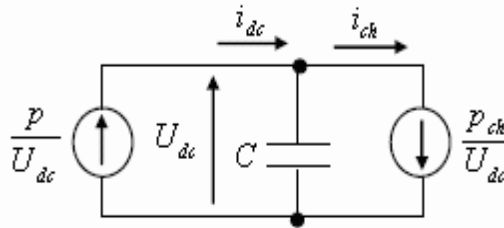


Figure II.23. Modèle dynamique pour le circuit du bus continu

$$P = e_d i_d \approx U_{dc} i_d \approx P_{dc} + P_{ch} = U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} + U_{dc} i_{ch} \quad \text{(III. 66)}$$

On fait la linéarisation du modèle on obtient :

$$(\mathbf{e}_d + \tilde{\mathbf{e}}_d)(\mathbf{i}_d + \tilde{\mathbf{i}}_d) = (\mathbf{U}_{dc} + \tilde{\mathbf{U}}_{dc})\mathbf{C} \frac{d(\mathbf{U}_{dc} + \tilde{\mathbf{U}}_{dc})}{dt} + (\mathbf{U}_{dc} + \tilde{\mathbf{U}}_{dc})(\mathbf{i}_{ch} + \tilde{\mathbf{i}}_{ch}) \quad (\text{III. 67})$$

En régime permanent $e_d i_d = U_{dc} i_{ch}$ et les perturbations de deuxième ordre sont négligeables, et la tension du réseau est alors constante :

$$\mathbf{e}_d \tilde{\mathbf{i}}_d = \mathbf{U}_{dc} \mathbf{C} \frac{d\tilde{\mathbf{U}}_{dc}}{dt} + \mathbf{U}_{dc} \tilde{\mathbf{i}}_{ch} \quad (\text{III. 68})$$

On obtient aussi par la division des termes sur \mathbf{U}_{dc}

$$\frac{\mathbf{e}_d}{\mathbf{u}_{dc}} \tilde{\mathbf{i}}_d = \mathbf{C} \frac{d\tilde{\mathbf{U}}_{dc}}{dt} + \tilde{\mathbf{i}}_{ch} \quad (\text{III. 69})$$

On trouve par l'emploi de la transformation de Laplace. Le terme $\tilde{\mathbf{i}}_{ch}$ apparaît comme perturbation:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{U}}_{dc}(s)}{\tilde{\mathbf{i}}_d(s)} = \frac{e_d}{u_{dc} C S} \quad (\text{III. 70})$$

La figure (III.8) représente le schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu:

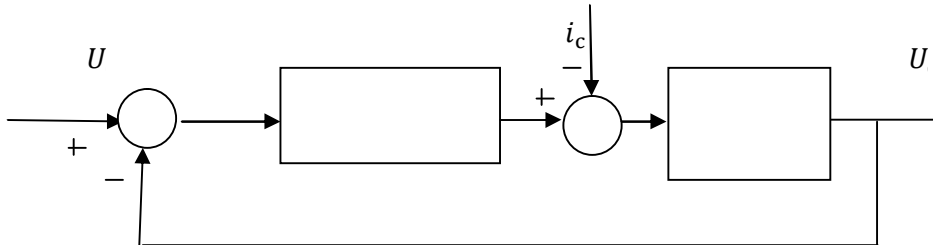


Figure II-24 Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus

Selon les critères sur le temps de réponse et le coefficient d'amortissement, on a :

$$\begin{cases} k_{iv} = \frac{C\omega_{nv}^2}{\frac{e_d}{U_{dc}}} = \frac{C\omega_{nv}^2}{\sqrt{3/2} \frac{E_m}{U_{dc}}} \\ K_{pv} = 2 \frac{C}{\sqrt{3/2} \frac{E_m}{U_{dc}}} \xi_V \omega_{nv} \end{cases} \quad (\text{III. 78})$$

$$\text{Où } \omega_{nv} = \omega/6 \text{ et } \xi_v = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

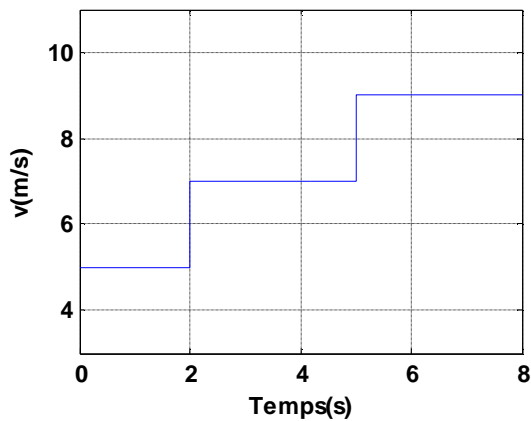
$\omega = 2\pi f$ Avec , f: fréquence du réseau,

II.12.Simulation du système éolien basé sur une MADA

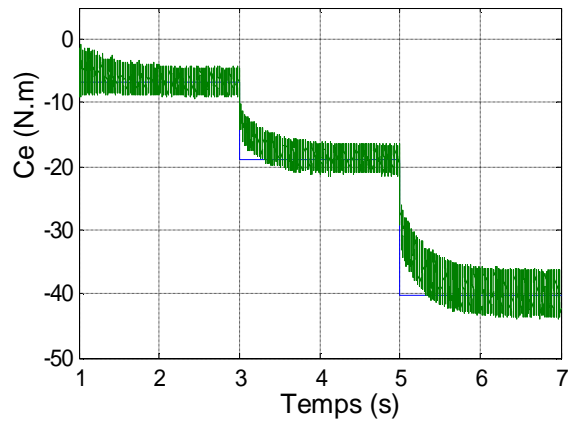
En utilisant l'outil MATLAB, on a établi un programme numérique permettant la simulation de l'évolution des caractéristiques du système éolien étudié dont les paramètres sont donnés dans l'annexe. Ce système est couplé électriquement à un réseau triphasé puissant considéré stable et en équilibre.

II.13.Résultats de simulation

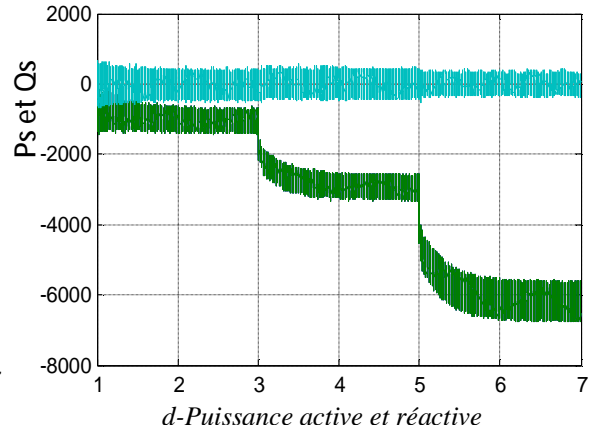
Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab, Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre. Différente vitesse de vent est appliquée sur les pales de l'éolienne. La tension de référence du bus continu, notée Vdc, est fixée à 800 V. La puissance réactive de référence Qs est fixée à 0 Var. Nous montrons que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment.



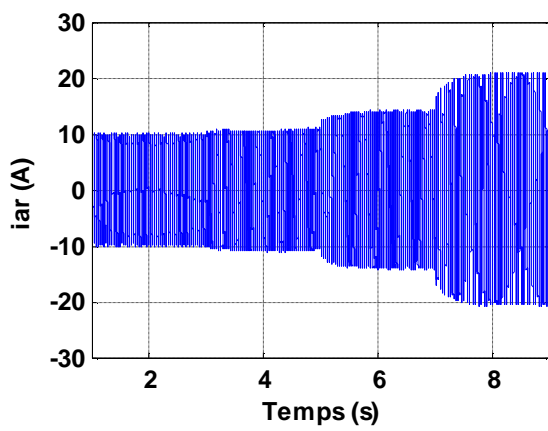
a-Vitesse du vent



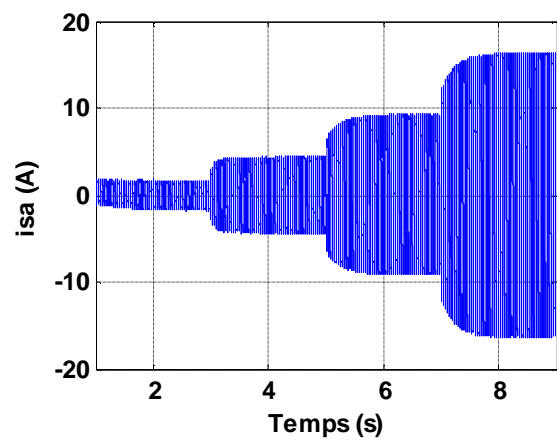
c- Couple électromagnétique



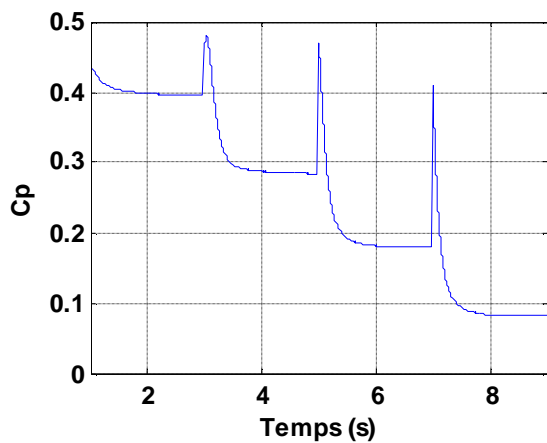
d- Puissance active et réactive statorique



