

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master
En Electrotechnique
Option : les énergies renouvelables

Application d'une commande non linéaire dans une chaine de conversion éolienne

Présenté par :

M^r : Riad BERKANE

M^r : Mabrouk ZAIDI

Encadrée par :

M^r : S. TARAFT

Soutenu devant le jury composé de :

M^r : H. Bekka

M^r : B. Fella

2015/2016

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

On tient à remercier vivement notre promoteur monsieur « S. TARAFI » pour ces conseils et critiques, mais aussi ces encouragements, qui ont été une aide précieuse pour nous, ainsi que pour ça disponibilité pour mener ce travail à terme.

On tient à remercier Monsieur « H. BEKKA » et « B. FELLA » qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A la lumière de ma vie, ma raison d'être : ma très chère mère qui m'a toujours encouragé, c'est grâce à elle que je suis aujourd'hui au stade final de mes études. Dieu la garde pour moi ;

A la mémoire de mon père que dieu puisse le garder dans ses vastes Paradies ;

A mes très chers frères ;

A mes sœurs ;

A tous mes amis ;

A mon collègue mabrouk et toute sa famille ;

A tous ceux qui me sont chères ;

A toute la promotion d'énergie renouvelable 2016.

RIAD

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toute la période consacré à la réalisation de ce travail.

J'aimerais à présent remercier mes proches et en premier lieu mon père et ma mère, ma grand-mère, de m'avoir soutenu et d'avoir cru en moi, et pour tout ce qu'ils ont fait. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis, qu'ils trouvent dans ce manuscrit toute ma reconnaissance, Je remercie aussi mes frères, ma sœur, mes cousins et cousines et toute la famille.

Mes remerciements vont également à tous mes amis, en particulier: RAHMONI Chrif, HOVARI Azouz, BOULAHOUAT Bouzid, KASSAT Halim et BOUZIDI Ferhat.

Mes vifs remerciements vont aussi à toute l'équipe de l'association scientifique pour la préservation de la nature « TIKINTOUCHT » ; ma deuxième famille.

Enfin, que tous ceux et celles qui m'ont aidé et soutenu durant tout mon parcours, mes enseignant surtout, trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

*Si j'ai oublié quelqu'un, je le prie de me pardonner. Il y a tant de
personne qui sont intervenues, je les remercie tous.*

À mon petit frère A/Raouf.....

Mabrouk

Liste des figures	
Liste de tableaux	
Nomenclature	

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1: Etat de l'art

I.1 Introduction.....	3
I.2 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne.....	3
I.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.2.2 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne.....	4
I.2.2.1 Avantages de l'énergie éolienne.....	4
I.2.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne.....	4
I.3 Energie éolienne en Algérie.....	4
I.3.1 Carte des vents en Algérie.....	5
I.3.2 Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie.....	6
I.3.3 Production mondiale d'électricité éolienne.....	7
I.4 Aspects constitutifs et technologiques des éoliennes.....	7
I.4.1 Différents types d'éoliennes.....	8
I.4.1.1 Turbine à axe verticale.....	8
I.4.1.2 Turbine à axe horizontale.....	9
I.4.2 Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	9
I.5 Différentes structures des machines utilisées dans les éoliennes à vitesse variable.....	10
I.5.1 Avantages des éoliennes à vitesse variable.....	11
I.5.2 Machine synchrone.....	11
I.5.3 Machine asynchrone à cage.....	12
I.5.4 Machine asynchrone à double alimentation.....	12
I.5.4.1 Intérêt de la MADA.....	13
I.5.4.2 Modes de fonctionnement de la MADA.....	14
I.5.4.2.1 fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	14
I.5.4.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	15
I.5.4.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	15
I.5.4.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	15

I.6	Différentes stratégies de commande pour la machine asynchrone.....	16
I.6.1	commande vectorielle.....	16
I.6.2	Commande directe de couple.....	16
I.7	Technique d'extraction du point maximum de puissance.....	17
I.7.1	MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne.....	18
I.7.1.1	Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....	18
I.7.1.2	Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....	19
I.8	Différentes méthodes de MPPT.....	19
I.8.1	Commande par un rapport de vitesse optimal.....	20
I.8.2	Commande en couple optimal.....	20
I.8.3	Perturbation & observation.....	20
I.8.4	Commande par logique floue.....	21
I.9	Conclusion.....	22

Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion

II.1	Introduction.....	23
II.2	Modèle de vent.....	23
II.3	Modélisation de la turbine éolienne.....	24
II.3.1	Hypothèses simplificatrice.....	24
II.3.2	Modèle de la turbine.....	25
II.3.3	Modèle du multiplicateur.....	26
II.3.4	Equation dynamique de l'arbre.....	27
II.4	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	28
II.5	Le modèle de la MADA dans le repère a, b, c.....	29
II.5.1	Equations électriques.....	30
II.5.2	Equations magnétiques.....	31
II.6	Modèle diphasé de la MADA.....	32
II.6.1	La transformation de Park.....	32
II.6.2	Application de la transformation de Park au modèle de la MADA.....	33
II.6.2.1	Les équations électriques dans le repère d q.....	33
II.6.2.2	Les équations magnétiques.....	33
II.6.2.3	Expression du couple électromagnétique.....	33
II.7	Modélisation des convertisseurs statiques.....	34
II.7.1	Modélisation de l'onduleur de tension.....	34

II.7.1.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	37
II.7.2 Modélisation du redresseur.....	39
II.8 Modélisation du bus continu.....	39
II.9 Conclusion.....	40

Chapitre 3 : Contrôle de la puissance active et réactive par des régulateurs en mode glissant

III.1 Introduction.....	41
III.2 principe de la Commande vectorielle de la MADA.....	41
III.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	42
III.4 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	44
III.5 Commande en puissance de la MADA.....	44
III.5.1 Commande par mode de glissement.....	44
III.5.2 Théorie de la commande par mode de glissement.....	45
III.5.2.1 Choix de la surface de glissement.....	46
III.5.2.2 Conditions de convergences et d'existences.....	46
III.5.2.3 Détermination de la loi de commande.....	47
III.6 Utilisation des RMG pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA..	51
III.6.1 Contrôle de la puissance active.....	51
III.6.2 Contrôle de la puissance réactive.....	51
III.7 Calcul de paramètres de régulation.....	52
III.7.1 Calcul de K_{qr}	52
III.7.2 Calcul de K_{dr}	53
III.8 Résultats et Interprétation.....	54
III.9 Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	61

Annexe A

Annexe B

Bibliographie

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure(I.1) carte annuelle des vents an Algérie à 10 m du sol.....	5
Figure(I.2) la ferme éolienne d'Adrar.....	6
Figure(I.3) Conversion de l'énergiecinétique.....	8
Figure(I.4) éoliennes à axe vertical (de gauche à droite): turbine savonuis, turbine Darrieus.....	8
Figure(I.5) Constitution d'une éolienne à axe horizontal	9
Figure(I.6) structure d'une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable	12
Figure(I.7) MAS à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.....	12
Figure(I.8) structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	13
Figure(I.9) la puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée	13
Figure(I.10) fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	14
Figure(I.11) Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	15
Figure(I.12) fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	15
Figure(I.13) carte annuelle des vents an Algérie à 10 m du sol.....	16
Figure(I.14) Caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	17
Figure (I.15) Courbe de puissance en fonction de la vitesse	21

CHAPITRE II

Figure(II.1) Schéma global du système à étudier.....	23
Figure(II.2) Schéma de la turbine éolienne.....	24
Figure(II.3) Modèle mécanique simplifié.....	25
Figure(II.4) Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de la turbine.....	26
Figure(II.5) Schéma bloc fonctionnel du modèle de turbine.....	27
Figure(II.6) Schéma bloc fonctionnel avec asservissement de la vitesse mécanique.....	28
Figure(II.7) Structure de la MADA.....	29

Figure(II.8) Représentation schématique de la MADA.....	30
Figure(II.9) Représentation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	34
Figure(II.10) Représentation d'un bras d'onduleur.....	35
Figure(II.11) principe de commande d'une MLI triangulo-sinusoidale.....	37
Figure(II.12) Redresseur MLI.....	39
Figure(II.13) Schéma du bus continu.....	40

CHAPITRE III

Figure(III.1) Orientation de l'axe d sur le flux statorique Φ_s	42
Figure(III.2) Modes de fonctionnement dans le plan de phase.....	45
Figure(III.3) Fonction de sign.....	48
Figure(III.4) Phénomène de broutement.....	49
Figure(III.5) Commande adoucie	49
Figure(III.6) commande intégrale.....	50
Figure(III.7) Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant	52
Figure (III.8) La vitesse spécifique optimale (λ_{opt}).....	54
Figure (III.9) Coefficient de puissance C_p	54
Figure (III.10) Vitesse du vent	55
Figure (III.11) Vitesse mécanique optimale.....	55
Figure (III.12) Puissance mécanique P_m	56
Figure (III.13) Glissement g	57
Figure (III.14) Puissance de réseau (Pres)	57
Figure (III.15) Puissance active statorique (Ps)	58
Figure (III.16) Puissance réactive statorique (Qs)	58
Figure (III.17) Puissance active rotorique (Pr).....	59
Figure (III.18) Puissance réactive rotorique (Qr).....	59
Figure (III.19) Tension (V_{res}) et le courant(I_{res}) de réseau	59
Figure (III.20) Tension et courant rotorique (V_{ar}, I_{ar})	60

Liste des tableaux

Tableau (I.1) Puissance éolienne installée dans le monde de 2000 à la fin de 2013 (en MW).	7
Tableau (I.2) Classification des éoliennes selon leurs puissances	9
Tableau (I.3) Tableau de la commande P&O.....	21
Tableau (II.1) Représente les expressions des tensions simples et composées.....	36

Nomenclature

C_{visq} : Couple des frottements visqueux.

C_{mec} : Couple mécanique.

Ω_{mec} :vitesse mécanique.

$\Omega_{mec-ref}$:vitesse mécanique de référence.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_{em-ref} : Couple électromagnétique de référence.

C_{arbre} : Couple de l'arbre.

J : Moment d'inertie total.

$J_{turbine}$: Moment d'inertie de la turbine.

R : Rayon des pales.

G : Gain du multiplicateur.

V : Vitesse du vent.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale.

C_{p-max} :Coefficient de puissance maximale.

S : Surface balayée par les pâles.

ρ : Masse volumique de l'air.

P_{opt} : La puissance optimale.

P_m : La puissance mécanique.

Ω_{opt} : La vitesse optimale.

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

Ω_T : Vitesse de rotation de la turbine.

R_s : Résistance d'une phase du stator.

R_r : Résistance d'une phase du rotor.

V_k : Tension aux bornes de l'enroulement k .

Φ_k : Flux d'enroulement traversant l'enroulement k .

i_k : Courant traversant l'enroulement k .

Φ_i : Flux d'enroulement traversant l'enroulement.

L_{aa} : Inductance propres d'un enroulement rotorique.

L_{AA} : Inductance propres d'un enroulement statorique.

M_{ba} : Inductance mutuelles entre deux enroulements i et j (constantes).

$m_{aA}(\theta)$: Inductance mutuelle entre deux phases i et j (variable dans le temps).

Π_{sr} : Maximum d'inductance mutuelle entre phase du stator et une phase du rotor.

Φ_{ds}, Φ_{qs} : Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q .

Φ_{dr}, Φ_{qr} : Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

ω_s : Vitesse électrique du champ tournant.

ω_r : Vitesse électrique du rotor.

l_s : Inductance propre d'une phase du stator.

l_r : Inductance propre d'une phase du rotor.

i_{ds}, i_{qs} : Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q .

i_{dr}, i_{qr} : Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

V_{ds}, V_{qs} : Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q .

V_{dr}, V_{qr} : Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

P_s : Puissance active statorique.

Q_s : Puissance réactive statorique.

P_{s-ref} : Puissance active de référence statorique.

Q_{s-ref} : Puissance réactive de référence statorique.

$S(X)$: Surface de glissement d'une variable à réguler.

$\dot{S}(X)$: Dérivé de la surface de glissement d'une variable à réguler.

$V(X)$: Fonction de Lyapunov.

U_n : Commande discontinue.

U_{eq} : Commande équivalent.

$S(P)$: Surface de glissement pour puissance active.

$S(Q)$: Surface de glissement pour puissance réactive.

P_{s-ref} : Puissance active de référence statorique.

Q_{s-ref} : Puissance réactive de référence statorique.

$e(X)$: Erreur entre la référence et la variable à réguler.

r : Degré relatif de la surface de glissement.

MPPT: Maximum Power Point tracking.

RMG : régulateur à mode glissant.

Introduction Générale

I. Introduction générale

Dans les décennies à venir, le secteur de l'énergie sera confronté à un ensemble de plus en plus complexe de défis étroitement imbriqués d'ordre économique, géopolitique, technologique et environnemental, La consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de 41% entre 2012 et 2035, très majoritairement tirée par les pays émergents, Chine et Inde en tête, tandis que les énergies fossiles demeureront dominantes [CON 16]. Face à cette citation d'augmentation de la demande énergétique et les problèmes liés au changement climatique, les experts, les organisations non gouvernementales (ONG) et la société civile à travers le monde ont fait appelle pour trouver des alternatives afin de remplacer ces énergies dites traditionnelles par des énergies plus propre dans le but de réduire les émissions des gaz à effet de serre qui représente le premier facteur de dérèglement climatique.

Face à tout ces enjeux il est nécessaire de mettre en vigueur l'investissement dans les énergies dites propre et renouvelable qui peuvent remplacer les énergies fossiles, parmi ces énergies on trouve les énergies issus directement du soleil qui sont, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, l'énergie du vent sur laquelle on va faire le point dans ce travail.

Le début de l'utilisation de l'énergie éolienne remonte à approximativement 3000 ans avant JC, dans le cadre de l'utilisation des premiers bateaux à voile. Après, les premiers moulins à vent sont inventés par les Perses vers 200 ans avant JC, cette technique n'est ensuite importée en Europe qu'au XIIIe siècle, deux siècles après les célèbres moulins hollandais voient le jour, Ces moulins sont utilisés pour faire tourner des scieries ou fabriquer de l'huile. C'est en 1891 que le Danois Paul la cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité. A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant les 1^{ère} et 2^{ème} guerres mondiales pour répondre et faire face à la pénurie d'énergie électrique. C'est en 1974 suite à la crise pétrolière les études et les expériences sur les éoliennes ont été lancées.

De nos jours, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production éolienne supérieure à 1MW. Pour une même puissance de production, celle-ci permet de réduire la puissance des convertisseurs de puissance tout en générant une puissance de sortie importante par rapport aux autres technologies des machines [BEN 12]. Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs d'électronique de puissance pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble des éoliennes sont contrôlées de manière à optimiser en

permanence la puissance produite en recherchant chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance.

La commande des systèmes en général, est un problème compliqué à cause des non linéarités, perturbation difficile à mesurer et incertitudes sur les paramètres des systèmes, les algorithmes de commandes classiques, peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et la performance du système ne sont pas trop strictes. Néanmoins pour cela, il faut concevoir des algorithmes de commandes assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations [ZOU 10].

Le réglage par mode glissant fait partie de ces méthodes de commandes robustes. Il possède des avantages incontestables pour le système mal identifié ou à paramètres variables.

Le présent mémoire sera consacré pour l'étude de la commande vectorielle en puissance par des régulateurs à mode glissant.

Un état de l'art sur l'énergie éolienne sera présenté dans le premier chapitre de ce mémoire, dont la production mondiale de l'énergie éolienne et la part de l'Algérie, la technologie éolienne, les types des éoliennes en mettant l'accent sur celle à vitesse variable, quelques structure et machines utilisée sera aussi abordé, des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre consiste en modélisation de la chaîne de conversion dont la partie mécanique, la MADA, les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur et onduleur) séparé par un bus continu. Le troisième chapitre sera consacré pour la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation, en introduisant les régulateurs mode glissant (RMG) pour contrôler ces puissances, les résultats et les interprétations de ces derniers seront exposés à la fin du chapitre.

Chapitre I
Etat de l'art

I.1 Introduction

Depuis la crise pétrolière des années 70 le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont fortement encouragés, depuis lors, la filière de l'éolienne a connue un essor considérable de fait, les turbine sont de plus en plus performante et puissante. Le rendement est la disponibilité augmente.

Par le passé, la majorité des éoliennes installées étaient à vitesse fixe. Ces éoliennes possèdent néanmoins de nombreux inconvénients : un faible rendement énergétique, dans la mesure où elles ne sont optimisées que pour un point de fonctionnement et une courte durée de vie à cause des efforts importants subis par leurs structures. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension du réseau lors des rafales de vent [BOK 06]. Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [BEN 12].

Dans ce chapitre, un aperçu sur l'énergie éolienne, ensuite le potentiel éolien en Algérie est présenté, les aspects constitutifs et technologiques des éoliennes, les différentes configurations des systèmes de conversion d'énergie éolienne, basées sur les différentes génératrices électriques les plus couramment rencontrées dans la littérature, suivie par un aperçu sur les techniques de commande, de régulation et d'optimisation de puissance sont d'écrites.