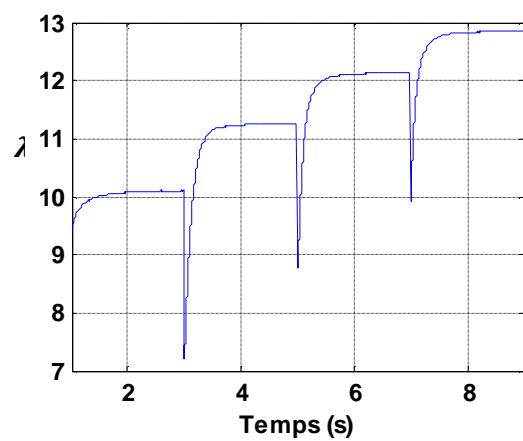
e- courant rotorique d'une phase



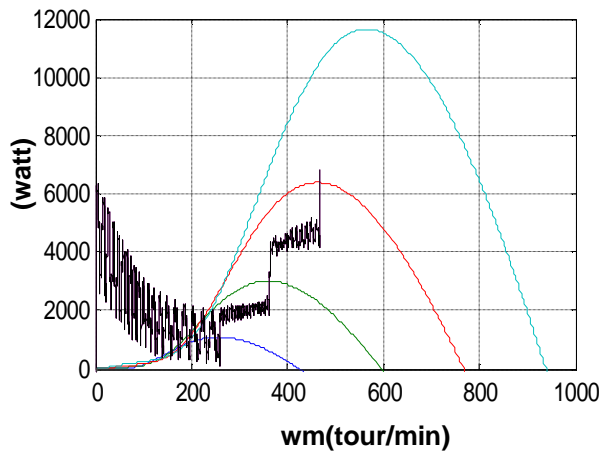
f- Courant statorique d'une phase



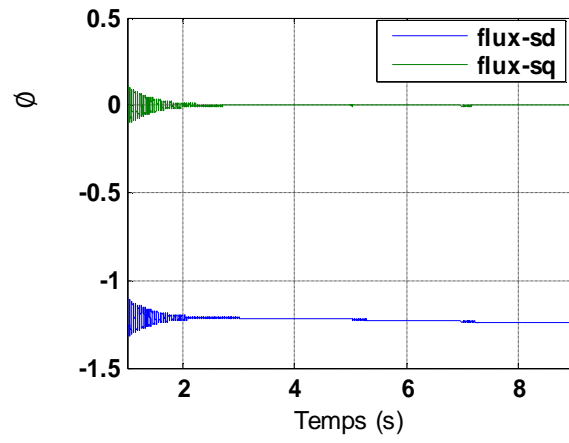
g- Coefficient de puissance



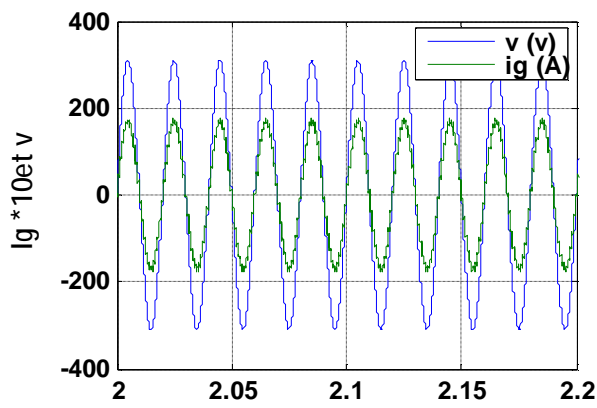
h- Vitesse spécifique lamda



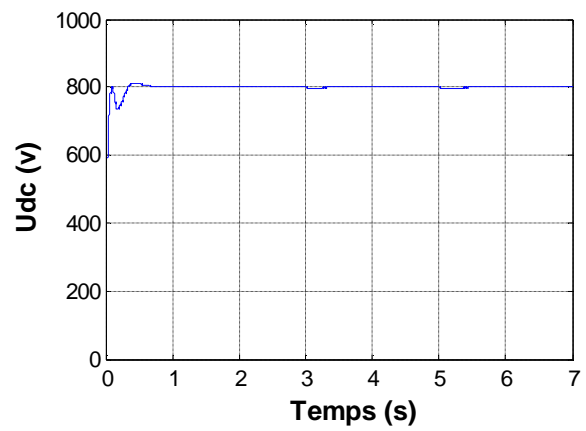
i- caractéristique de l'éolienne Dans Le plan de puissance, vitesse de rotation



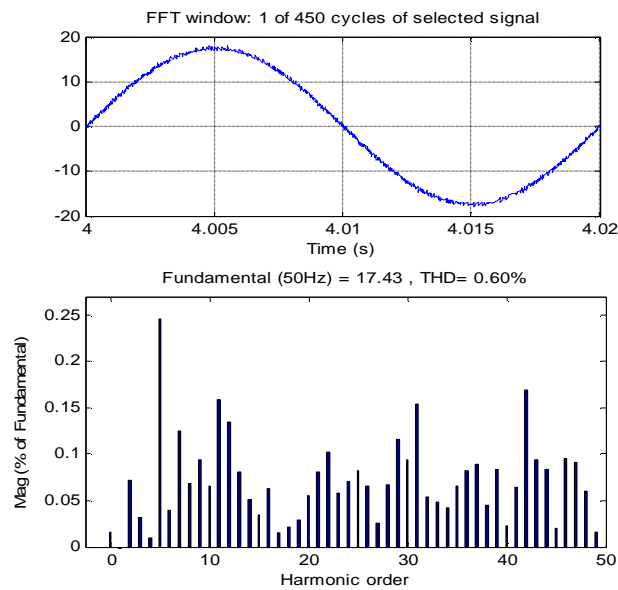
j- Flux statorique



k- tension et courant de la ligne



l- tension du bus continu



m- Spectre harmonique du courant de ligne

Figure II-25 Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

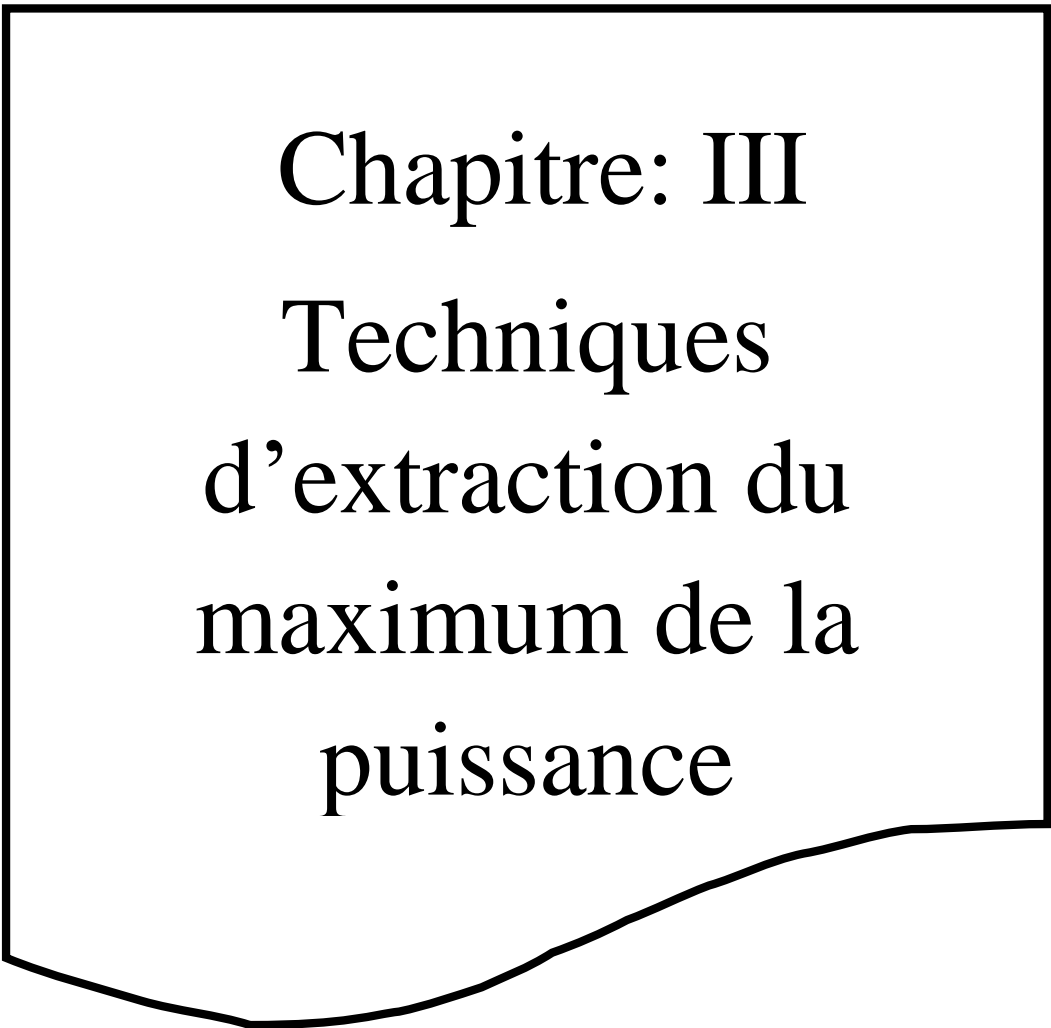
II.13.1. Interprétations des Résultats

Les figures ci dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statoriques et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statorique et le couple électromagnétique. La tension à la sortie du convertisseur côté réseau est à deux niveaux où son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu.

II.14. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques à commande MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié, la structure est associée à des stratégies de commande qui règle le couple électromagnétique recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse de la turbine.



Chapitre: III
Techniques
d'extraction du
maximum de la
puissance

III.1.Introduction

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie suivi du point de puissance maximale, On distingue trois familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées 'Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique, puis le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique. Ainsi nous présenterons le système d'orientation des pales.

III.2. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en trois zones (figure III.1).

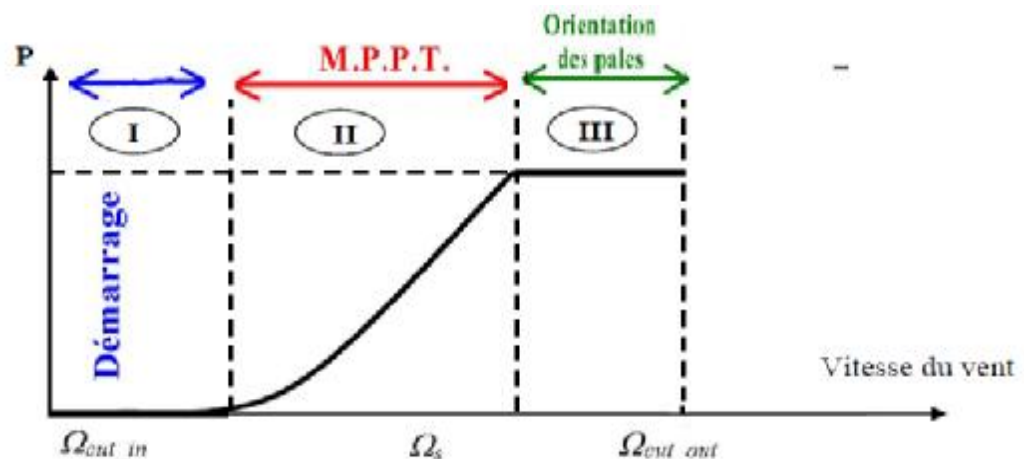


Figure III-1 Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne

Trois zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

- Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut-in} .
- Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta = 0^\circ$.

Ce processus continu jusqu' à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- Zone 3 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.
- Au-delà de la vitesse $\Omega_{cut-out}$, un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

III.3. Bilan de puissance

L'équation (II.2) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique (P_{aer}) diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique.

$$P_{elec} = P_{aer} - P_{ertes} \quad (III. 1)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse mécanique (Ω_{mec}) :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (III. 2)$$

maintenant, nous allons présentons les méthodes et structures de commande qui sont maintenant expliquées, qui permettant de maximiser l'extraction de la puissance éolienne.[01] (figure III.2) :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

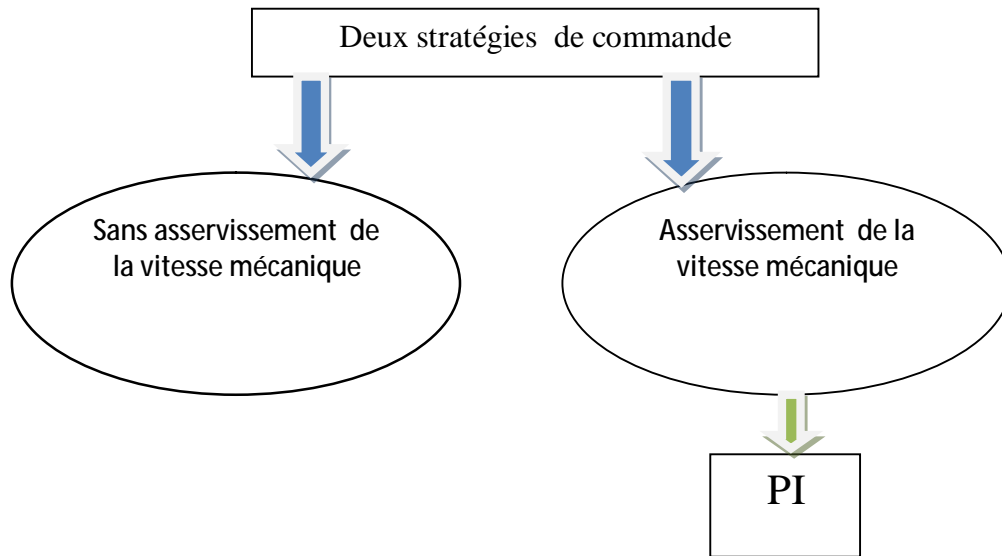


Figure. III-2 Stratégies de commande de la turbine étudiée.

III.4. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.[01]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (\text{III. 3})$$

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

Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (\text{III. 4})$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la

vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em-ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \tag{III.5}$$

Où

- PI est le régulateur de vitesse.
- Ω_{ref} est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc

$$\Omega_{ref} = G. \Omega_{turbine-ref} \tag{III.6}$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{C_{Pmax}}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_P

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{C_{Pmax}} \cdot V}{R} \tag{III.7}$$

III.4.1. Conception du correcteur de vitesse

l'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur référence
- Il doit atténuer l'action du couple éolienne qui constitue une entrée perturbatrice

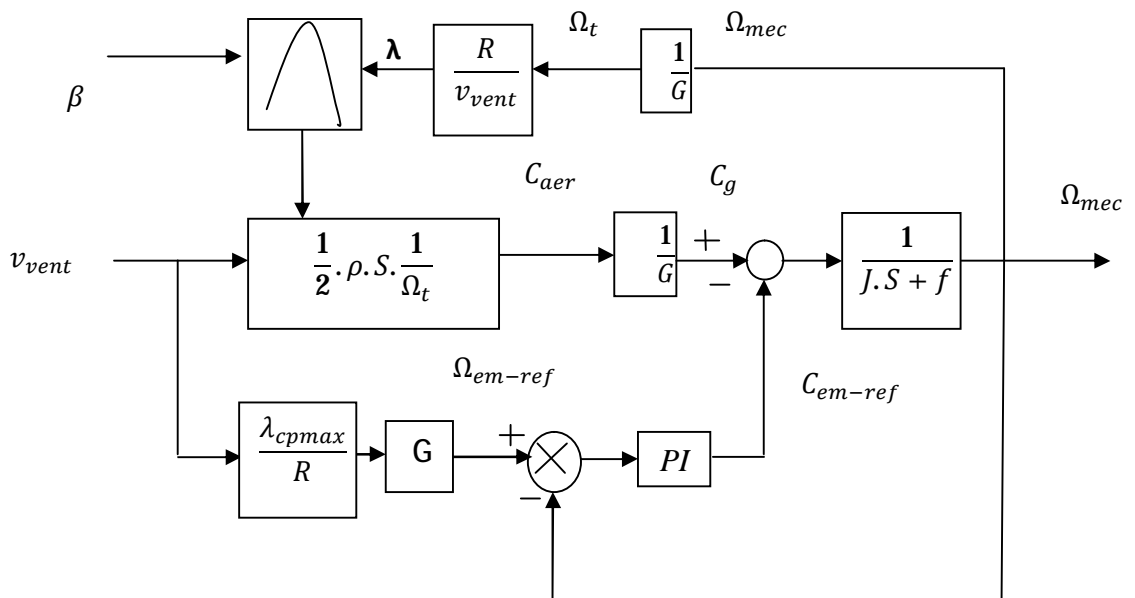


Figure III-3 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

III.5. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 3 m pour une éolienne de 10KW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [01].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III.8)$$

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

$$C_{em} = C_g \quad (III.9)$$

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (III.10)$$

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

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} \cdot V_{estimé}^3 \quad (III.11)$$

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

$$\Omega_{\text{turbine-estimé}} = \frac{\Omega_{\text{mec}}}{G} \quad (\text{III. 12})$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{\text{estimé}} = \frac{\Omega_{\text{turbine-estimé}} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III. 13})$$

En regroupant ces quatre équations (III.13, III.11, III.10, III.12), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{\text{em-ref}} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{\text{mec}}^2}{G^3} \quad (\text{III. 14})$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_p max$ (figure III.3). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{\text{em-ref}} = \frac{C_p}{\lambda_{cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{\text{mec}}^2}{G^3} \quad (\text{III. 15})$$

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

$$C_{\text{em-ref}} = A \Omega_{\text{mec}}^2 \quad (\text{III.16})$$

Avec:

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (\text{III. 17})$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure (III.5)