I.2 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne

I.2.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Eole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents [CON 16].L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire: les rayons solaires absorbés dans

l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique [CON16].

I.2.2 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.2.2.1 Avantages de l'énergie éolienne

- ✓ C'est une énergie renouvelable c'est -à-dire contrairement aux énergies fossiles et fissiles elle est inépuisable et abondante.
- ✓ C'est une énergie propre non polluante qui respecte l'environnement.
- ✓ C'est une énergie décentralisée plus proche des consommateurs.
- ✓ La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande de l'énergie est plus forte.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces.
- ✓ Très grande durée de vie des installations éoliennes.

I.2.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

- ✓ L'impact visuel qui est caractérisé par l'effet de l'ombre causé par le mouvement de réflexion intermittent des pales.
- ✓ Le caractère stochastique du vent qui induit une puissance électrique très fluctuante.
- ✓ L'impact sur les oiseaux.
- ✓ Nécessite par fois d'un système de stockage surtout pour l'éolienne autonome.

I.3 Energie éolienne en Algérie

Selon quelques évaluations plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité dont beaucoup de communautés rurales ont besoin de l'eau potable et pour l'irrigation en sachant que le besoin et la demande augmentent de jour en jour et ce représente un marché potentiel pour les technologies des énergies renouvelables.

I.3.1 Carte des vents en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les importantes avant l'implantation d'un parc éolien. Pour cela il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas de la région. En 2000, la carte des vents à été tracée par Kasbadji-marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hammouch. La carte à été réajustée par le même auteur en 2000 avec laquelle Kasbadji-Merzouk a présenté sa thèse de doctorat. En 2011 Chellali et al. ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays, le travail le plus récent pour l'établissement des cartes des vents en Algérie est celui de S. Boudia dans sa thèse doctorat en 2013. La carte des vents de L'Algérie, estimée à 10 m du sol est présenté dans la figure (I.1) [CDE 15].

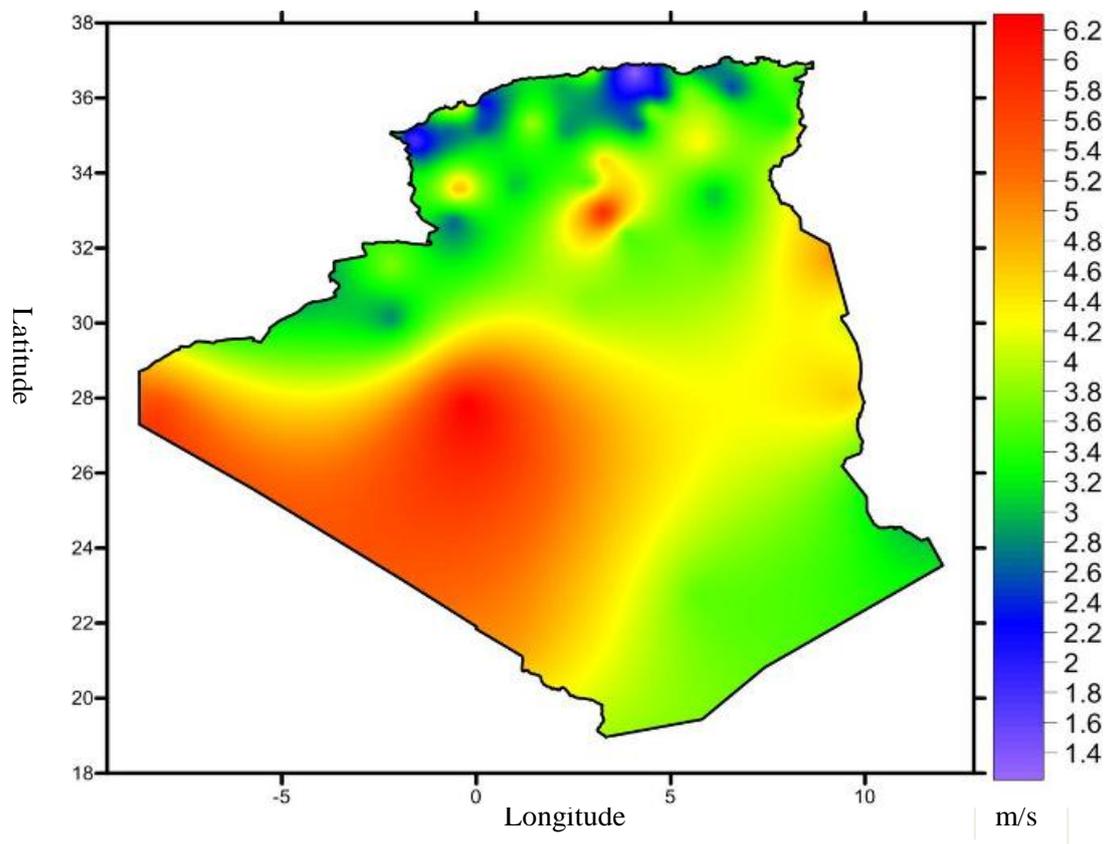


Figure (I.1) carte annuelle des vents en Algérie à 10 m du sol

Selon la cartographie représentée à la figure (I.1), le gisement éolien en Algérie est très diversifié, mais le meilleur potentiel d'énergie est dans le sud du pays particulièrement au sud ouest où la vitesse du vent est supérieure de 6m/s

I.3.2 Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie

En Algérie, La première éolienne a été installée en Algérie revient à la période de la colonisation française, un éolienne destinée au pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [CDE 11], Actuellement elle existe à l'intérieur de la station de l'institut National de recherche Agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m

La première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut acheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [CDE 11].

Tandis que l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie demeure médiocre mais le programme du développement de ces énergies reste ambitieux, après l'inauguration du premier parc éolien à Adrar l'an 2014 avec une puissance de 10 MW qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024, constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune (pour une capacité globale de 10 MW [MAG14].



Figure (I.2) la ferme éolienne d'Adrar

Le programme national de développement des énergies renouvelables dans sa version actualisée par les services du ministère de l'énergie vient d'être adopté par le gouvernement. En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue

un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles et la valeur de ces dernières dans le marché internationale, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable, en sachant que l'éolien représente le deuxième axe de développement avec une part de 3% de la production d'électricité en 2030[CDE 15].

I.3.3 Production mondiale d'électricité éolienne

En cinq ans, la puissance éolienne installée a été multipliée par trois dans le monde, passant de 121 GW à 319 GW. La capacité éolienne a augmenté de 197 GW de 2008 à 2013. Les pays dominants en production éolienne dans le monde ont été le Danemark, l'Allemagne et l'Espagne. Récemment, la Chine et les États-Unis sont devenus les pays disposant la plus grande puissance éolienne avec le Danemark.

Tableau(I.1) Puissance éolienne installée dans le monde de 2000 à la fin de 2013 (en MW)[ENR 15]

	EU 27	États-Unis	Canada	Chine	Inde	Japon	Monde
2000	12950	2500	150	314	1200	150	17700
2003	28700	6400	320	640	2100	570	39400
2008	65170	25240	2360	12100	9600	1880	121000
2009	75100	35100	3300	25800	10900	2100	158900
2010	84950	40290	4000	44500	13060		197700
2011	94040	46920	5260	62360	16080	2540	237800
2012	106800	60010	6200	75300	18400	2610	283400
2013	117700	61100	7800	91400	20150	2660	318600

I.4 Aspects constitutifs et technologiques des éoliennes

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [BEN 12] figure (I.3)

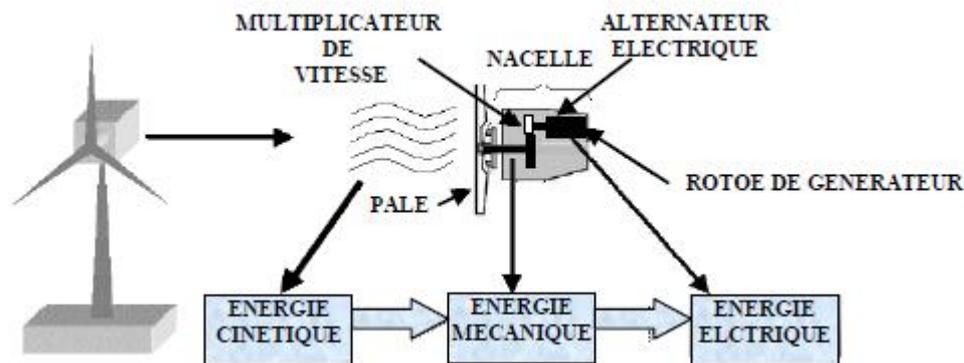


Figure (I.3): Conversion de l'énergie cinétique

I.4.1 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes sont souvent classées selon leur disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines :

- ✓ Turbines à axe horizontal ;
- ✓ Turbines à axe vertical.

I.4.1.1 Turbine à axe verticale

Les éoliennes à axe verticale ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de savonius, le rotor de Darrieus classique et Darrieus en forme H. (figure I.4). Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement. En ce qui concerne leur implantations, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur des grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole [BOU 11].



Figure (I.4) éoliennes à axe vertical (de gauche à droite) : turbine savonius, turbine Darrieus

I.4.1.2 Turbine à axe horizontale

Les turbine à axe horizontale (figure I.5) sont les plus utilisé actuellement par rapport à ceux à axe verticale car elles représentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [AMI 08]. Elles sont constituées d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le cout, le coefficient de puissance et la vitesse de rotation du capteur éolien, dans la littérature, les principale éolienne étudiées sont tripales [TAM 15].

Les éoliennes peuvent être classées selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau (I.2) [TAM 15].

Tableau (I.2) classification des éoliennes selon leurs puissances

Classification	Diamètre des pales	La puissance
Petite puissance	< 12 m	< 40 KW
Moyenne puissance	12 à 45 m	40 KW à 1 MW
Grande puissance	> 46 m	> 1 MW

I.4.2 Constitution d'une éolienne à axe horizontal

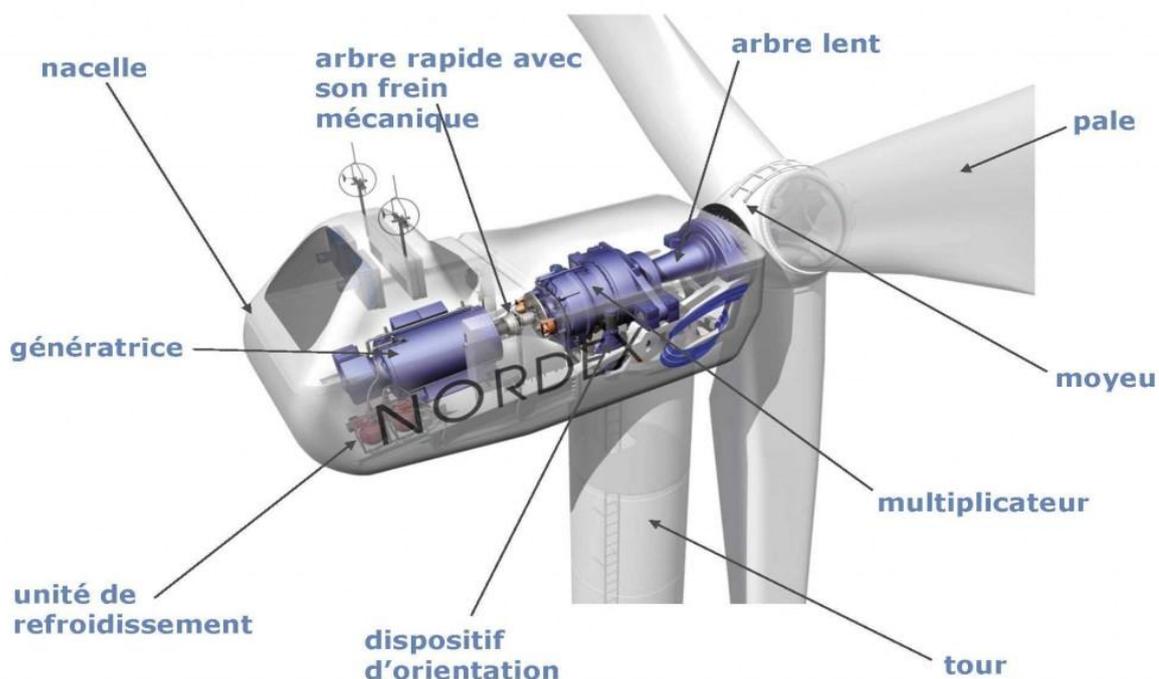


Figure (I.5) Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Il existe plusieurs configurations d'aérogénérateurs à axes horizontal qui peuvent avoir des différences importantes, néanmoins une éolienne classique est généralement constituée de trois principaux éléments :

- ❖ **Le Mât** : Classiquement, le mât est un tube en acier ou une tour en treillis qui supporte le rotor et la nacelle. Il renferme également les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition souhaitée au vent [IDJ 10]
- ❖ **La Nacelle** : regroupe tous les éléments mécanique permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique dont : arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur, frein disque, le système de refroidissement, les capteurs de la vitesse du vent, les différents systèmes de régulation de vitesse comme la régulation active par vérins hydrauliques "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limité la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale, La régulation aérodynamique passive "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Le générateur électrique est généralement une machine synchrone ou asynchrone.
- ❖ **Le Rotor** est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût et le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [TAM 15].

I.5 Différentes structures des machines utilisées dans les éoliennes à vitesse variable

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de famille d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [DAV 07]. Et pour notre étude de recherche menée dans ce mémoire, la MADA est le type de machine que nous avons choisis.

I.5.1 Avantages des éoliennes à vitesse variable

On entend par la vitesse variable le fait que la vitesse de rotation du rotor peut être variable en fonction de vitesse du vent, inversement à une éolienne à vitesse constante la vitesse de rotation de rotor demeure constante quelque soit la vitesse du vent, dans ce qui suit les avantages des éolienne à vitesse variable comparant à ceux à vitesse fixe :

- ✓ Ce type offre la possibilité de réglage de la puissance générée
- ✓ Elle nécessite un système d'orientation des pales simple
- ✓ Elles réduisent les efforts mécaniques, de fait le taux de vieillissement des éléments.
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité [TAM 15].

Globalement les éoliennes fonctionnant à vitesse variable permettent une meilleure exploitation de la puissance de la puissance du vent et une bonne adaptation au réseau électrique, Dans ce qui suit, nous exposons brièvement les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

I.5.2 Machine synchrone

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables [MIR 05]. Les éoliennes baées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au travers de l'onduleur souvent à MLI [ABD 07].

La configuration (figure I.6) qui permet de coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux ondulateurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau. Dans ce cas, l'interface avec le réseau peut être entièrement contrôlée via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [MSB 14].

Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette structure.

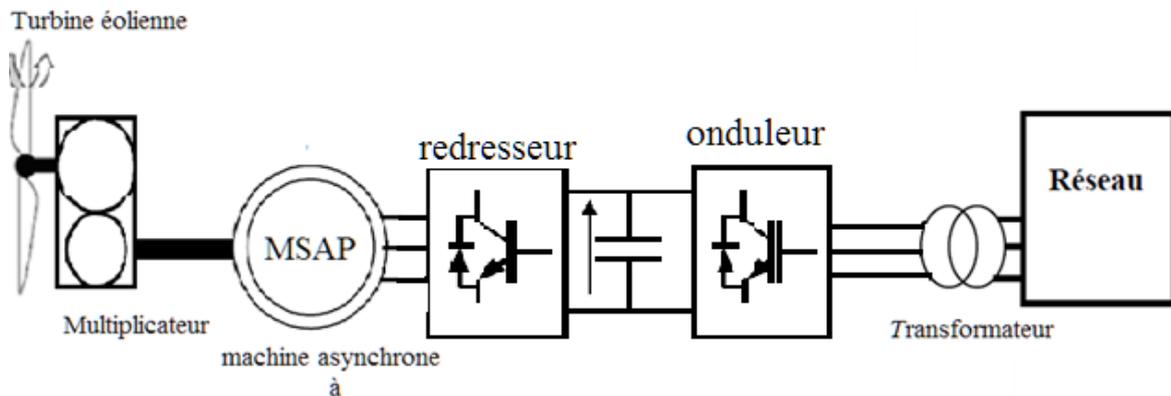


Figure (I.6) structure d'une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable

I.5.3 Machine asynchrone à cage

Les machine asynchrone sont les plus simple à fabriquer et moins couteuse elles ont l'avantage d'être standardisées, et fabriquer en grande quantités et dans une grande échelle de puissance. Elles sont aussi moins exigeantes en termes d'entretien, une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur de vitesse est associé à la machine et une batterie de condensateurs qui assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecteur est sa simplicité et son faible cout [TAM 15].