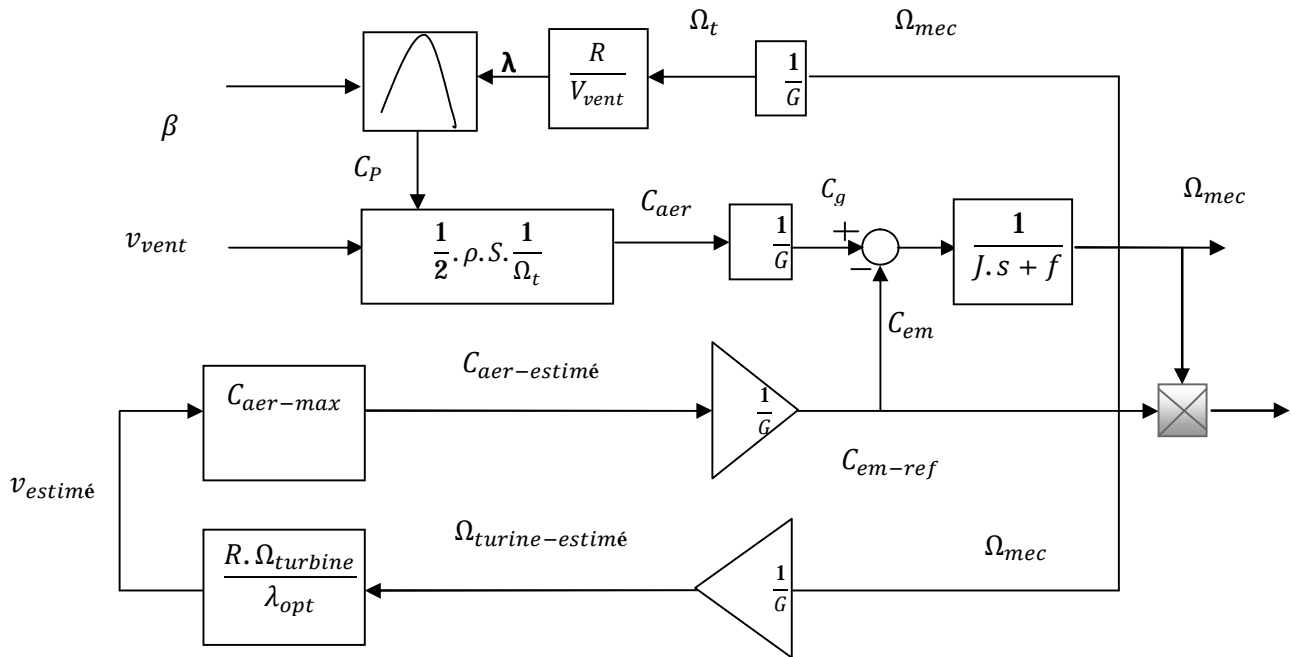


Figure. III-4 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

III.6. Orientation de pales

les turbines de grande puissance, de nos jours utilisent le système PITCH pour le contrôle dans la puissance dans la zone III, Elles utilisent pour cela le principe de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à sa valeur nominale .

Ainsi l'orientation des pales pour augmenter ou diminuer portance selon la vitesse du vent constitue l'organe principale du contrôle de la puissance extraite de la turbine.

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 basses vitesses, puis ,pour les fortes vitesse de vent s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance ,Elles atteignent la position <<en drapeau($B=90^\circ$)>> à la vitesse maximale V_{max} .[22]

La commande du système d'orientation des pales est la puissance électrique mesurées montrée à la figure(III.5)

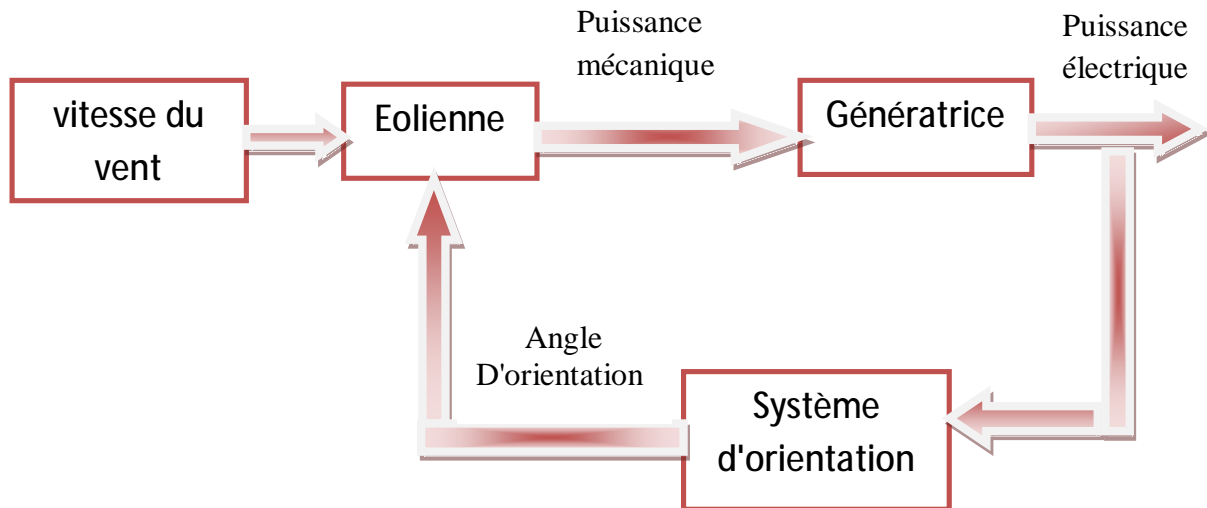


Figure III-5 schéma de principe de l'implantation du contrôle de l'angle de calage

En générale la modélisation du PITCH se fait en trois étapes:

1. génération de l'angle de référence β_{ref}
2. régulation de l'angle d'orientation
3. régulation de la vitesse de variation de l'angle

La figure (III-6) montre les différentes parties d'un système de contrôle de l'angle de calage.

III.6.1. Génération de l'angle d'orientation

La conception analytique de ce réglage est complexe à cause es caractéristiques des pales et du modèle non linéaire de la turbine, Il est plus pratique d'utiliser des caractéristiques expérimentales renseignant les puissance mesurées pour différents angle de calage, dans le cas de manque de ces information ,l'angle de référence est obtenu par le réglage de l'erreur entre la puissance mesurée et celle de référence [22]

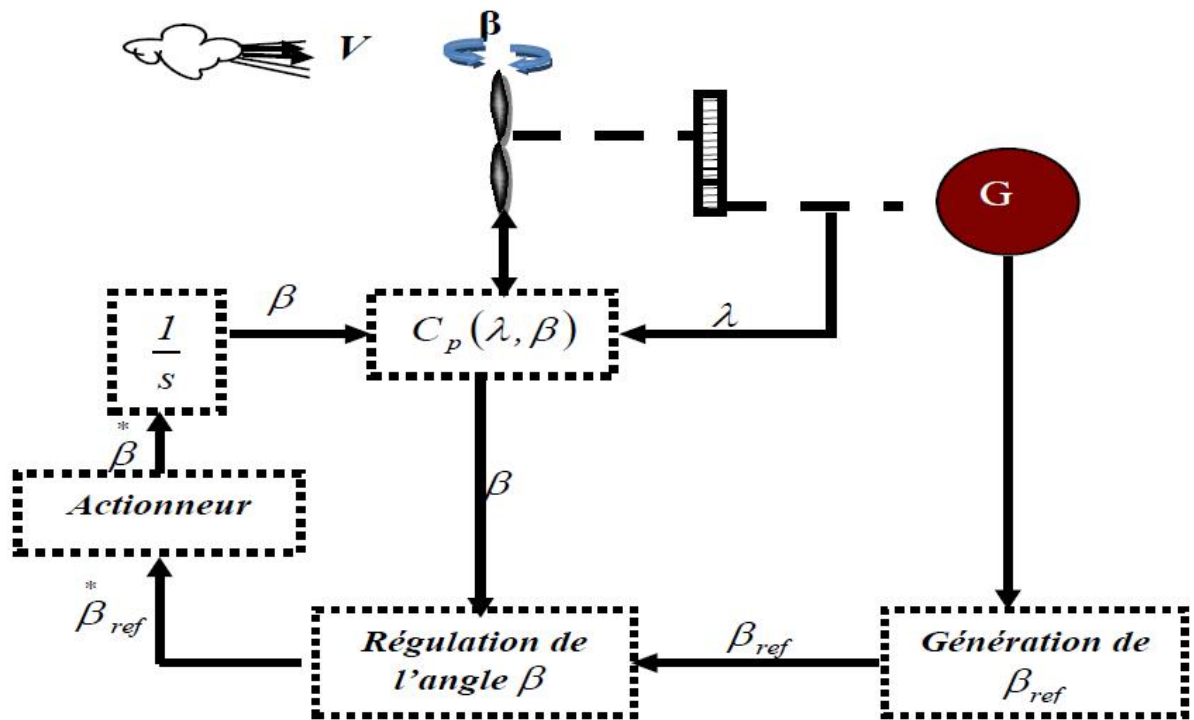


Figure III-6 schéma bloc du contrôle de l'angle de calage

III.6.2. Réglage de l'angle d'orientation

Le régulateur est conçu soit pour le calage de toutes les pales soit pour chacune d'elle indépendamment. La régulation indépendante donne plus de degrés de liberté au système de commande, mais peut entraîner un déséquilibre aérodynamique dans la turbine. Un système précis de mesure est par conséquent utilisé pour assurer que l'angle de calage de chacune des pales soit le même. Certains auteurs représentent tout simplement la régulation de l'angle par une simple fonction de transfert du premier ordre [22].