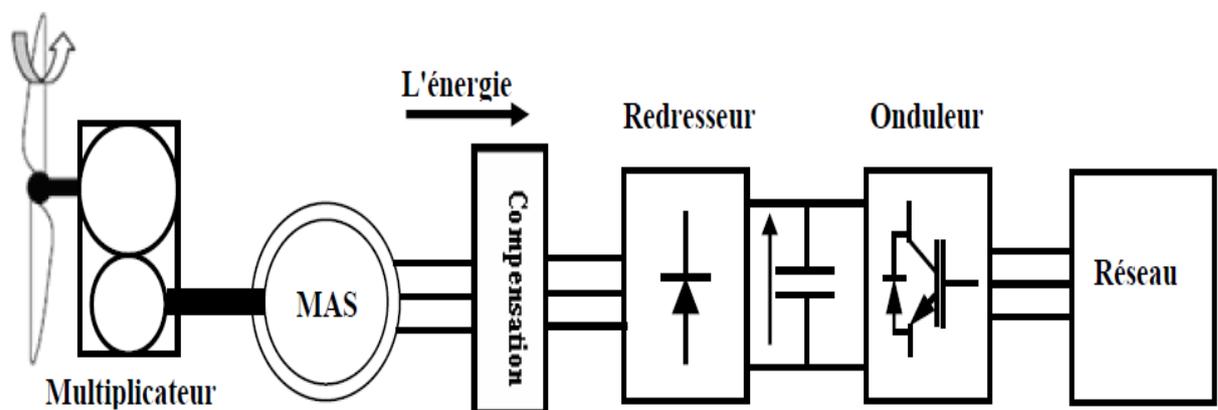


Figure (I.7) MAS à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

I.5.4 Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation MADA avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants

intégrée dans un système éolien, généralement le stator de la machine est connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon les différents systèmes et convertisseurs utilisés.

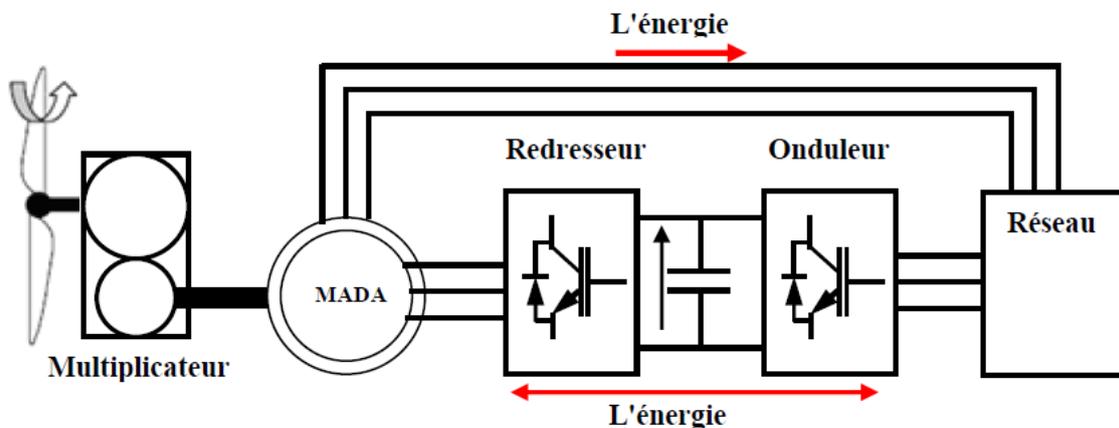


Figure (I.8) structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

La présence de système à bagues et balais diminue légèrement la robustesse de ce type de machines, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage [TAM 15].

I.5.4.1 Intérêt de la MADA

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne, pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation de la turbine qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance (caractéristique figure (I.9)), permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement aérodynamique possible [TAR 08].

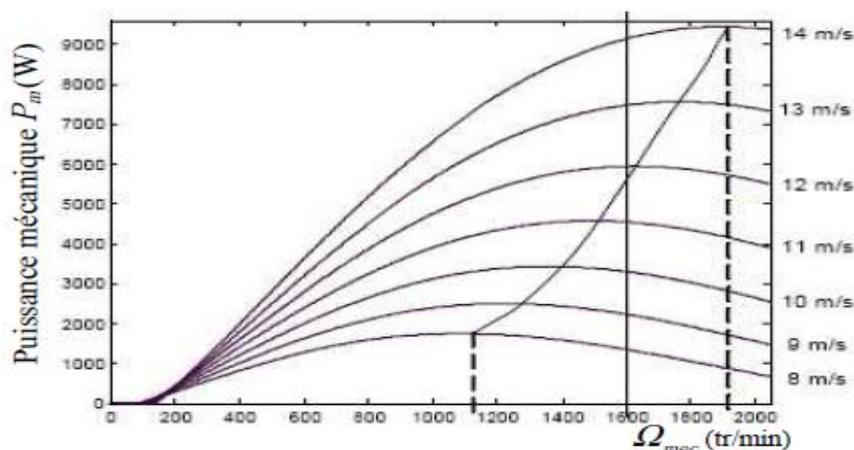


Figure (I.9) la Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

Pour pouvoir tourner à une vitesse optimale, à vitesse du vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissances active et réactive que la machine peut être alors commandée. Le modèle de la turbine associé au modèle de la MADA nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale [TAR 08].

I.5.4.2 Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la grande différence réside dans, le mode de fonctionnement de cette machine n'est pas imposé par sa vitesse de rotation, tandis que une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en mode générateur [TAM 15].

L'accessibilité au rotor dans la MADA offre la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur et ce par la commande des tensions rotoriques en gérant le champ magnétique à l'intérieur de la machine, nous allons présenter successivement les modes de fonctionnement [BEN 12].

I.5.4.2.1 fonctionnement en mode hypo-synchrone

La figure (I.10) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecter au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. Ce mode connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor

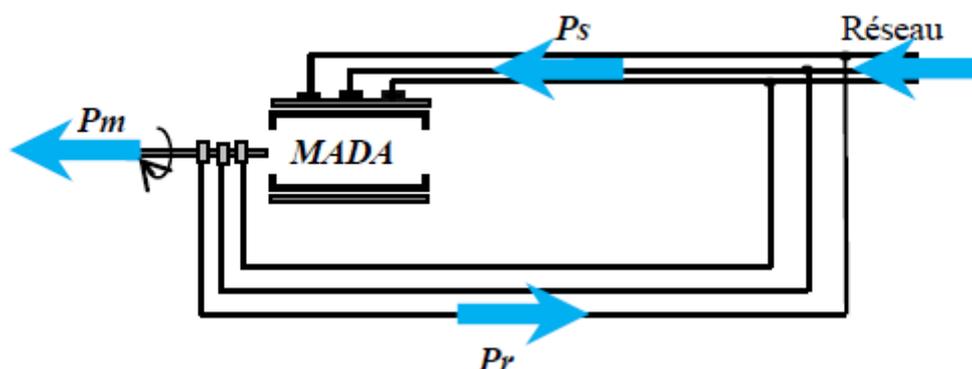


Figure (I.10) fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

I.5.4.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

La figure (I.11) montre que la puissance est fournie par le réseau ou stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, le fonctionnement est en moteur au dessus de la vitesse de synchronisme.

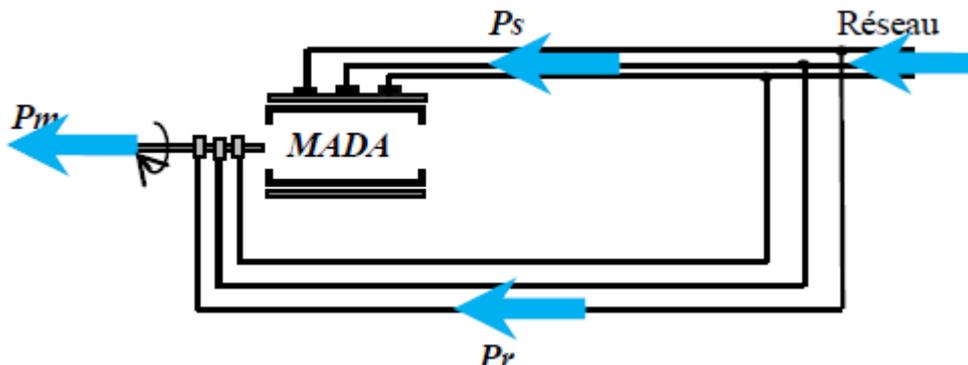


Figure (I.11) Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

I.5.4.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

La figure (I.12) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le fonctionnement est donc en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

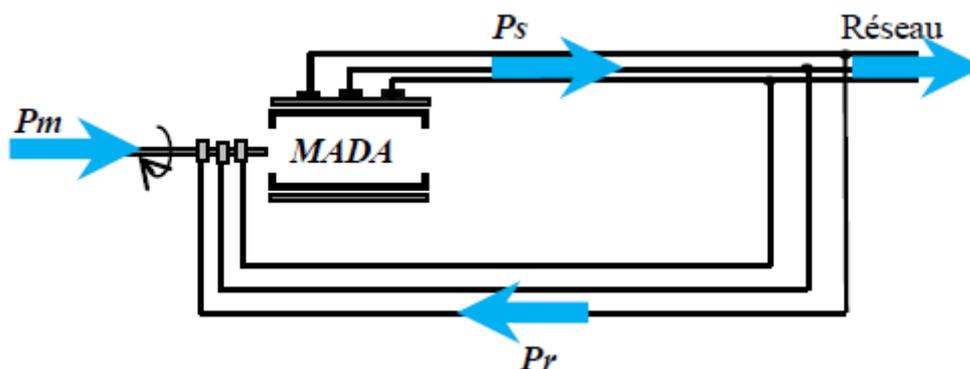


Figure (I.12) fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

I.5.4.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

La figure (I.13) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse du synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor

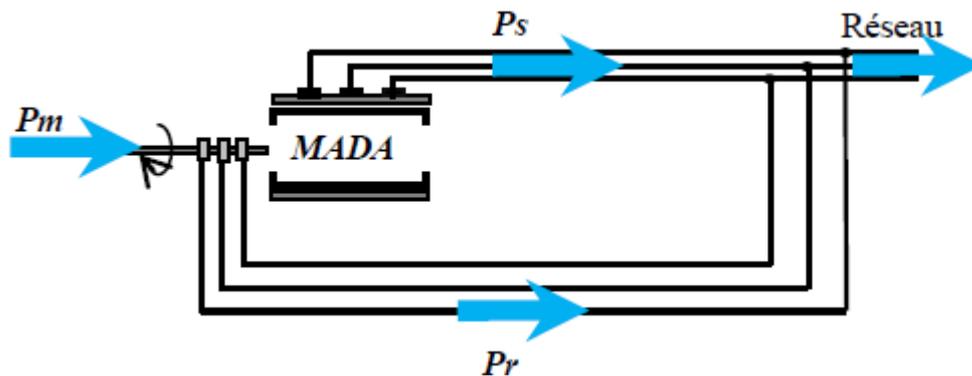


Figure (I.13) fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

I.6 Différentes stratégies de commande pour la machine asynchrone

I.6.1 commande vectorielle

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, les dynamiques du flux rotorique sont linéaires d'où l'utilisation d'un simple PI pour réguler le flux. Quand les dynamiques du flux rotorique ont atteint une consigne constante, la dynamique de la vitesse devient linéaire et peut être régulée par un PI classique.

La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. De nombreuses variantes basées sur ce principe d'orientation.

Généralement ces techniques se différencient selon :

- ✓ la source d'énergie : commande en tension ou en courant,
- ✓ l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statorique ou rotorique ou d'entrefer, le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation [TOU 15].

I.6.2 Commande directe de couple

La commande directe du couple (DTC) est relativement récente (fin des années 1980), elle peut contrôler directement le flux et le couple de la machine asynchrone à condition qu'elle ait ses estimations. Elle a été inventée pour simplifier la commande vectorielle, l'algorithme qu'elle utilise dépend de moins de paramètres. Elle est créée à partir de comparateurs hystérésis qui comparent les valeurs de références aux valeurs estimées. Cette commande n'effectue pas de calcul de changement de repère, elle possède moins de correcteurs PI. La réponse est donc plus rapide que celle de la commande vectorielle à flux

orienté. Afin d'utiliser cette commande pour la MADA, il faut changer de référentiel pour calculer et/ou estimer les variables à contrôler [DEF 12].

I.7 Technique d'extraction du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance mécanique (P_m) en fonction de la vitesse de rotation d'une éolienne est en forme de cloche Figure (I.14). Pour chaque vitesse du vent, La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p ; Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. En ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent. Le schéma de la figure (I-14) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale P_{opt} défini par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_{p-max}(\lambda_{opt}) \rho S V^3 \quad (I.1)$$

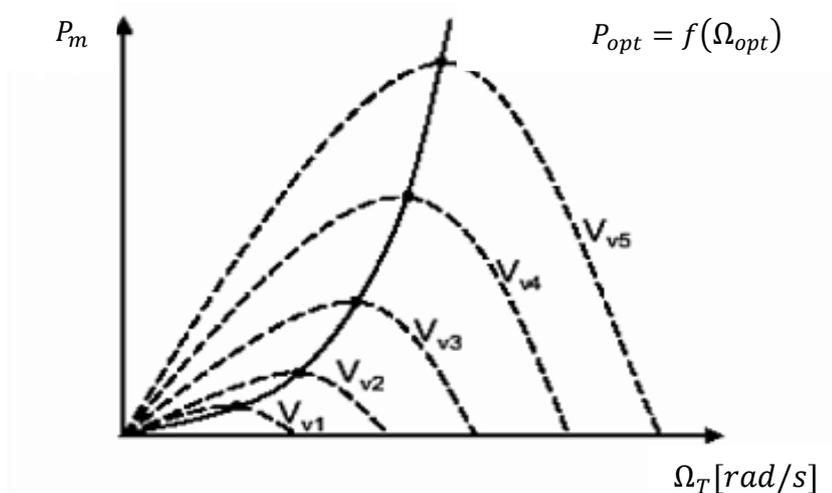


Figure I.14 Caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour se rapprocher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspond à la zone 2 doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la

vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

1. la première approche, la moins classique, ne considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue
2. La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

I.7.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (Soufflerie) ou des simulations du profil de pales. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux.

Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche:

I.7.1.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolienne, et crée des variations continues de puissance [MAY 08]. Dans le fonctionnement maximal on cherche à maintenir la valeur du coefficient de vitesse spécifique à sa valeur optimale (λ_{opt}) une boucle de régulation de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse de référence ($\Omega_{mec-ref}$) est déduite de la relation (I.2) [TAM 15].

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_{mec-ref}}{VG} \quad (I.2)$$

$$\Rightarrow \Omega_{mec-ref} = \frac{\lambda_{opt}VG}{R} \quad (I.3)$$

De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique (C_{em}) développé par la machine est égal à sa valeur de référence (C_{em-ref}) quelque soit la puissance générée

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (I.4)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique (équation (I.5)) permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique (Ω_{mec}) à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ce ci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = C_{mec} \quad (I.5)$$

$$C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \quad (I.6)$$

$$C_{visq} = f\Omega_{mec} \quad (I.7)$$

$$C_{em-ref} = C_{\Omega}(\Omega_{mec-ref} - \Omega_{mec}) \quad (I.8)$$

C_{Ω} est un correcteur PI qui vise à annuler la différence entre la vitesse Ω_{mec} et sa référence $\Omega_{mec-ref}$. La sortie de ce correcteur est le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} .

I.7.1.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent [MAY 08].

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électrique du système éolien ce qui implique :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec}=0$.
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_{visq}=0$.

I.8 Différentes méthodes de MPPT

L'utilisation des turbines éoliennes à vitesse variable permet de régler la vitesse de variation de la génératrice. Ceci s'avère très utile pour extraire le maximum de puissance dans la zone où l'algorithme MPPT est appliqué. Pour ce fonctionnement en recherche à optimiser la puissance extraite de la machine par adaptation de la vitesse de la turbine à la vitesse de vent tout en maintenant un angle de calage nul. Pour une éolienne l'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système capable d'aider la chaîne de conversion pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible. La sortie du système MPPT est une vitesse optimale variant selon la vitesse du vent capturée.

Plusieurs travaux ont abordé le problème d'optimisation de la production d'énergie éolienne, en utilisant différentes techniques MPPT. Ces derniers diffèrent selon le type d'information dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en quatre familles, selon que la vitesse de vent et les caractéristiques aérodynamiques sont nécessaires ou non à la génération de la référence [TAM 15].

I.8.1 Commande par un rapport de vitesse optimal

Ce type de commande règle la vitesse de rotation d'éolienne pour maintenir le rapport de vitesse à son optimum (λ_{opt}). La vitesse de vent et la vitesse de rotation de la turbine sont mesurées pour calculer (λ) c'est pour cette valeur optimale de ce rapport (λ_{opt}) que le coefficient de puissance est égale à sa valeur maximale C_{p-max} . le but est de rester constamment au point (λ_{opt}, C_{p-max}), il s'agit donc faire varier la vitesse de rotation de la turbine Ω_{mec} en fonction des variation dans la vitesse du vent V , mais sa forte dépendance à la vitesse du vent réside comme premier inconvénient, ça nécessite d'obtenir la valeur optimale de rapport de vitesse λ_{opt} qu'est différente d'un système à l'autre. La conséquence de cette dépendance aux caractéristiques de l'aérogénérateur et que chaque éolienne doit avoir son propre logiciel de gestion adapté [TAM.15].

I.8.2 Commande en couple optimal

Dans cette méthode, le couple de générateur est commandé à son optimum afin de d'obtenir la valeur maximale de coefficient de puissance par conséquent, un rendement énergétique maximal.

La commande de couple permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simple, ce la voudra dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent. En revanche cette commande exige la connaissance de la courbe de la puissance maximale de l'éolienne [TAM 15].

I.8.3 Perturbation & observation

Cette méthode vient de l'observation de la courbe donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, comme l'exemple donne Figure (I.14)

Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_T , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur ($dP_m / d\Omega_T$) Ce gradient vaut 0 lorsque l'on a atteint le maximum de la courbe, c'est le point que l'on recherche [LAV 05]. On le déduit à partir de l'équation (I.9).

$$\frac{dP_m}{d\Omega_{mec}} = \frac{dP_m}{dt} \cdot \left(\frac{d\Omega_T}{dt}\right)^{-1} \quad (I.9)$$

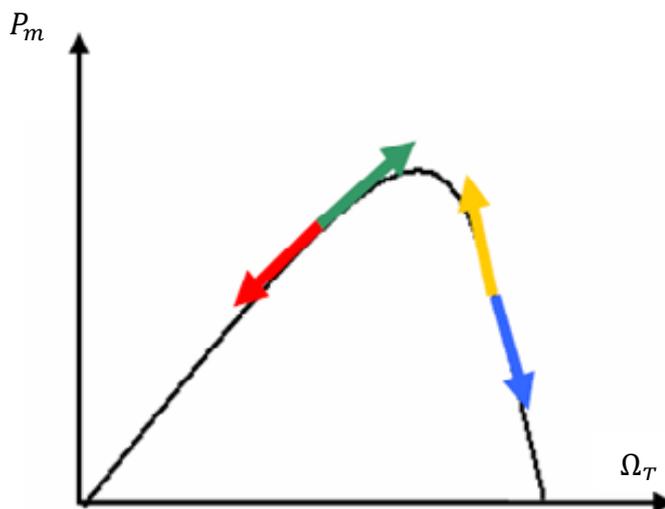


Figure (I.15)- Courbe de puissance en fonction de la vitesse

Tableau (I.3) Tableau de la commande P&O

$\frac{dp_m}{dt}$	<0	>0
<0	Augmenter Ω_T Cas 1	Diminuer Ω_T Cas 2
>0	Diminuer Ω_T Cas 3	Augmenter Ω_T Cas

La commande C à appliquer s'écrit :

$$C = \frac{d\Omega_T}{dt} \oplus \frac{p_m}{dt}$$

(I.10)

I.8.4 Commande par logique floue

La commande par logique floue est une amélioration des méthodes où l'incrément (ou le décrétement) de vitesse est constant (méthode perturbation & observation, commande en puissance). Cette méthode et contrairement à des méthodes MPPT conventionnelles, le pas de changement $\Delta\Omega_{mec}$ n'est pas constant ce pas d'échantillonnage a été choisi de façon à trouver un compromis entre la recherche rapide de l'optimum des oscillations faibles autour de cet optimum en régime établi [LAV 05].

I.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, un aperçu sur l'énergie éolienne, les aspects constitutifs et technologiques des éoliennes, les différentes configurations des systèmes de conversion d'énergie éolienne, basées sur les différentes génératrices électriques les plus couramment rencontrées dans la littérature, suivie par un aperçu sur les techniques de commande et d'optimisation de puissance sont d'écrites, Afin d'arriver à une meilleure compréhension.

Dans ce qui suit nous allons étudier le générateur le plus utilisé dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, qu'est la génératrice asynchrone à double alimentation, le prochain chapitre sera consacré pour l'étude et la modélisation des éléments de la chaîne de conversion globale.

Chapitre II

*Modélisation de la chaîne
de conversion*

II.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet d’abord de comprendre le comportement dynamique et l’interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, ce que nous permet d’atteindre les objectifs que nous avons tracés.

Dans ce chapitre, on s’intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne, en sachant qu’on utilise un algorithme de commande afin d’optimiser la puissance récupérée, ensuite on passe à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation que nous avons choisie, le choix a été justifié dans le premier chapitre. Nous verrons ensuite la modélisation de convertisseurs statiques, le schéma global du système est représenté dans la figure (II.1).

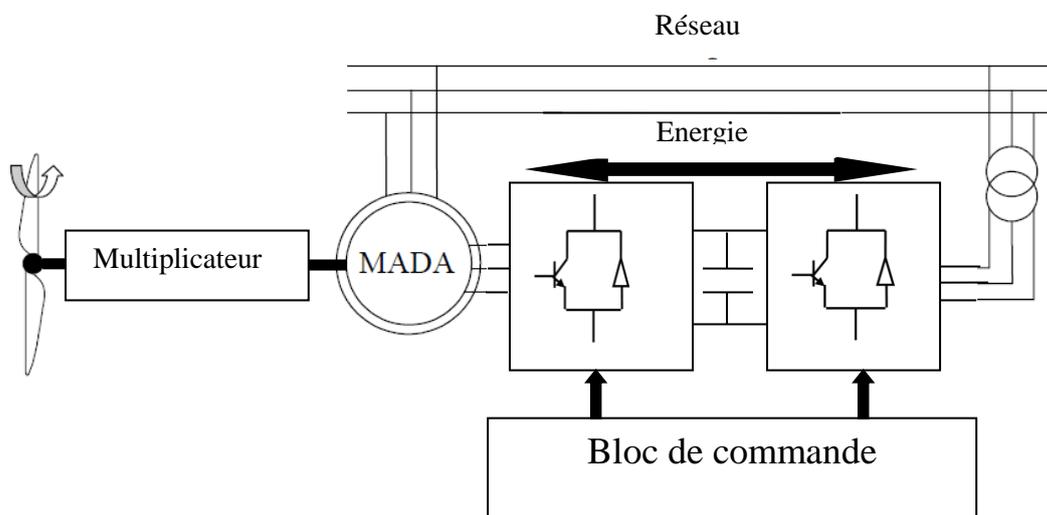


Figure (II.1) schéma du système à étudier

II.2 Modèle de vent

Le vent est la raison d’être des aérogénérateurs. L’énergie cinétique continue dans le vent est transformée en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. La mesure exacte du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L’un des principes retenus consiste à générer l’allure temporelle du vent à partir d’un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [CAM03].

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne représente la première interface de la chaîne éolienne, elle assure la conversion d'une partie de l'énergie aérodynamique véhiculée par le vent en énergie mécanique. Il est très utile de modéliser ses différentes parties qui rendent possible cette conversion.

Nous nous intéressons dans cette partie à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal, qu'est actuellement la plus répandue pour la production électrique de grande et de moyenne puissance.

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_T , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une MADA.

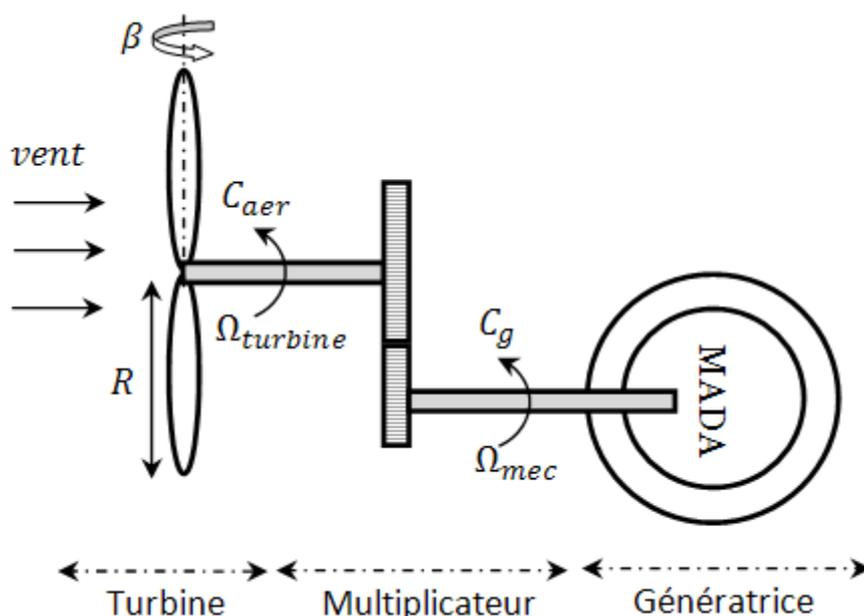


Figure (II.2) Schéma de la turbine éolienne

Nous adoptons les hypothèses suivantes

- ✓ Les pales sont considérées de conception identique.
- ✓ La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales ce qui implique une égalité de toutes les forces de poussée, alors nous pouvons considérer l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.

- ✓ le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré et ce par rapport à leurs conception aérodynamique.
- ✓ La vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

En tenant compte de ces hypothèses, nous obtenons un modèle mécanique comportant deux masses comme est représenté sur la (figure II.3) [ELA 04].

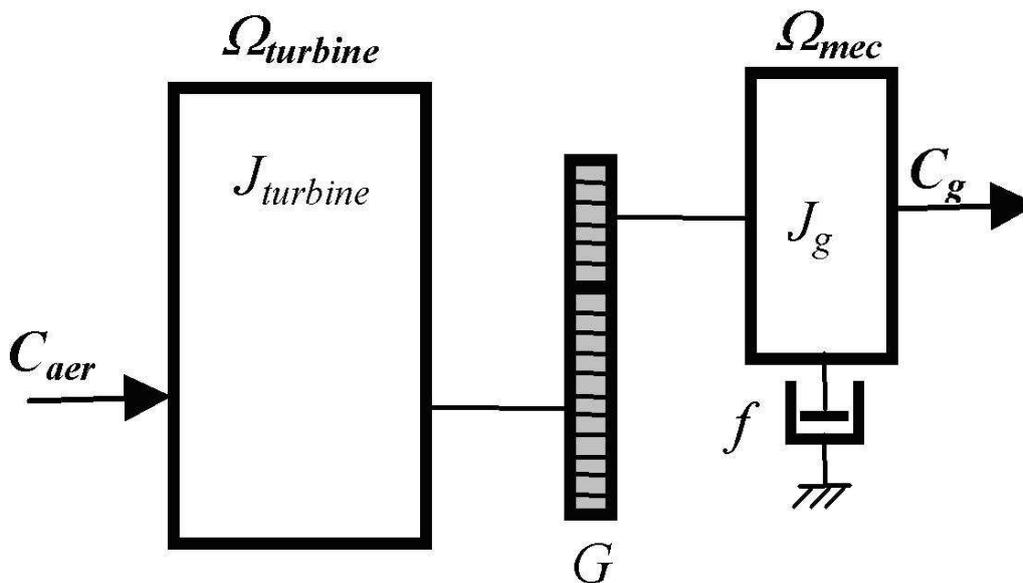


Figure (II.3) Modèle mécanique simplifié

II.3.2 Modèle de la turbine

L'aéro-turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, le multiplicateur de vitesse de gain G permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation, et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance du vent captée par les pales est définie par l'équation suivante.

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \tag{II.1}$$

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, dans le cas où l'angle de calage des Pales $\beta = 0$, les deux puissances sont liées par l'expression suivante :

$$P_{aer} = C_p(\lambda) P_{vent} \tag{II.2}$$

Le coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon et de leur vitesse de rotation. Pour les éoliennes actuelles, on atteint des valeurs de 0,45 à 0,5. La (figure II.4) représente la variation de C_p en fonction du rapport de vitesse(λ) pour un angle de calage des pales nul.

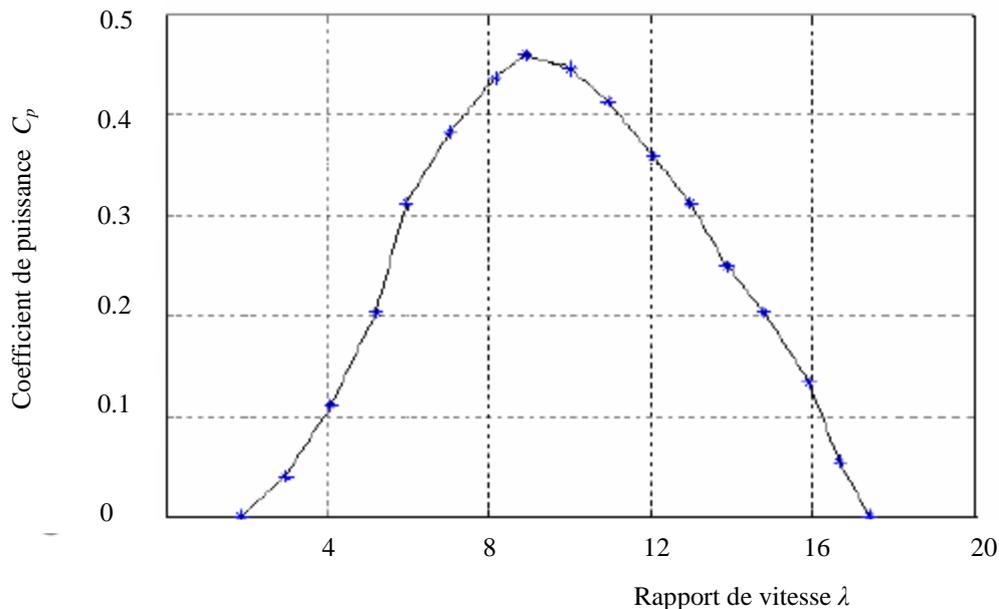


Figure (II.4) Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de la turbine

Le rapport de vitesse(λ) est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_T}{V} \tag{II.3}$$

Où Ω_T est la vitesse angulaire de la turbine et R le rayon des pales.

Le couple aérodynamique est déterminé par la relation suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_T} = C_p(\lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{1}{\Omega_T} \tag{II.4}$$

II.3.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain de vitesse G .

Par le principe de conservation de la puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse on a :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.5}$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_T \tag{II.6}$$

II.3.4 Equation dynamique de l'arbre

Par le principe de conservation de l'énergie cinétique de rotation échangée via le multiplicateur de vitesse, entre le rotor de la turbine et le rotor de la génératrice, l'inertie totale peut s'écrire sous la forme :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.7}$$

L'inertie de l'arbre de la génératrice est négligée devant l'inertie de la turbine ramenée à son axe de rotation. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique de la génératrice à partir du couple appliqué au rotor.

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.8}$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple du frottement visqueux C_{visq} et le couple moteur issu du multiplicateur C_{arbre}

$$C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \tag{II.9}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux $C_{visq} = f\Omega_{mec}$

Avec f représente le coefficient de frottement visqueux.

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine (Figure II.5).

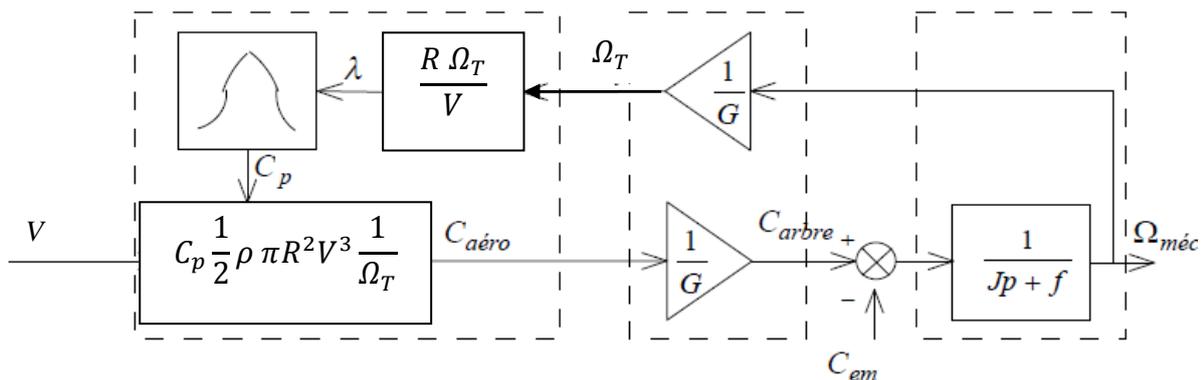


Figure (II.5) Schéma bloc fonctionnel du modèle de turbine

Le schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. Le couple sur l'axe rapide est considéré comme étant une perturbation.

La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT). Dans notre étude on a utilisé la méthode P&O décrite dans le paragraphe (I.8.3).

La vitesse issue du programme sera utilisée comme une grandeur de référence, pour que la vitesse sur l'axe rapide Ω_{mec} suit la grandeur de référence, on utilise un correcteur de vitesse C_Ω de type proportionnel intégral (PI) à avance de phase avec anticipation, le calcul des paramètres du correcteur est donné en Annexe A.