III.6.3. Régulation de la vitesse de variation de l'angle d'orientation

Lors de la modélisation du système de commande du pas pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle doit être limitée à environ 10% lors d'un fonctionnement normale et à 20 % pour les cas d'urgence. La boucle de régulation de la vitesse de variation de l'angle de calage peut être approchée par un système linéaire du premier ordre contenant la dynamique principale défini par une constante de temps τ_{dB} [22]. Si l'on considère que la régulation de la vitesse de l'angle de calage et le contrôle de l'actionneur sont parfaitement réalisés, on aura:

$$\beta_{ref} = \beta$$

La régulation de l'angle de calage est donc modélisée par régulateur générant une référence de vitesse de variation de l'angle, cette référence est limitée. L'angle de calage est ensuite obtenu en intégrant la variation de l'angle

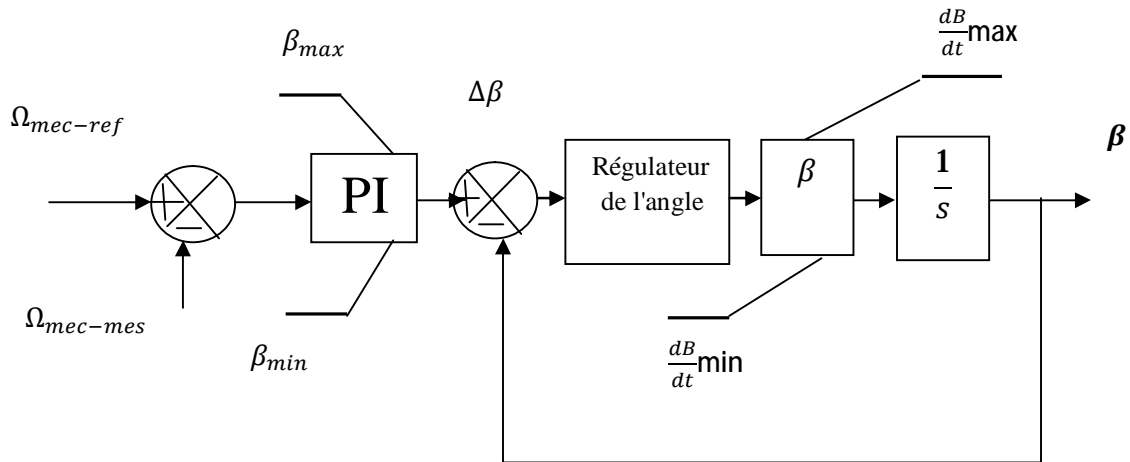
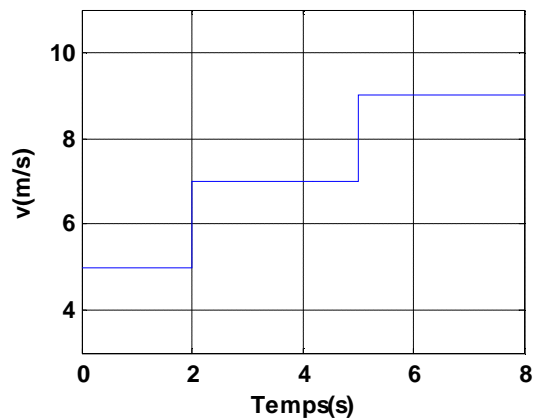


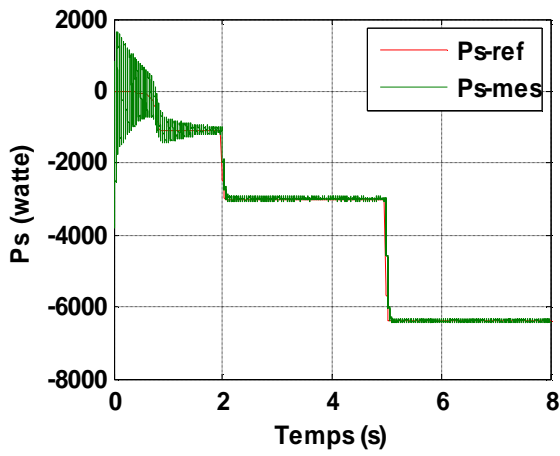
Figure III-7 modèle du système de régulation de l'angle de calage