La régulation de vitesse est pour le but d'avoir le couple électromagnétique de référence, ce qui nous permet le pilotage de la turbine par ce couple. Le principe est représenté dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine avec asservissement de vitesse (figure II.6).

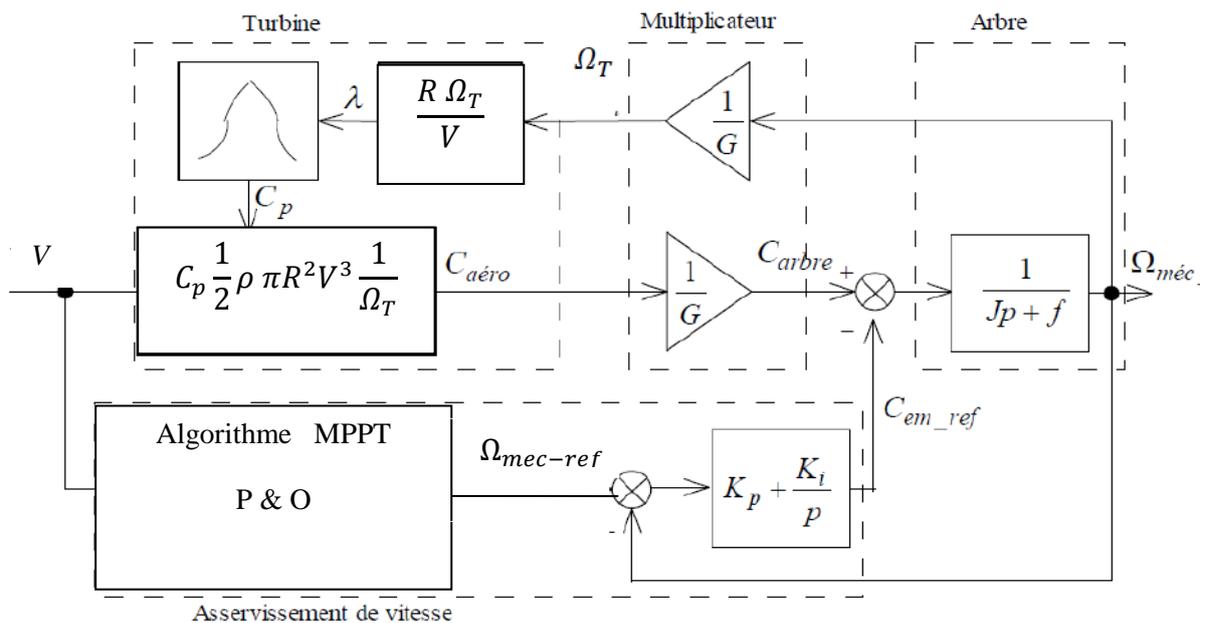


Figure (II.6) Schéma bloc fonctionnel avec asservissement de la vitesse mécanique

II.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, stator et rotor (Figure II.7). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des

balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre

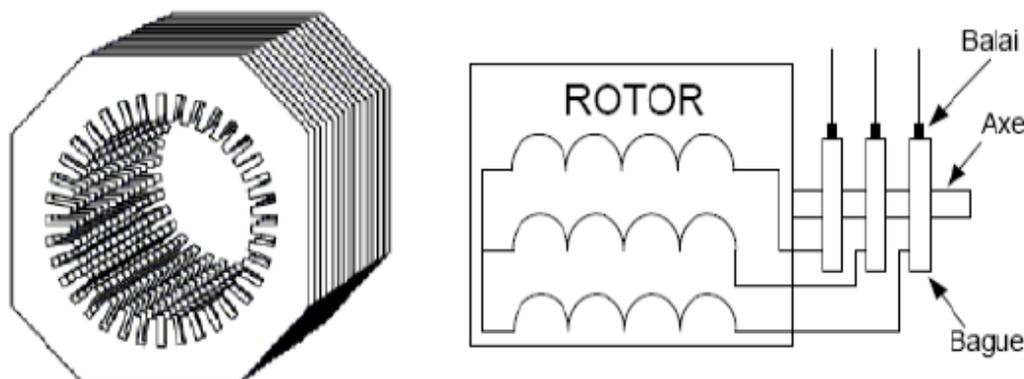


Figure (II.7) Structure de la MADA

Hypothèses simplificatrices

La complexité de la machine électrique se manifestant dans la diversité des phénomènes physiques qu'elle contient nous impose d'assumer quelques hypothèses acceptables afin d'obtenir un modèle mathématique simplifié.

- ✓ Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases statoriques et rotoriques des deux armatures sont à répartition sinusoïdale.
- ✓ les pertes par courant de foucault et par hystérésis sont négligées.
- ✓ Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- ✓ L'entrefer est constant.
- ✓ Les résistances ne varient pas avec la température.
- ✓ L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte [TAR 08].

II.5 Le modèle de la MADA dans le repère a, b, c

La figure (II.8) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle $P=1$. Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de $120/P$.

Dans notre étude les trois enroulements de phases du stator sont notés A, B et C décalés l'un par rapport à l'autre de $(2\pi/3)$, les trois enroulements du rotor sont notés a, b et c.

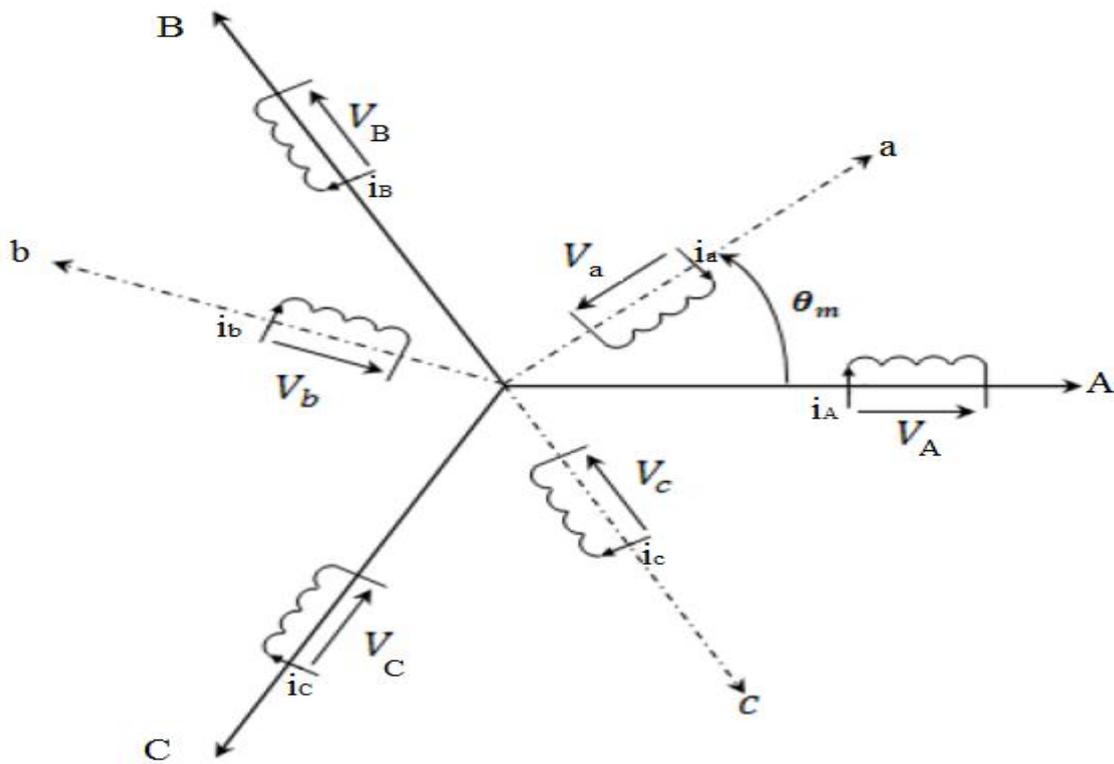


Figure (II.8) Représentation schématique de la MADA

II.5.1 Equations électriques

L'application de la loi d'Ohm généralisée aux bornes des enroulements du stator et du rotor permet d'obtenir les équations de tensions (II.11) pour le stator et (II.12) pour le rotor.

- Au stator

$$\begin{cases} v_A = R_s i_A + \frac{d\phi_A}{dt} \\ v_B = R_s i_B + \frac{d\phi_B}{dt} \\ v_C = R_s i_C + \frac{d\phi_C}{dt} \end{cases} \quad (II.11)$$

- Au rotor

$$\begin{cases} v_a = R_r i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_b = R_r i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_c = R_r i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (II.12)$$

II.5.2 Equations magnétiques

- Le flux au stator

$$\begin{pmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \\ \Phi_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & m_{Aa}(\theta) & m_{Ab}(\theta) & M_{Ac}(\theta) \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & m_{Ba}(\theta) & m_{Bb}(\theta) & M_{Bc}(\theta) \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & m_{Ca}(\theta) & m_{Cb}(\theta) & m_{Cc}(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

- Le flux au rotor

$$\begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & m_{aA}(\theta) & m_{aB}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & m_{bA}(\theta) & m_{bB}(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & m_{cA}(\theta) & m_{cB}(\theta) & m_{cc}(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$m_{ij} = m_{ji}$$

Les inductances propres d'une phase du stator $L_{AA}=L_{BB} = L_{CC} = L_{SS}$

Les inductances mutuelles entre deux phases du stator $M_{AB} = M_{BA} = M_{Ac} = M_{CA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{BC} = M_{SS}$

Les inductances propres d'une phase du rotor $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{rr}$

Les inductances mutuelles entre deux phases du rotor $M_{ab} = M_{ba} = M_{ac} = M_{ca} = M_{bc} = M_{cb} = M_{bc} = M_{rr}$

- Les inductances mutuelles entre phase du stator/ rotor

$$\begin{cases} m_{Aa}(\theta) = m_{aA}(\theta) = \Pi_{sr} \cos(\theta) \\ m_{Ab}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{Ac}(\theta) = m_{cA}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{cases} m_{Ba}(\theta) = m_{aB}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{Bb}(\theta) = \Pi_{sr} \cos(\theta) \\ m_{Bc}(\theta) = m_{cB}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

$$\begin{cases} m_{Ca}(\theta) = m_{aC}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{Cb}(\theta) = \Pi_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{Cc}(\theta) = m_{cC}(\theta) = \Pi_{sr} \cos(\theta) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

On pose $[L_{SS}]$, $[L_{rr}]$: matrices d'inductance mutuelle statorique / rotorique : ces matrices sont variables dans le temps.

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_{SS} & M_{SS} \\ M_{SS} & L_{SS} & M_{SS} \\ M_{SS} & M_{SS} & L_{SS} \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{rr} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$[M_{rs}] = [M_{rs}]^t$: Matrice d'inductance mutuelle statorique/rotorique ; ces matrices sont variable dans le temps.

$$[M_{rs}] = [M_{rs}]^t = \Pi_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.6 Modèle déphasé de la MADA

La complexité et le non linéarité des équations précédentes rendent leurs résolutions très difficiles, alors il est indispensable de transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système biphasé tournant qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à deux axes perpendiculaire (dq). Cela est possible grâce à la transformation de Park, cette transformation permet la conservation des puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles.

II.6.1 La transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq. Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc par contre le repère abc est mobile. Il forme avec le repère $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par

$$[X]_{dq} = P(\theta)[X]_{abc} \quad (\text{II.20})$$

Tel que :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La transformation inverse de Park est définie par le produit suivant

$$[X]_{abc} = P^{-1}(\theta)[X]_{dq} \quad (\text{II.22})$$

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

II.6.2 Application de la transformation de Park au modèle de la MADA

En appliquant les transformations précédentes aux équations des flux et de tensions de la MADA dans le repère naturel, nous obtenons le modèle diphasé de ces équations.

II.6.2.1 Les équations électriques dans le repère d q

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r * i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r * i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

II.6.2.2 Les équations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = l_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = l_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = l_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = l_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$l_s = L_s - M_s$: inductance cyclique statorique de la machine.

$l_r = L_r - M_r$: inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = (3/2) M_{sr}$: inductance magnétisante de la machine.

L_s, L_r : inductances de fuite.

II.6.2.3 Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants rotorique et flux statorique s'écrit comme suit

$$C_{em} = p_1 \frac{M}{l_s} (i_{qr} \phi_{ds} - i_{dr} \phi_{qs}) \quad (\text{II.26})$$

Avec :

p_1 : Le nombre de paires de pôles de la machine

II.7 Modélisation des convertisseurs statiques

II.7.1 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux types de source : la première est une source de courant (coté alternatif), la deuxième est une source de tension (coté continu). La présence de ces deux sources impose le respect de certaines règles de fonctionnement, à savoir :

- ✓ La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit donc jamais être court-circuitée. Les mêmes bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires.
- ✓ La source de courant, coté alternatif, ne doit jamais être en circuit ouvert. le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la connexion en antiparallèle d'une diode avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche figure(II.9). Les couples d'interrupteurs (K11,K21),(K12,K22), (K13,K23) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques de la machine, et pour éviter de court circuiter la source. Les diodes D_{ij} ($ij=1,2,3$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors

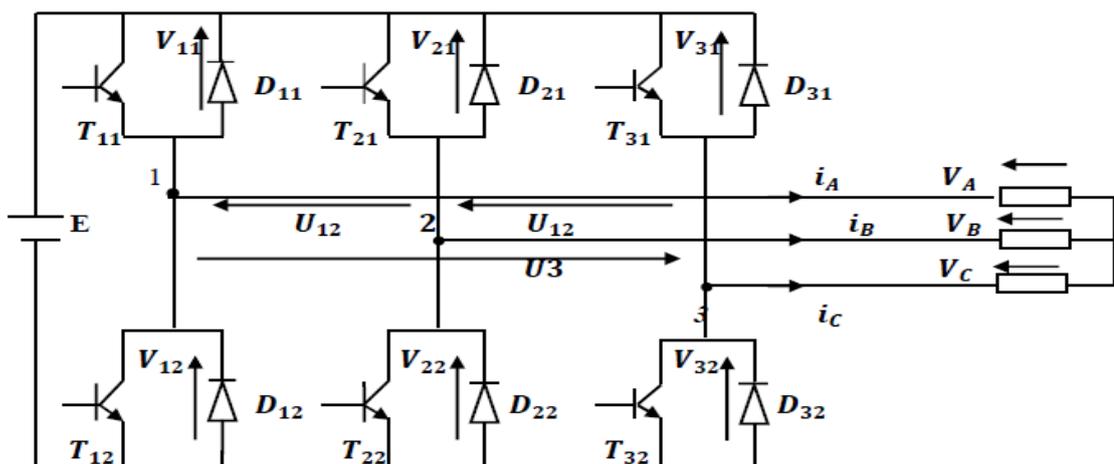


Figure (II.9) Représentation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.10).

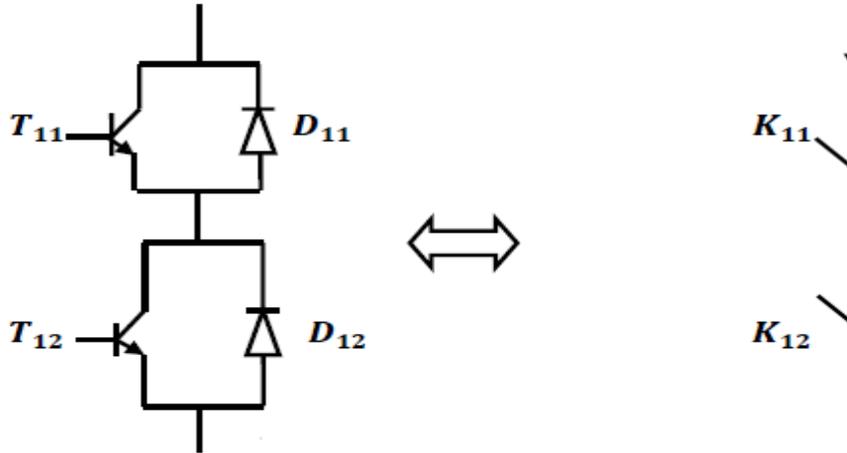


Figure. (II 10) Représentation d'un bras d'onduleur

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{On} \\ V_B = V_{BO} + V_{On} \\ V_C = V_{CO} + V_{On} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Par addition on a :

$$V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{On} \quad (\text{II.28})$$

Sachant que le système de tensions triphasées statoriques est symétrique.

Donc :

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{On} = 0 \quad (\text{II.29})$$

$$\text{D'où : } V_{On} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{II.30})$$

On remplace (II.30) dans (II.29) on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

On peut écrire le système (II-31) sous la forme matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 \text{ Si } K_{11} \text{ est fermé sinon } S_1 = -1 \\ S_2 = 1 \text{ Si } K_{12} \text{ est fermé sinon } S_2 = -1 \\ S_3 = 1 \text{ Si } K_{13} \text{ est fermé sinon } S_3 = -1 \end{cases}$$

On remplace (II.33) dans (II.32), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Le système (II.34) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI. Le tableau ci-dessous montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs K1,K2,K3 (les états de K4,K5,K6 sont respectivement complémentaires de ceux de K1,K2,K3).

Tableau (II.1) Représente les expressions des tensions simples et composées

K_{11}	K_{12}	K_{13}	V_{Ao}	V_{Bo}	V_{Co}	V_A	V_B	V_C	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
F	F	F	$E/2$	$E/2$	$E/2$	0	0	0	0	0	0
F	0	F	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	$E/6$	$-2E/6$	$E/6$	E	$-E$	0
F	F	0	$E/2$	$E/2$	$-E/2$	$E/6$	$-E/6$	$-2E/6$	0	E	$-E$
F	0	0	$E/2$	$-E/2$	$-E/2$	$2E/6$	$-E/6$	$-E/6$	E	0	$-E$
0	F	F	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-2E/6$	$E/6$	$E/6$	$-E$	0	E
0	0	F	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	$-E/6$	$-E/6$	$2E/6$	0	$-E$	E
0	F	0	$-E/2$	$E/2$	$-E/2$	$-E/6$	$2E/6$	$-E/6$	$-E$	E	0
0	0	0	$-E/2$	$-E/2$	$-E/2$	0	0	0	0	0	0

II.7.1.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La MLI permet de découper la tension de sortie (par action sur les commutateurs de l'onduleur) en plusieurs créneaux de largeur différente, d'où le nom de Modulation de Largeur d'Impulsion. L'opération a un double but :

- ✓ Modifier le contenu harmonique de la tension de sortie (qui conserve sa période T) de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs (donc les fréquences) élevés, ainsi le filtrage de la tension se trouvera facilité.
- ✓ Permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension. C'est indispensable dans le cas de l'alimentation d'une machine à fréquence (vitesse) variable pour pouvoir fonctionner à flux constant.

Les deux signaux de commande représentés sur la figure (II.11) sont appliqués aux deux entrées d'un comparateur qui détermine (à travers une interface) les états de commutation de l'onduleur.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- ✓ L'indice de modulation (m) qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence $m = \frac{f_p}{f_r}$
- ✓ Le taux de modulation r (ou le coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse : $r = \frac{V_r}{V_p}$.

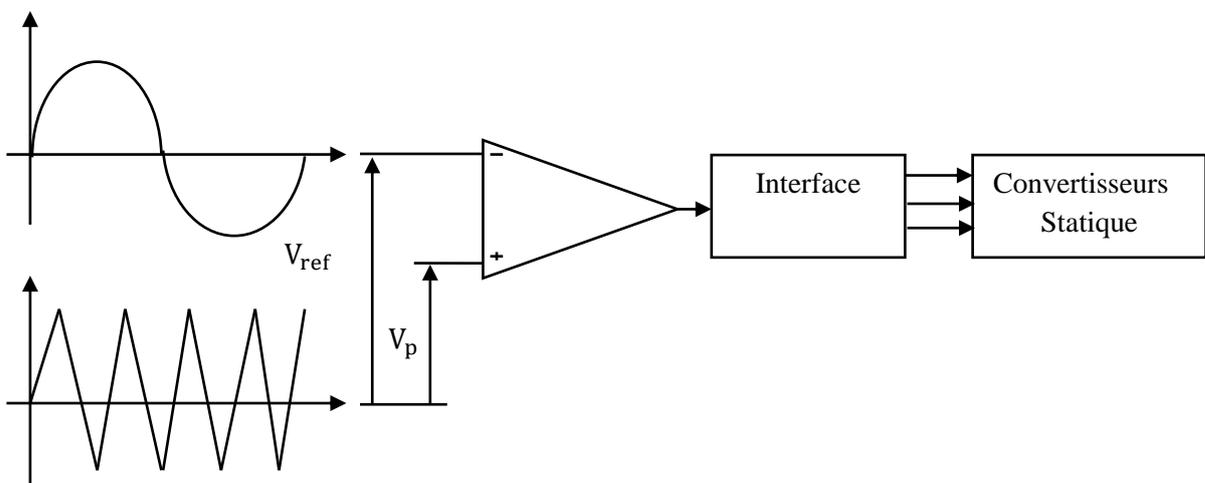


Figure (II.11) principe de commande d'une MLI triangulo-sinusoidale

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4\frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4\frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases}$$

(11.35)

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_p . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} V_{ra}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ V_{rb}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{rc}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

(11.36)

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_1, S_2 et S_3 des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation (II-37) suivante :

$$S_{123} = \begin{cases} 1 & \text{si } (V_{rABC} - x(t)) \geq 0 \\ -1 & \text{si } (V_{rABC} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad \text{(II-37)}$$

On note que la MLI permet une nette réduction des harmoniques des courants, en augmentant la fréquence de découpage. Elle permet aussi de repousser vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage ; comme elle permet aussi de faire varier le fondamental de la tension désirée.

II.7.2 Modélisation du redresseur

La figure (II.12) représente le schéma d'un convertisseur AC/DC triphasé

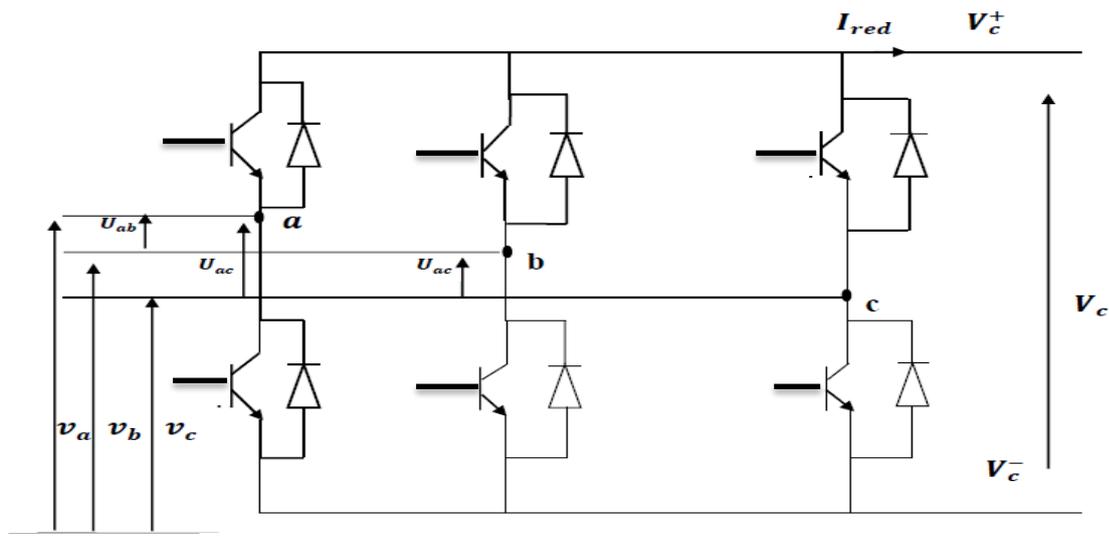


Figure (II.12) Redresseur MLI

En utilisant les fonctions de connexion F_i , $i = 1$ à 6), pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert du redresseur comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_c^+ \\ V_c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_3 & F_5 \\ F_2 & F_4 & F_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{II.38}$$

Avec :

$$V_c = V_c^+ - V_c^- \tag{II.39}$$

De même on peut exprimer le courant continu i_{red} en fonction des courants d'entrée.

$$i_{red} = [F_1 \quad F_3 \quad F_5] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{II.40}$$

II.8 Modélisation du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{c} i_c \tag{II.41}$$

La tension du bus continu est égale à l'intégration du courant capacitif sur la capacité du bus continu, ainsi son expression s'écrira comme suit :

$$v_c = \int \frac{1}{c} i_c dt \tag{II.42}$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur comme le montre la figure ci-dessous :

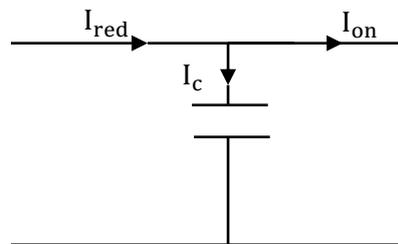


Figure (II.13) Schéma du bus continu

Avec :

$$i_c = i_{red} - i_{on} \tag{II.43}$$

Le courant circulant dans l'onduleur est donné par :

$$i_{on} = F_1 i_{resa} + F_2 i_{resb} + F_3 i_{resc} \tag{II.44}$$

Avec :

$i_{resa}, i_{resb}, i_{resc}$: sont les courants du côté réseau.

$$i_{red} = F'_1 i_a + F'_2 i_b + F'_3 i_c \tag{II.45}$$

Avec

i_a, i_b, i_c : sont les courants du côté génératrice

II.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a modélisé l'ensemble des éléments constitutifs de notre chaîne de conversion éolienne commençant par la turbine de vent avec un algorithme pour l'extraction de la puissance maximale, liée à une machine asynchrone à double alimentation pilotée par le rotor via deux convertisseurs, un redresseurs et un onduleur contrôlé par MLI, Le premier transforme la tension alternative et le courant alternatif délivrés par la MADA en tension et courant continu, et pour le filtrage de la tension un bus continu suit le convertisseur, l'onduleur intervient pour qu'il récupère cette tension, on règle la commande de l'onduleur pour obtenir un signal avec amplitude et un fréquence adaptées aux grandeurs de sorties de la MADA.

C'est cette structure qui sera étudiée dans le prochain chapitre. Des stratégies de commande seront établies, pour contrôler la puissance statorique par des grandeurs

rotoriques, et ce par la commande vectorielle avec orientation du flux statorique en utilisant des régulateurs à mode glissant.

Chapitre III

*Contrôle de la puissance
active et réactive par des
régulateurs à mode glissant*

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

III.1 Introduction

Dans une machine à courant alternatif, la principale difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre ses grandeurs électromagnétiques tandis que la bonne commande de ces machines est assurée si nous garantissons un bon découplage de ces dernières. Ceci est l'objectif de la commande dite vectorielle qui repose sur l'orientation des flux dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher le comportement de la machine à courant alternatif à ce d'une machine à courant continu à excitation séparée où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique.

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau, dans ce chapitre on va appliquer la commande décrite, en utilisant une régulation en mode glissant pour les puissances active et réactive, à la fin du chapitre on exposera les résultats de simulation obtenus et les interprétés.

III.2 principe de la Commande vectorielle de la MADA

Pour obtenir une situation équivalente à celle d'un moteur à courant continu, Blaschke et Hass ont proposés une méthode permettant de maîtriser ces difficultés en introduisant les coordonnées de champs, où le vecteur courant statorique sera décomposé en deux composantes, une qui produit le flux et l'autre le couple. La dynamique d'une machine à courant alternatif sera donc ramenée à celle d'une machine à courant continu. [BEN 12]. Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

Suivant la source d'énergie :

- ✓ Commande en tension.
- ✓ Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d,q) :

- ✓ Le flux rotorique.
- ✓ Le flux statorique.

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

- ✓ Le flux de l'entrefer.

Dans ce présent travail, nous avons choisi la commande en tension avec orientation du flux statorique suivant le repère (d,q).

III.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

- Le choix de référentiel

En choisissant le référentiel (d-q) avec une orientation du flux statorique

Sachant que $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ et $\omega_r = g\omega_s$ (III.1)

Et on oriente ce dernier à fin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique (figure III.1)

Ainsi que :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{qs} = 0 \text{ (III.2)}$$

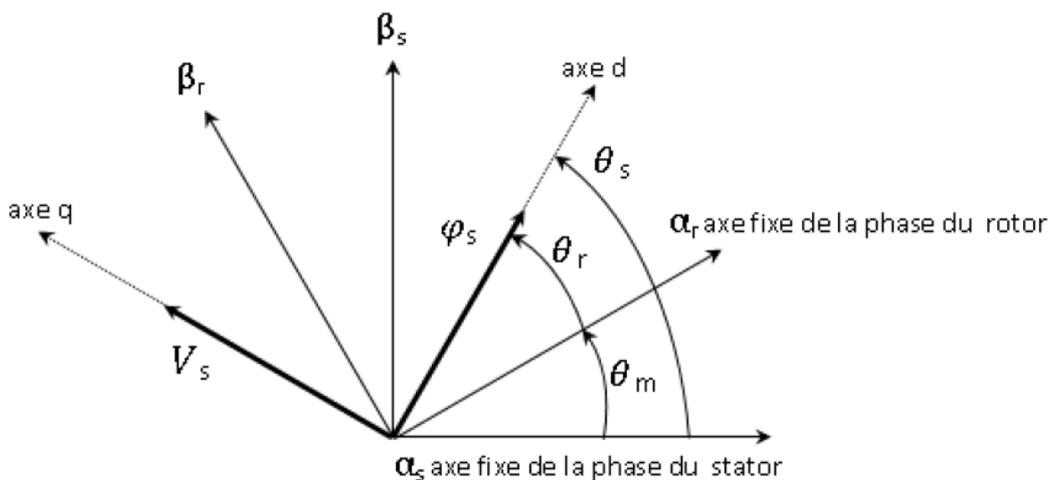


Figure (III-1) Orientation de l'axe d sur le flux statorique Φ_s

$$C_{em} = p_1 \frac{M}{l_s} (i_{qr} \Phi_{ds}) \text{ (III.3)}$$

Dans l'hypothèse où le flux Φ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé a,b,c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$v_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d\Phi_{ns}}{dt} \text{ (III.4)}$$

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

Si on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, la relation (II.14) devient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\phi_{ds}}{dt} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} = \omega_s \phi_s \text{ (III.5)} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases}$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \text{ (III.6)} \\ V_{qs} = V_s \end{cases}$$

A l'aide de l'équation (II.25) on peut établir une relation entre les courants statorique et rotorique.

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{l_s} i_{dr} + \frac{\phi_s}{l_s} \text{ (III.7)} \\ i_{qs} = -\frac{M}{l_s} i_{qr} \end{cases}$$

Dans le repère diphasé (dq), les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \text{ (III.8)} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases}$$

Et d'après l'équation (III.6) on aura :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \text{ (III.9)} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases}$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation (III.9) les expressions des courants statoriques obtenues par l'équation (III.7). Et après avoir approximer ϕ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$ on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{l_s} i_{qr} & \text{(III.10)} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{l_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{\omega_s l_s} \end{cases}$$

III.4 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux (II.25), les courants statoriques par leurs expressions, on obtient:

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = (l_r - \frac{M^2}{l_s})i_{dr} + \frac{MV_s}{l_s\omega_s} \text{ (III.11)} \\ \Phi_{qr} = (l_r - \frac{M^2}{l_s})i_{qr} \end{cases}$$

En remplaçant dans la relation (III.5)

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = \frac{d\Phi_s}{dt} \\ v_{qs} = \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} = \omega_s \Phi_s \text{ (III.12)} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + (l_r - \frac{M^2}{l_s}) \frac{d}{dt} i_{dr} - g\omega_s (l_r - \frac{M^2}{l_s}) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + (l_r - \frac{M^2}{l_s}) \frac{d}{dt} i_{qr} + g\omega_s (l_r - \frac{M^2}{l_s}) i_{dr} + g(\frac{MV_s}{l_s}) \\ \text{On pose } (1 - \frac{M^2}{l_s l_r}) = \sigma \end{cases}$$

v_{dr} et v_{qr} sont les grandeurs que l'on doit imposer pour obtenir les courants rotoriques voulus et par conséquent la puissance active et réactive désirées, Ce qui implique

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{dr} = \frac{1}{l_r \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} + g\omega_s \sigma l_r i_{qr}) \text{ (III.13)} \\ \frac{d}{dt} i_{qr} = \frac{1}{l_r \sigma} (v_{qr} - R_r * i_{qr} - g\omega_s \sigma l_r i_{dr} - g(\frac{MV_s}{l_s})) \end{cases}$$

III.5 Commande en puissance de la MADA

III.5.1 Commande par mode de glissement

Le principe de la commande par le mode de glissement est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (Figure III.2).

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

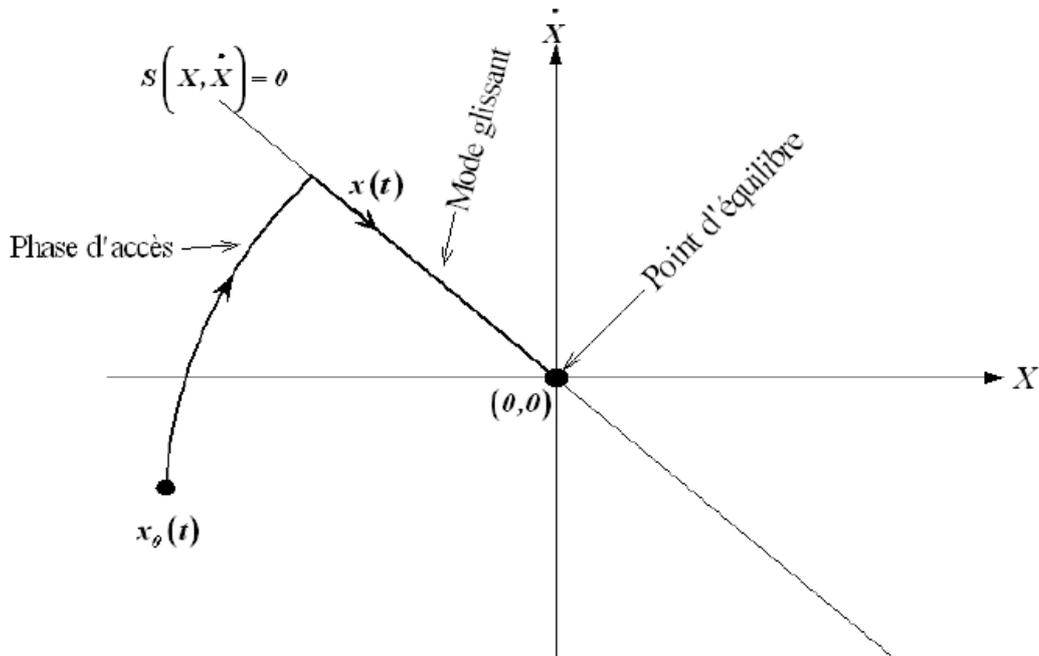


Figure (III.2) Modes de fonctionnement dans le plan de phase

Les premiers travaux concernant les systèmes de commande à structure variable en mode de glissement ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov [AMI 08].

Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications possibles, en particulier dans le domaine des entraînements réglés [Buh86]. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches de commande des systèmes non linéaires et des systèmes ayant des modèles imprécis [AMI 08].

III.5.2 Théorie de la commande par mode de glissement

Le principe de commande par des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement. Et à l'aide de la loi de commutation elle est obligée d'y rester au voisinage de cette surface. D'où le phénomène de glissement. La commande par mode glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ceci est dû d'une part à sa simplicité de mise en œuvre et d'autre part à sa robustesse aux variations paramétriques du système et aux perturbations externes.

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

La conception de la commande par mode de glissement peut être divisée en trois étapes principales dépendantes.

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

III.5.2.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonctions nécessaires. Pour un système défini par équation (III.14), le vecteur de surface à la même dimension que le vecteur de commande (U).

$$[\dot{X}] = [A] [X] + [B] [U] \quad (\text{III.14})$$

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler (X), elle est donnée par :

$$S(X) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \delta\right)^{r-1} e(X) \quad (\text{III.15})$$

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro.

III.5.2.2 Conditions de convergences et d'existences

Les conditions de convergences permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement. Nous retenons deux considérations pour assurer le mode de convergence

✓ La fonction discrète de commutation

Cette condition de convergence est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN, qui consiste à donner à la surface une dynamique converge vers zéro.

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0 \quad (\text{III.16})$$

✓ La fonction de Lyapunov

L'objectif de cette fonction est de garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.

Fonction de Lyapunov est définie comme suit :

$$V(X) = \frac{1}{2} S^2(X) \quad (\text{III.17})$$

La dérivée de cette fonction est exprimée par :

$$\dot{V}(X) = S(X) \dot{S}(X) \quad (\text{III.18})$$

La décroissance de la fonction $V(X)$ est garantie, si sa dérivée est négative.

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

L'équation (III.18) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprime par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal [KER 05].

III.5.2.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement. L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée.

La partie continue en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivités. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre stabilisante U_n .

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{III.19})$$

- U_{eq} : correspond à la commande proposée par FILIPOV, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(X)=0$.

La commande équivalente est déduite en considérant que la surface est nulle $\dot{S}(X)=0$. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander. Aussi comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{max} et U_{min} , [KER 05].

- U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence. Pour mettre en évidence le développement précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (III.14). Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande U .

$$\dot{S}(X) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{III.20})$$

En remplaçant (III.14) et (III.19) dans (III.20), nous trouvons:

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

$$\dot{S}(X) = \frac{\partial S}{\partial X} A(X) + \frac{\partial S}{\partial X} B(X) U_{eq} + \frac{\partial S}{\partial X} B(X) U_n \quad (\text{III.21})$$

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

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial X} B(X) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial X} A(X) \quad (\text{III.22})$$

Avec $\left(\frac{\partial S}{\partial X} B(X) \right) \neq 0$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.21), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface:

$$\dot{S}(X) = \frac{\partial S}{\partial X} B(X) U_n \quad (\text{III.23})$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (III.16) devient :

$$S(X) \frac{\partial S}{\partial X} B(X) U_n < 0 \quad (\text{III.24})$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(X) \frac{\partial S}{\partial X} B(X)$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais de la figure (III.3).

$$U_n = K \cdot \text{sign}(S(X)) \quad (\text{III.25})$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial X} B(X, t)$

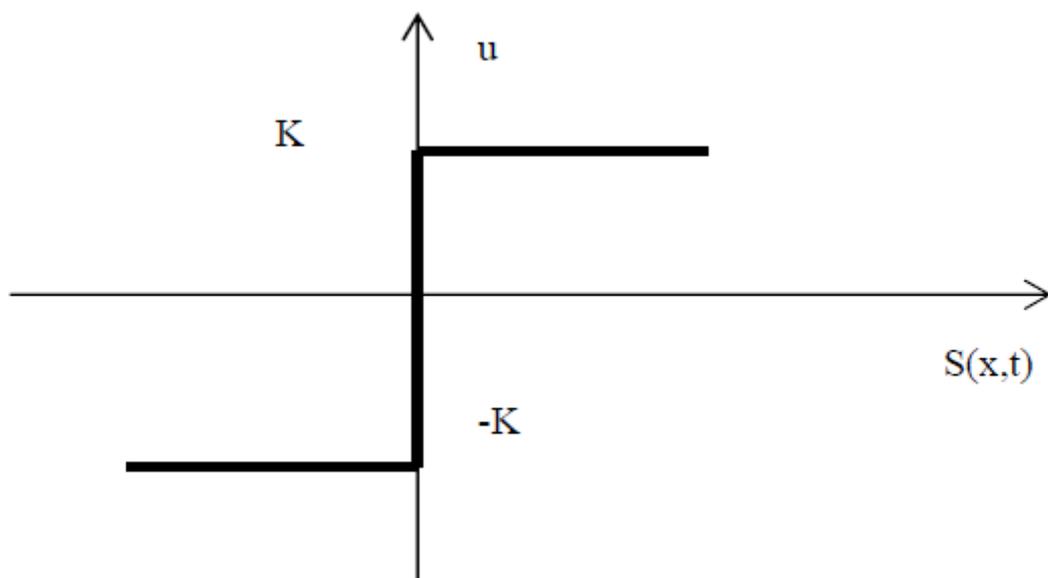


Figure (III.3) Fonction de signe

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

Toute fois l'utilisation de la commande de type relais peut provoquer des dynamiques indésirables caractérisées par le phénomène de broutement, Figure (III.4)

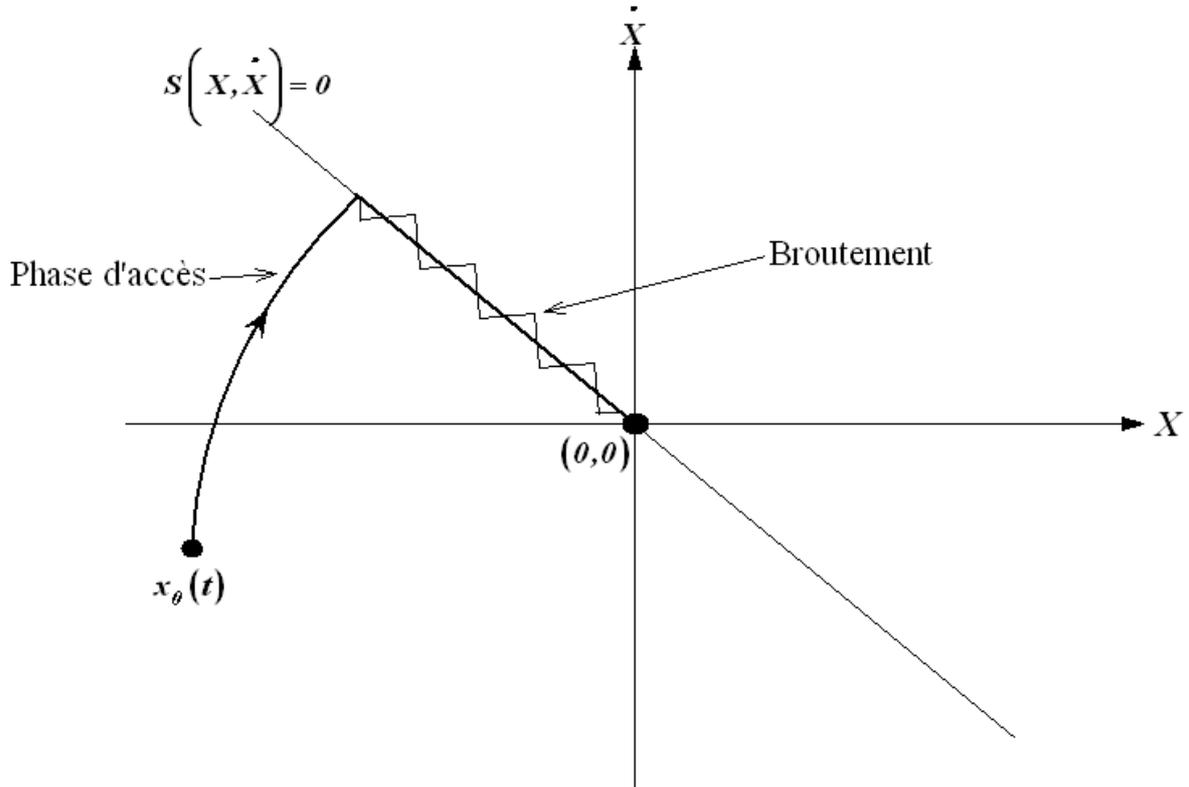


Figure (III.4) Phénomène de broutement

Afin limiter le phénomène de broutement, une commande en mode de glissement dite commande douce à un seul seuil est utilisée voir la figure (III.5).

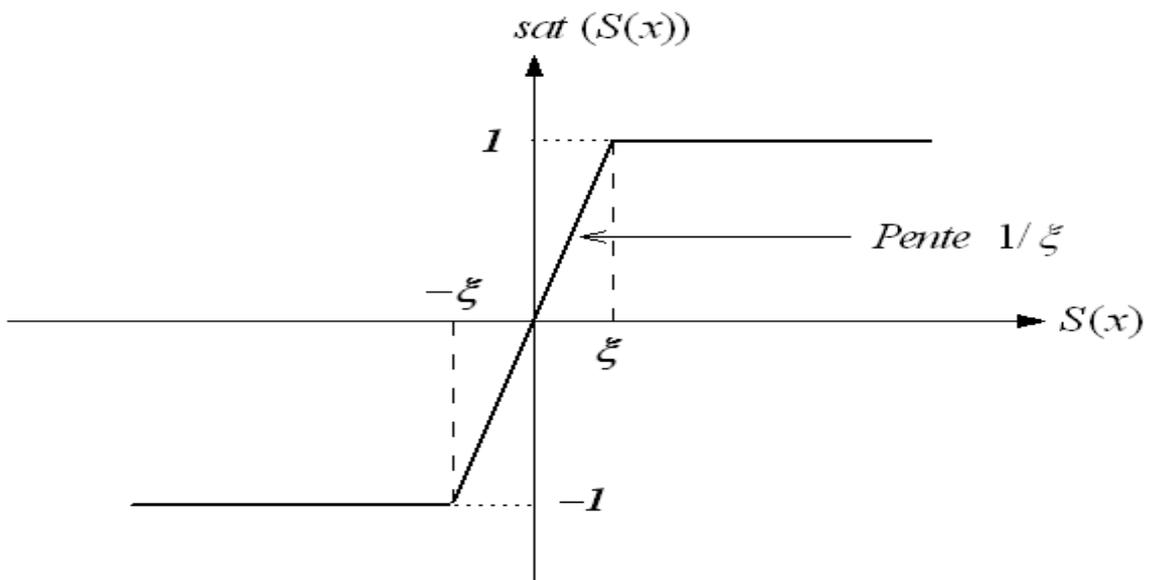


Figure (III.5) Commande adoucie (sat)

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

$$U_n = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K S(X) & |S(X)| < \varepsilon \\ K \operatorname{sign}(S(X)) & |S(X)| \geq \varepsilon \end{cases}$$

Les oscillations de hautes fréquences qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continue la commande discontinue U_n . Pour cela, on remplace la fonction sign par la fonction intégrale. Elle est définie comme suit [BEN 05] :

$$U_n = k \frac{s(x)}{|s(x) + \delta|} + \eta$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 & \text{Si } |s(x)| \geq \varepsilon \\ \delta_0 + \gamma \int s(x) dt & \text{Si } |s(x)| \leq \varepsilon \end{cases}$$

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{Si } |s(x)| \geq \varepsilon \\ \xi + \gamma \int s(x) dt & \text{Si } |s(x)| \leq \varepsilon \end{cases}$$

$\xi, \gamma, \varepsilon, \eta, \delta_0$, sont des constantes positifs

La commande est illustrée dans la figure (III.6)

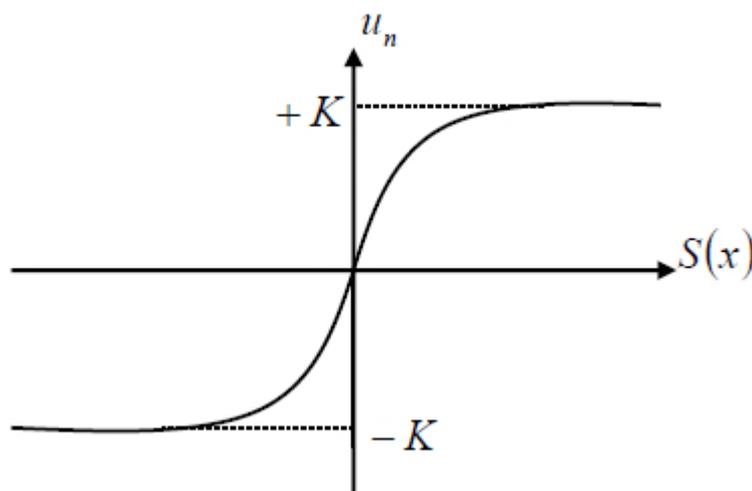


Figure (III.6) commande intégrale

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

III.6 Utilisation des RMG pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA

III.6.1 Contrôle de la puissance active

$$S(P) = P_{s-ref} - P_s \quad (III.26)$$

On dérive la surface

$$S\dot{(P)} = \dot{P}_{s-ref} - \dot{P}_s \quad (III.27)$$

On substitue l'expression (III-10) dans l'expression de la puissance active

$$S\dot{(P)} = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_s} i_{qr} \quad (III.28)$$

$$S\dot{(P)} = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{M V_s}{l_s}\right)) \quad (III.29)$$

On remplace la tension v_{qr} par $(v_{qr-eq} + v_{qr-n})$

$$S\dot{(P)} = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{qr-eq} + v_{qr-n} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{M V_s}{l_s}\right)) \quad (III.30)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a

$$S(P) = 0 ; S\dot{(P)} = 0 ; v_{qr-n} = 0 \quad (III.31)$$

On tire de l'équation (III.30) v_{qr-eq}

$$v_{qr-eq} = -\dot{P}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{M V_s} + R_r i_{qr} + g \omega_s \sigma l_r i_{dr} + g \left(\frac{M V_s}{l_s}\right) \quad (III.32)$$

Durant la convergence du mode de glissement

$$S(P) S\dot{(P)} \leq 0 \quad (III.33)$$

$$v_{qr-n} = K_{qr} \text{sat}(S(P)) \quad (III.34)$$

Avec K_{qr} est un gain positif

III.6.2 Contrôle de la puissance réactive

On dérive la surface

$$S\dot{(Q)} = \dot{Q}_{s-ref} - \dot{Q}_s \quad (III.35)$$

On substitue l'expression (III-10) dans l'expression de la puissance réactive

$$S\dot{(Q)} = \dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_s} i_{dr} \quad (III.36)$$

$$S\dot{(Q)} = \dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}) \quad (III.37)$$

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

On remplace la tension v_{dr} par $(v_{dr-eq} + v_{dr-n})$

$$S(\dot{Q}) = \dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{dr-eq} + v_{dr-n} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}) \quad (III.38)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a

$$S(Q) = 0; \dot{S}(Q) = 0; v_{dr-eq} = 0 \quad (III.39)$$

On tire de l'équation (III.39) v_{dr-eq}

$$v_{dr-eq} = -\dot{Q}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{M V_s} + R_r i_{dr} - g \omega_s \sigma l_r i_{qr} \quad (III.40)$$

Durant la convergence du mode de glissement

$$S(P)S(\dot{P}) \leq 0 \quad (III.41)$$

$v_{qr-n} = K_{dr} \text{sat}(S(Q))$ (III.42) On peut résumer ces équations par la figure (III.7) :