III.7.simulation et résultats

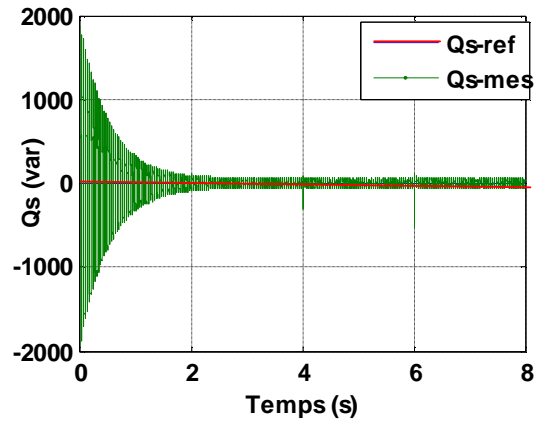
● avec asservissement de vitesse



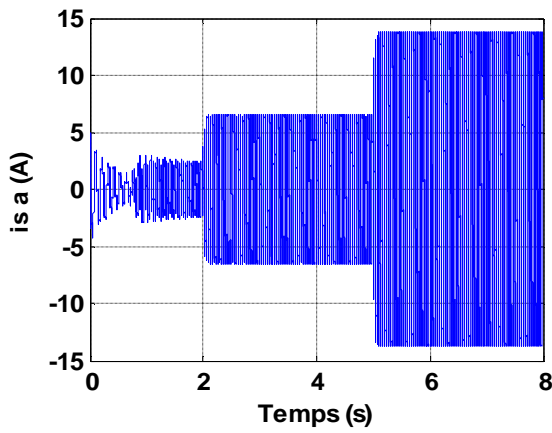
a- Vitesse du vent



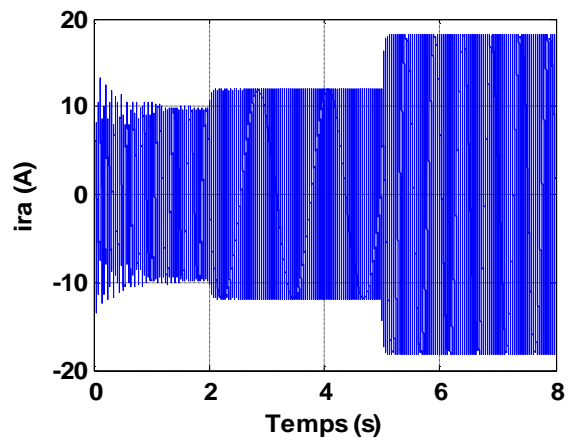
b- Puissance active statorique



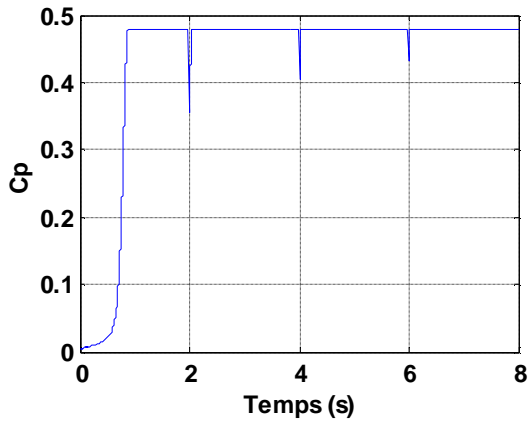
c- Puissance réactive statorique



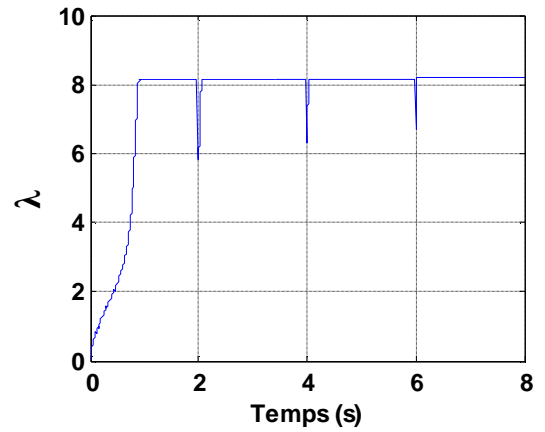
d- Courant d'une phase statorique



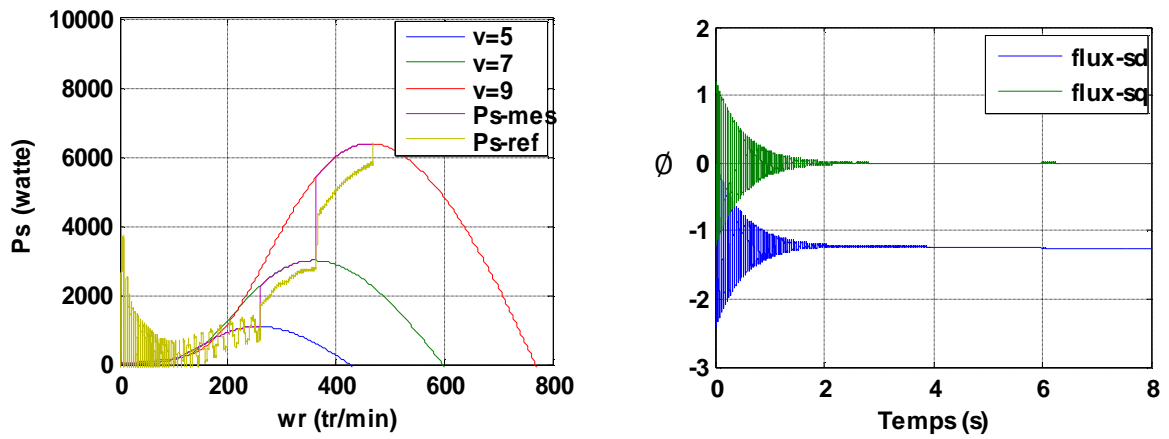
e- Courant d'une phase rotorique



f- Coefficient de puissance de la turbine



g- Vitesse relative de la turbine

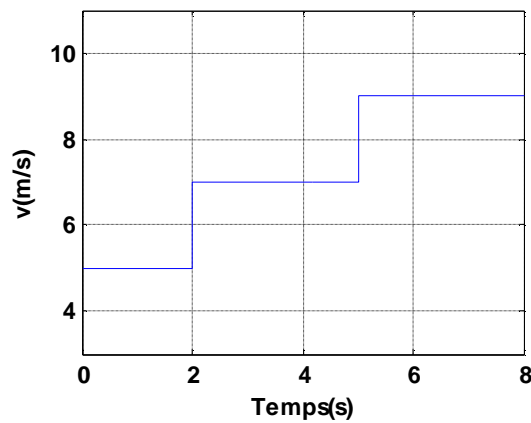


h- caractéristique de l'éolienne dans le plan de puissance, vitesse rotation

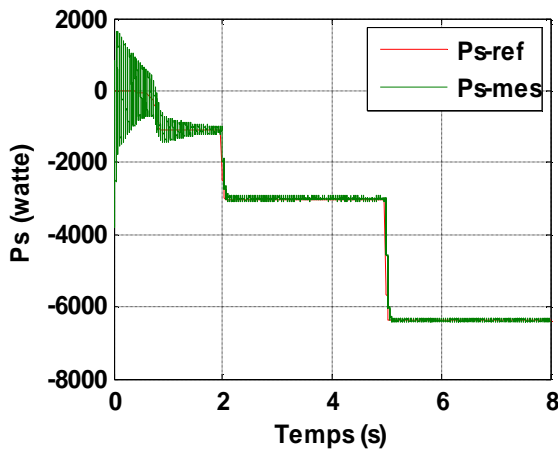
i- Flux statorique de la GADA

Figure III-8 Résultat de simulation d'une chaîne de conversion éolienne (avec asservissement de la vitesse mécanique)

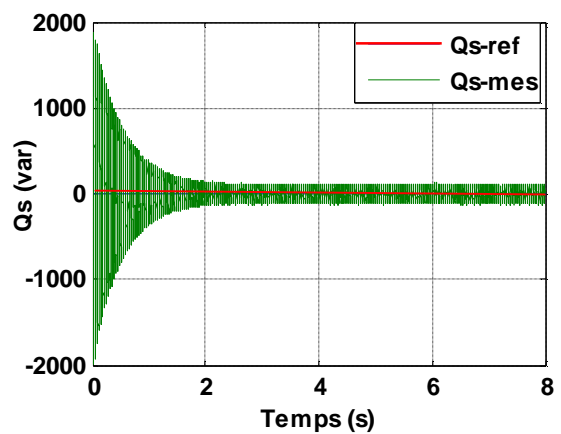
● **sans asservissement de la vitesse**



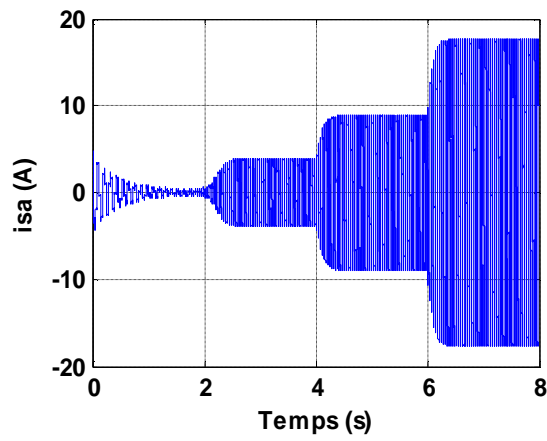
a- Vitesse du vent



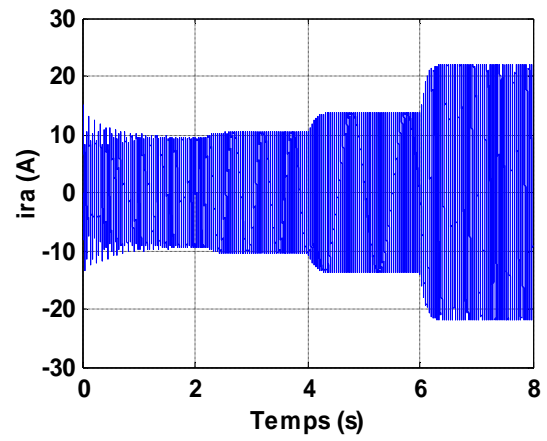
b- Puissance active statorique



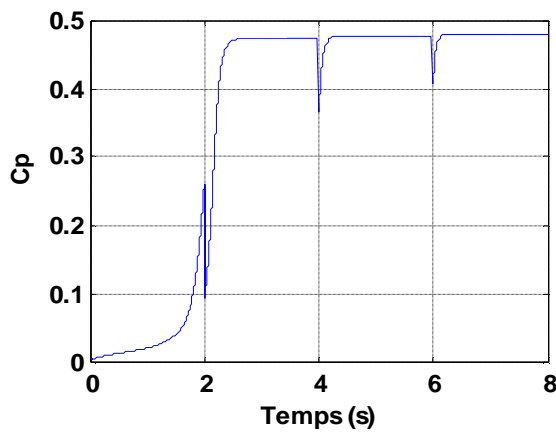
c- Puissance réactive statorique



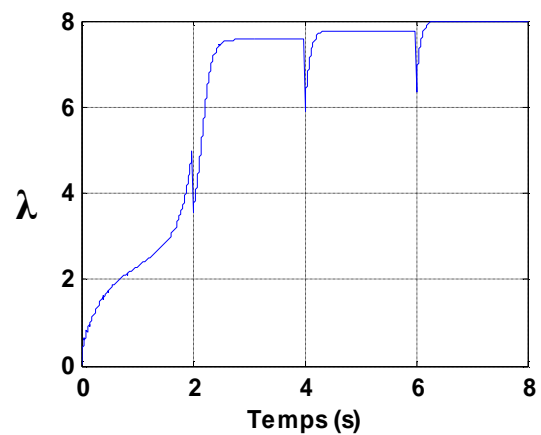
d- Courant d'une phase statorique



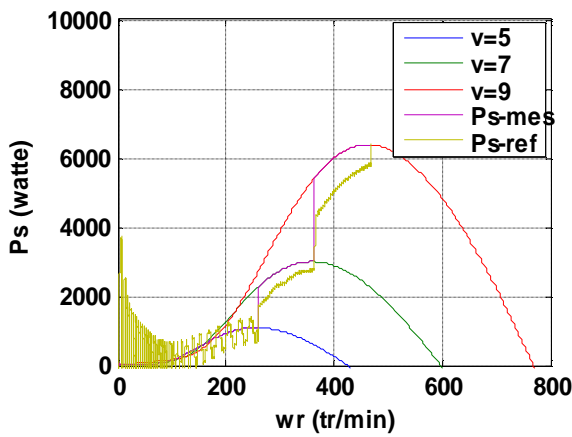
e- Courant d'une phase rotorique



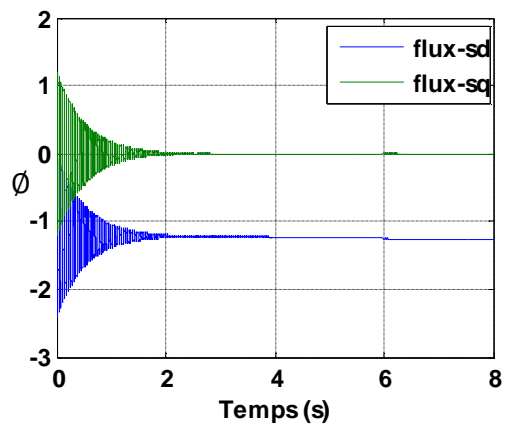
f- Coefficient de puissance de la turbine



g- Vitesse relative de l'éolienne



h- caractéristique de l'éolienne dans Le plan de puissance, vitesse rotation



i- Flux statorique de la MADA

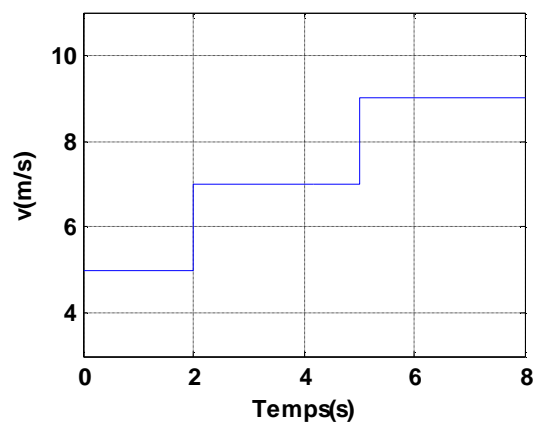
Figure III-9 Résultat de simulation d'une chaîne de conversion éolienne (sans asservissement de la vitesse mécanique)

III.8. Interprétations des Résultats

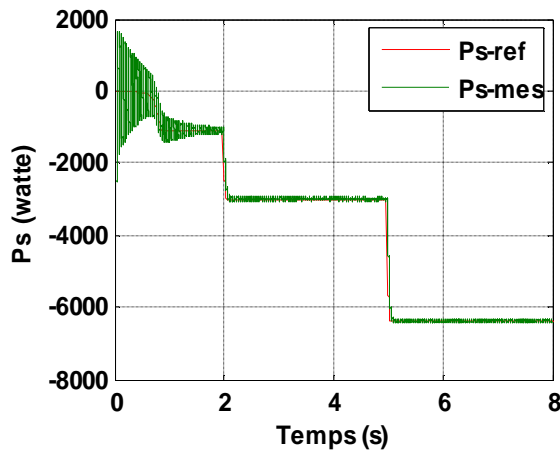
Le profil du vent appliqué est donné dans la Figure III-10-a ci-dessus. D'après les résultats obtenus pour cette application, on distingue les remarques suivantes :

- La vitesse spécifique λ et le coefficient de puissance C_p Figure III-10 ne changent pas beaucoup de valeurs, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.48 successivement.
- La puissance active statorique Figure (III-10 et III-11) suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil du vent appliqué.
- La vitesse de la MADA Figure (III-10 et III-11) est l'image du vent entraînant l'éolienne,
- L'allure des composantes du flux statorique montre une bonne orientation du flux garantissant une commande vectorielle bien découplée de la MADA.
- La puissance réactive statorique est nulle c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.

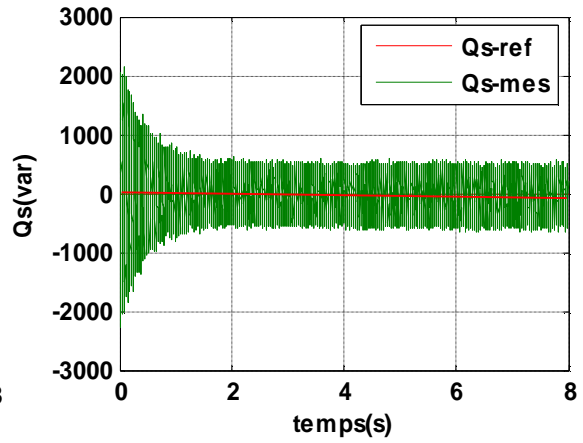
● système orientation



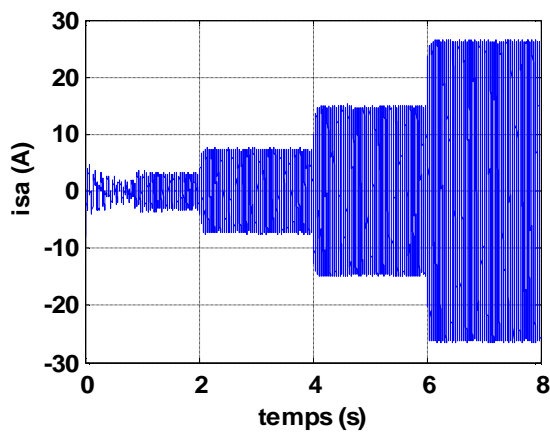
a- Vitesse du vent



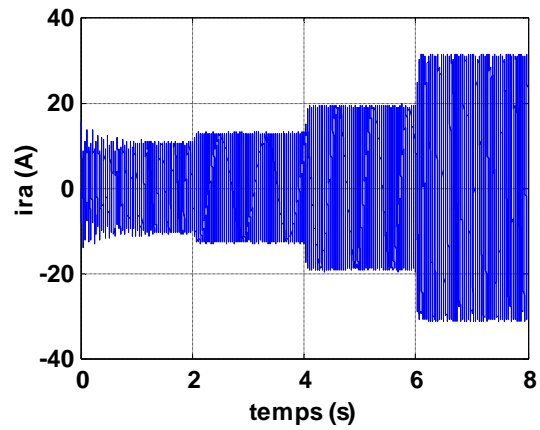
b- Puissance active statorique



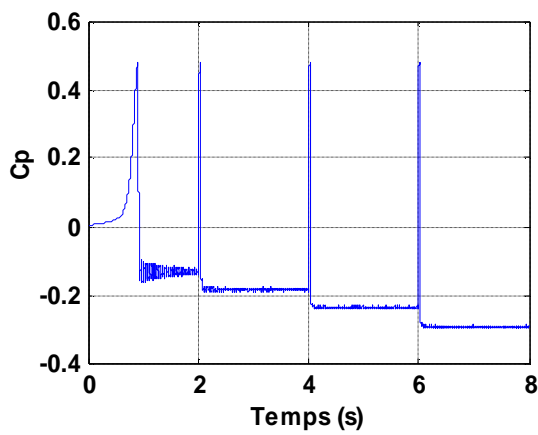
c- Puissance réactive statorique



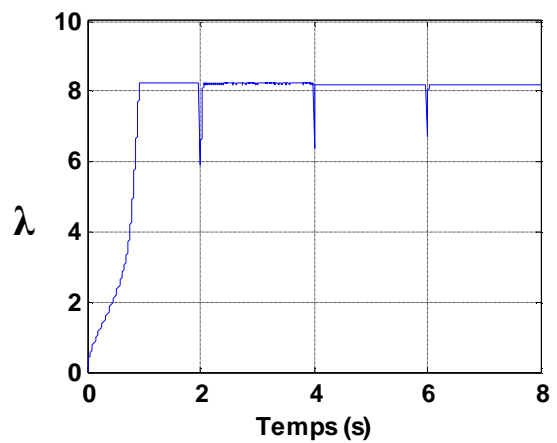
d- Courant d'une phase statorique



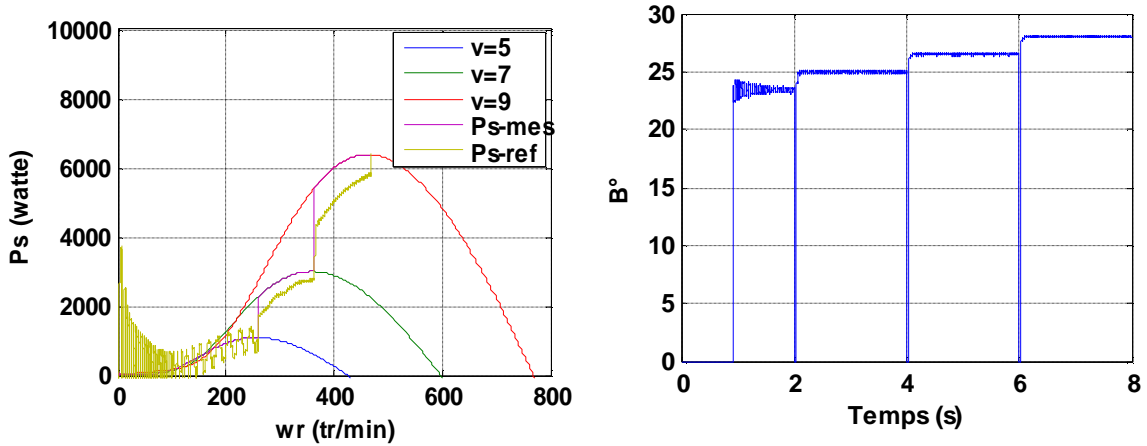
e- Courant d'une phase rotorique



f- Coefficient de puissance de la turbine



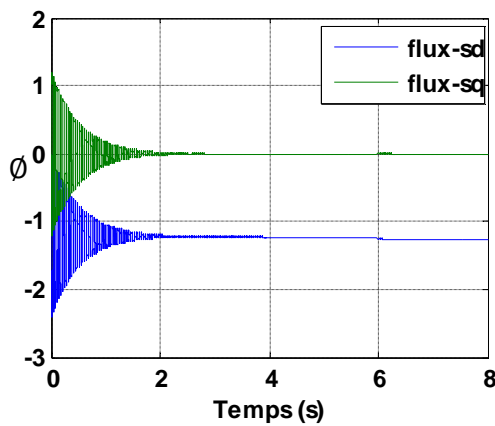
g- Vitesse relative de l'éolienne



h- caractéristique de l'éolienne Dans Le

i-.Variation de l'angle de calage β

plan de puissance, vitesse rotation



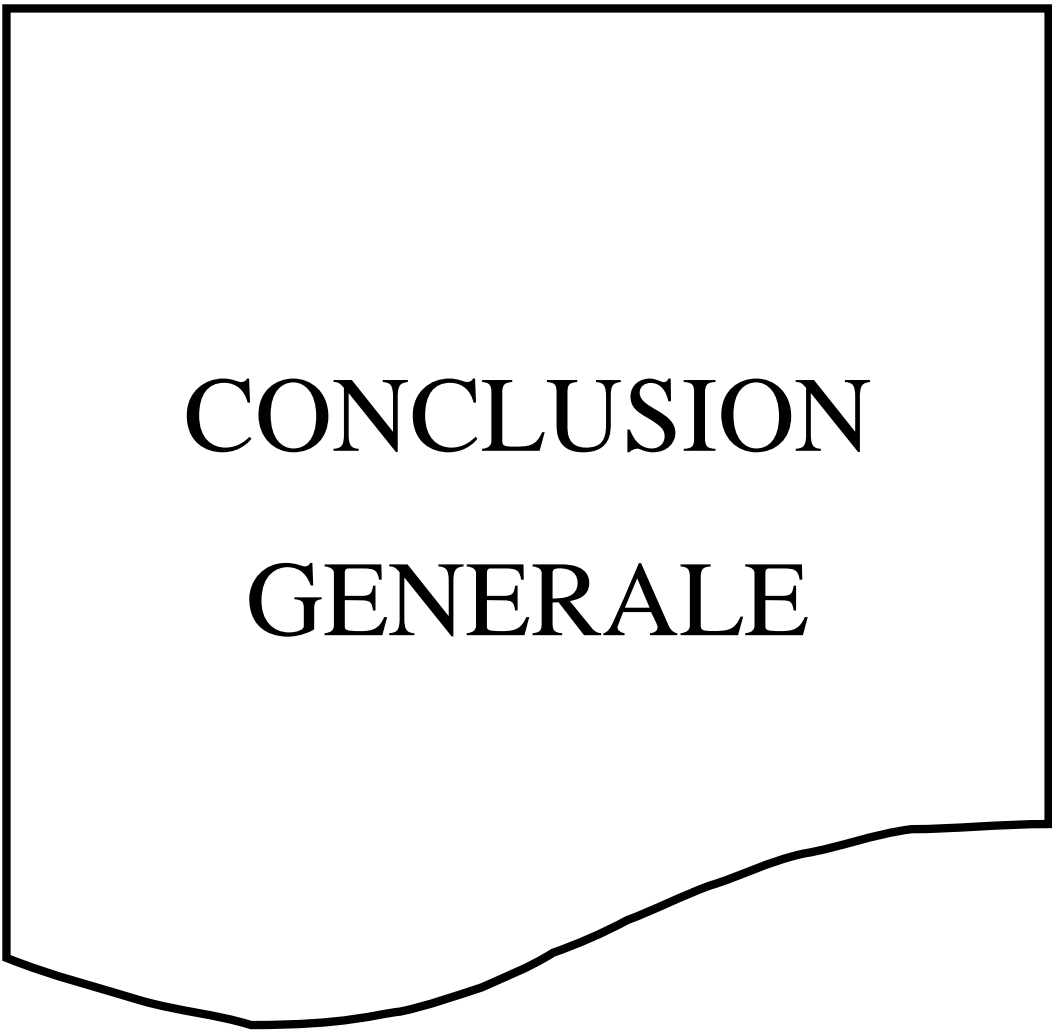
j-.Flux statorique de la MADA

Figure III-10 Résultat de simulation d'une chaîne de conversion éolienne (avec commande de la turbine commandé par orientation des pales)

- Nous pouvons constater que les résultats obtenus dans ce cas est semblable aux résultats précédent mais la différence dans les deux courbes suivant(coefficient de puissance et l'angle de calage β), le coefficient de puissance C_p adaptée à la variation de l'angle d'orientation des pales .

III.9.conclusion

Ce chapitre focalisé sur les architectures et les méthodes de recherche du point maximal de puissance nous avons travaillé dans les deux zones (zone 2 et zone 3) c'est à-dire nous avons appliqué la technique d'extraction de la puissance maximale MPPT type avec asservissement de la vitesse pour la deuxième zone. Ainsi nous avons appliqué le système d'orientation des pales pour limiter la puissance générée au niveau du stator de la MADA. Ainsi, nous avons constaté que la MADA est capable d'assurer, par son fonctionnement à vitesse variable, un rendement maximum de puissance. Ceci a été observé à travers l'évolution du coefficient de puissance en fonction du temps et la caractéristique de puissance-vitesse rotation.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne de petite puissance. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre l'objectif d'assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne. A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables en utilisant d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseaux de neurones.

Annexe

Annexe(A)

1.machine à induction double alimentée :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.7614 (Ω)
Inductance mutuelle	0.107 (H)
Inductance statorique	0.12 (H)
Inductance rotorique	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220V
Fréquence du réseau	50 Hz

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	3 m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0,5 Kg.m ²
Coefficient de frottement	0.0024N.m.s/rad

Paramètres du redresseur :

$r=0.3\Omega$, $l=14e-3$ H , $c=2e-3$ F.

Annexe(B)

Calcul des paramètres du régulateur PI

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (B.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

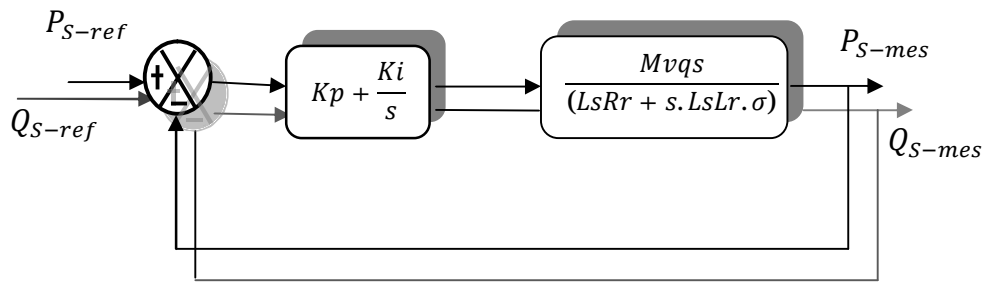


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

$$\text{Avec} \quad \sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (B.1) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mvqs}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction F_{BO} suivante :

$$F_{BO} = \frac{K_P M v_{qs}}{L_S L_r \sigma \cdot s}$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_S L_r \sigma}{K_P M v_{qs}}$$

test le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_P = \frac{L_S L_r \sigma}{\tau M v_{qs}}$$

$$K_i = \frac{R_r L_S}{\tau M v_{qs}}$$

On applique la même méthode sur :

Ä Boucle des courants

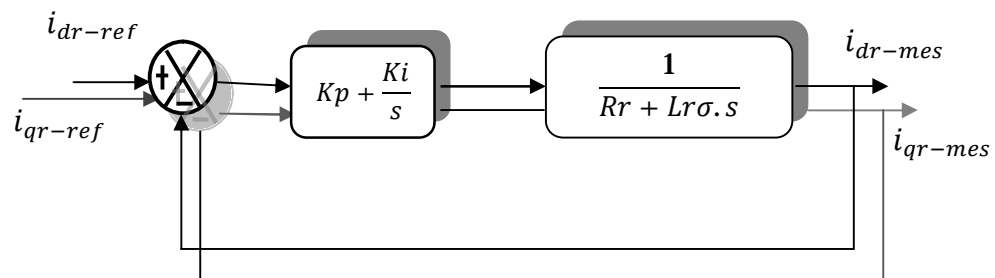


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique .

Ä Boucle de vitesse

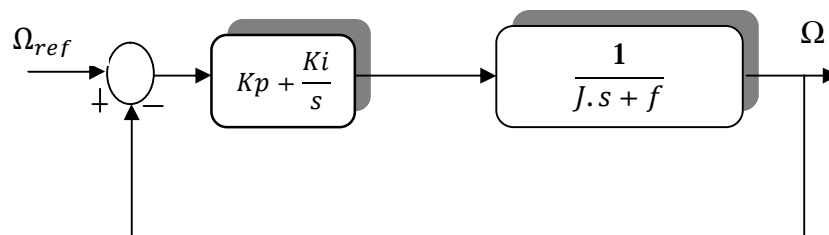


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

- Paramètres du régulateurs PI classique :

<i>Régulateurs des puissances</i>	<i>Régulateurs des courants</i>
$K_p=710.64$	$K_p=200$
$K_i=8894.5$	$K_i=50$

- [01].S. EL AIMANI, " Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", mémoire de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [02].N.Cherfia, "conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", mémoire de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [03]. J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [04].Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, StéphanAstier, BrayimaDakyo, CristianNichita.État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [05].S.Metatla, " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada", mémoire de Magister,Ecole nationale polytechnique d'alger 2009
- [06]N. laverdure, «intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». mémoire doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [07].N.abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation». mémoire de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [08] .I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [09]. L.khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [10].F.poitier, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", mémoire de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003
- [11].S.Drid, "Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation:"
-

théorie et expérimentation, ” mémoire de doctorat en électrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.

[12].Y.Elbia,"Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," mémoire de magister de l'université de Batna, 2009.

[13].Paul-Etienne V.,“ Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation,” mémoire de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[14].A.Boyette., “Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” mémoire de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.

[15].B.toual"Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à DoubleAlimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable" mémoire de magister de l'Université de Batna ,2010.

[16].F.merrahi,"Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)" mémoire de magister de l'Ecole Nationale polytechnique,2007

[17].B.Beltran,"contribution à la commande robuste des éolienne à base de génératrice Asynchrone Double alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode glissant D'ordre supérieur " mémoire de Doctorat Université de bretagne Occidentale,2010

[18].A.S.Belfodhal,"modélisation et commande d'une chaîne éolienne avec intégration des stockage Inertiel ",mémoire de magister ,Ecole militaire polytechnique

[19].M.Bouaraki "Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable :Application sur un site à TINDOUF",mémoire de magister de l'université M'hamedbougara,boumardas,2011

- [20].L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005
- [21].CHERIF , "Modélisation de Générateur Asynchronea Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", mémoire de licence, Université d'EL-Oued, 2012
- [22].A.bouhedda, "contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "mémoire de magister d'université Mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2011
- [23].F.Merrahi , "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ", mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007
- [24].A.GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", mémoire de doctorat de l'Ecole Henri Poincaré , 2010
- [25].A.BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", mémoire de magister , universite de constantine, 2009
- [26].Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani ‘ ‘ Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer’ ’ World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug2011, Vol. 80, pp 920.
-