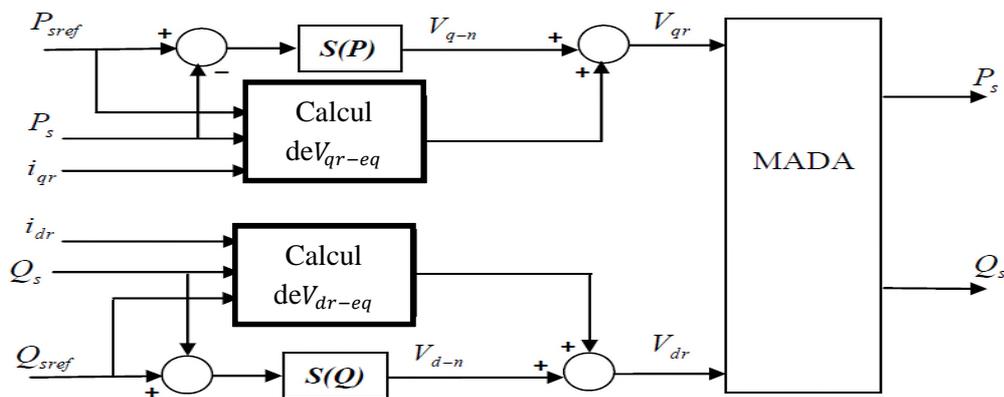


Figure (III.7) Schéma bloc de la structure de commande par mode

III.7 Calcul de paramètres de régulation

Ces paramètres sont calculés pour

- Limiter les courants à des valeurs admissibles pour le couple maximal
- Assurer la rapidité de la convergence
- Imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement

III.7.1 Calcul de K_{qr}

La condition de convergence $S(x)S(\dot{x}) < 0$ est assurée dans deux cas

- Le premier cas :

$$\text{Si } S(x) \geq 0 \text{ et } S(\dot{x}) < 0$$

De l'équation (III.29)

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

$$\dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{MV_s}{l_s}\right)) < 0 \quad (\text{III.43})$$

$$\dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (K_{qr} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{MV_s}{l_s}\right)) < 0 \quad (\text{III.44})$$

D'où K_{qr}

$$K_{qr} > \left| -\left(\dot{P}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{MV_s} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{MV_s}{l_s}\right)\right) \right| \quad (\text{III.45})$$

- Le deuxième cas :

$$S(x) < 0 \text{ et } \dot{S}(x) > 0$$

$$\dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (-K_{qr} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{MV_s}{l_s}\right)) > 0 \quad (\text{III.46})$$

D'où K_{qr}

$$K_{qr} > \left(\dot{P}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{MV_s} - R_r i_{qr} - g \omega_s \sigma l_r i_{dr} - g \left(\frac{MV_s}{l_s}\right)\right) \quad (\text{III.47})$$

III.7.2 Calcul de K_{dr}

La condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$

La condition est vérifiée dans deux cas

- Le premier cas :

$$S(x) \geq 0 \text{ et } \dot{S}(x) < 0$$

$$\dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}) < 0 \quad (\text{III.48})$$

$$\dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (K_{dr} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}) < 0 \quad (\text{III.49})$$

$$K_{dr} > \left| -\left(\dot{Q}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{MV} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}\right) \right| \quad (\text{III.50})$$

- Le deuxième cas

$$S(x) < 0 \text{ et } \dot{S}(x) > 0$$

$$\dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{l_r l_s \sigma} (-K_{dr} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr}) > 0 \quad (\text{III.51})$$

D'où K_{dr}

$$K_{dr} > \dot{Q}_{s-ref} \frac{l_r l_s \sigma}{MV_s} - R_r i_{dr} + g \omega_s \sigma l_r i_{qr} \quad (\text{III.52})$$

III.8 Résultats et Interprétation

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

Dans ce qui suit on exposera les résultats obtenus après la simulation Sous MATLAB SIMULINK suivit par l'interprétation de ces résultats, et ce pour bien assimiler le comportement dynamique de l'aérogénérateur qui est à base de la machine doublement alimentée (MADA). La commande appliquée est la commande vectorielle en puissance, la régulation des puissances active et réactive est faite par des régulateurs en mode glissant.

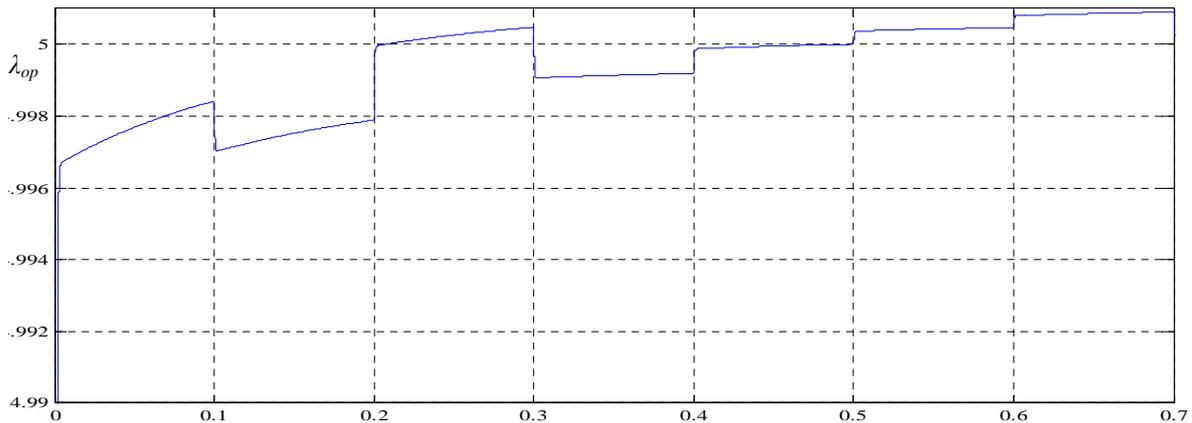


Figure (III.8) Vitesse spécifique optimale (λ_{opt})

t(s)

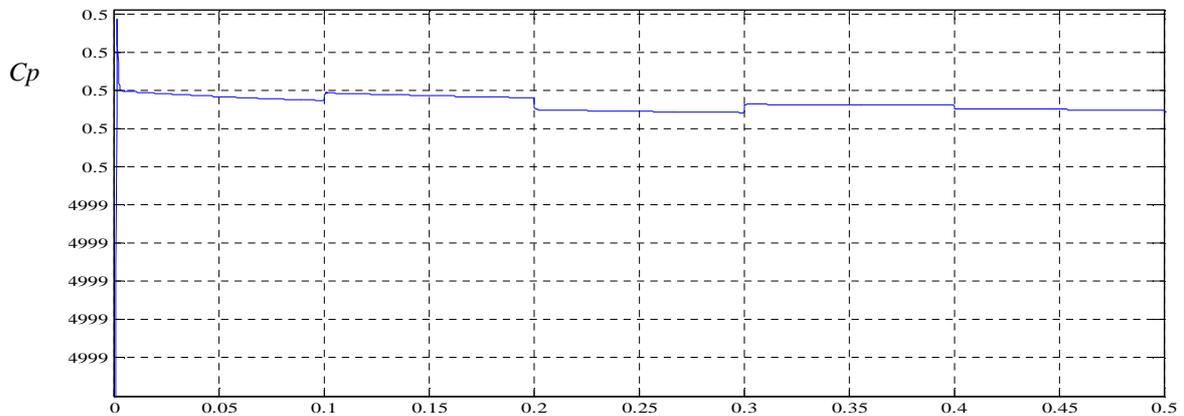


Figure (III.9) Coefficient de puissance C_p

t(s)

- Les courbes précédentes figures (III.8) et (III.9), montrent que le coefficient de puissance C_p garde sa valeur maximale, tandis que la puissance spécifique garde sa valeur optimale (λ_{opt}).

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

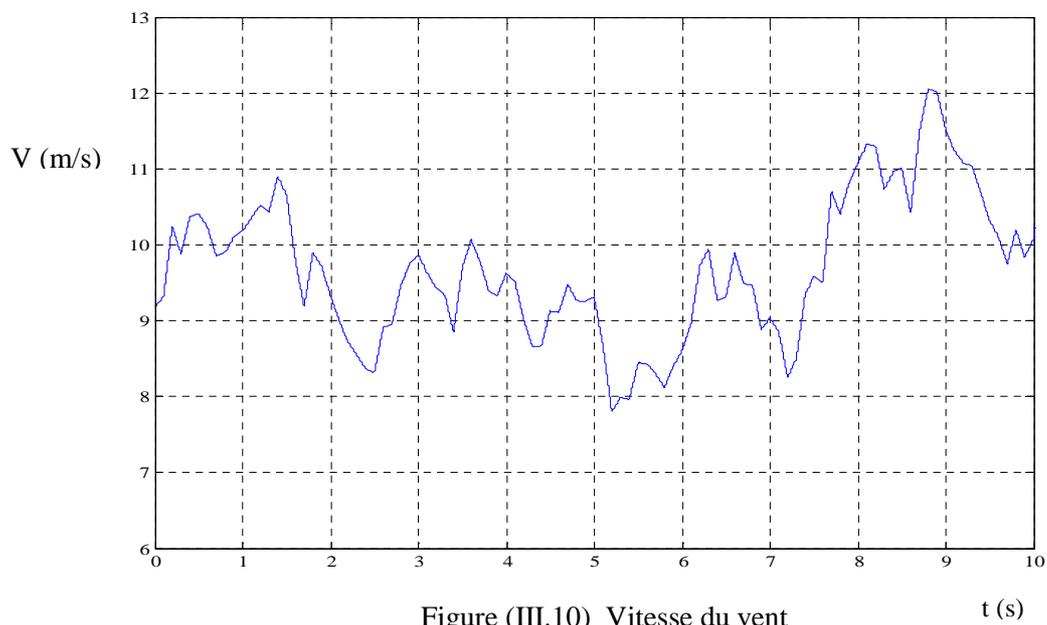


Figure (III.10) Vitesse du vent

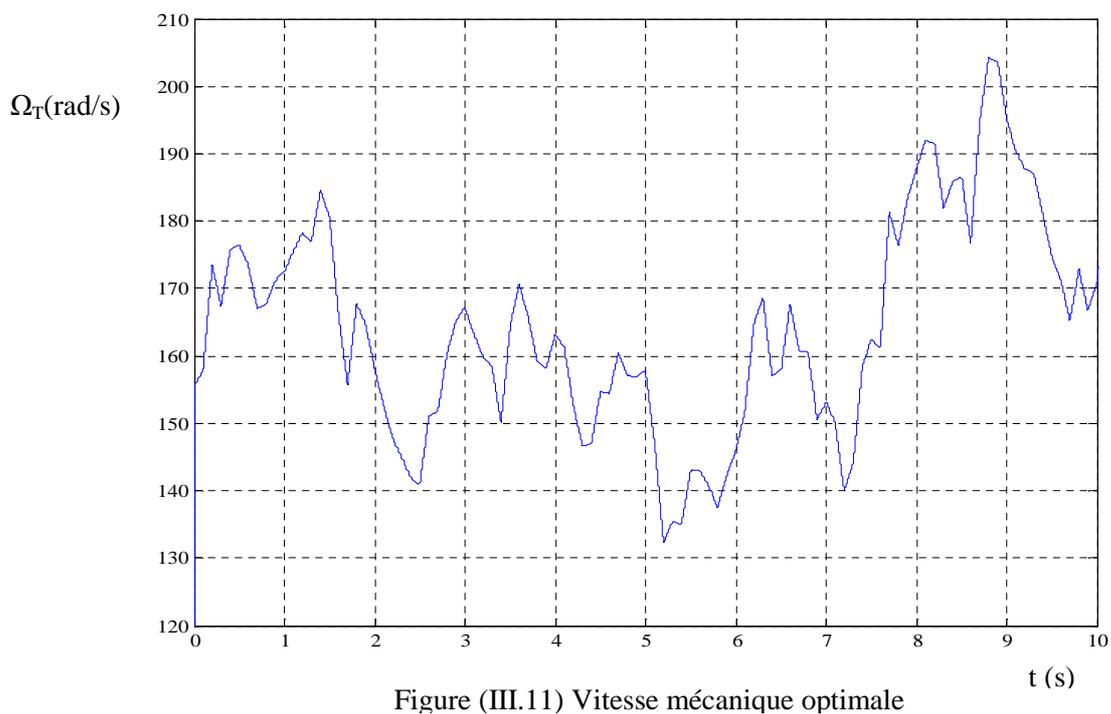


Figure (III.11) Vitesse mécanique optimale

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

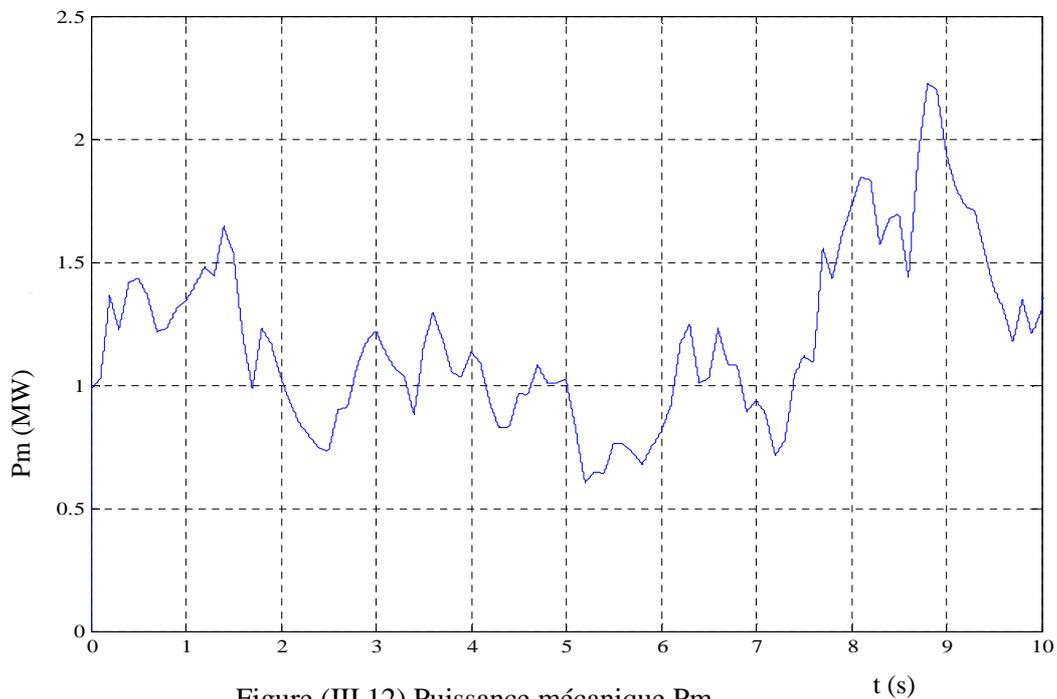


Figure (III.12) Puissance mécanique P_m

- Sur la (figure III.10) nous avons présenté le profil du vent auquel est soumise cette éolienne pendant un temps $t=10s$, la vitesse mécanique de la MADA suit parfaitement celle issue de l'algorithme MPPT, ce fait est illustré sur la figure (III.11) qui représente la vitesse mécanique optimale et figure (III.12) qui représente la puissance mécanique optimale.

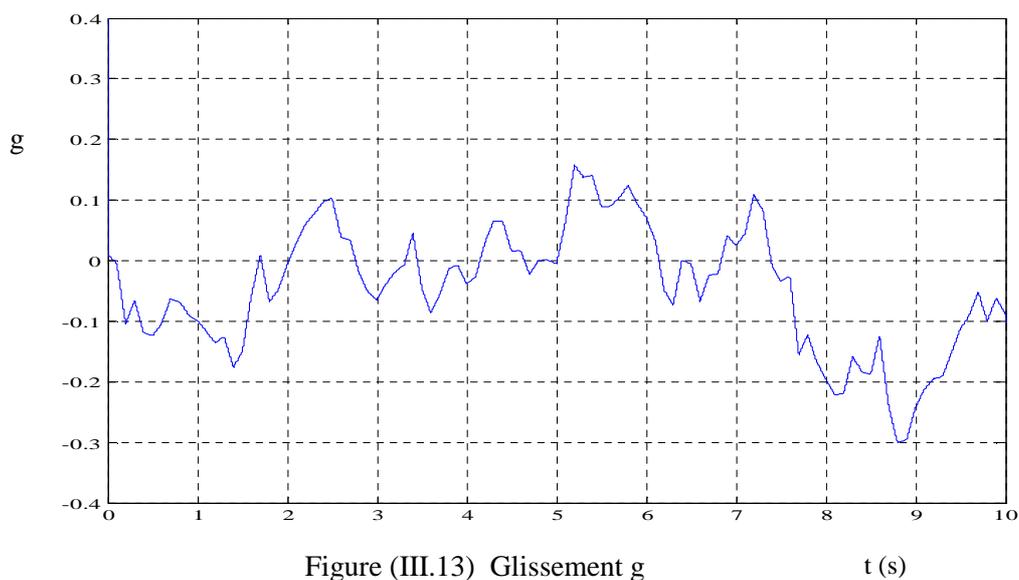


Figure (III.13) Glissement g

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

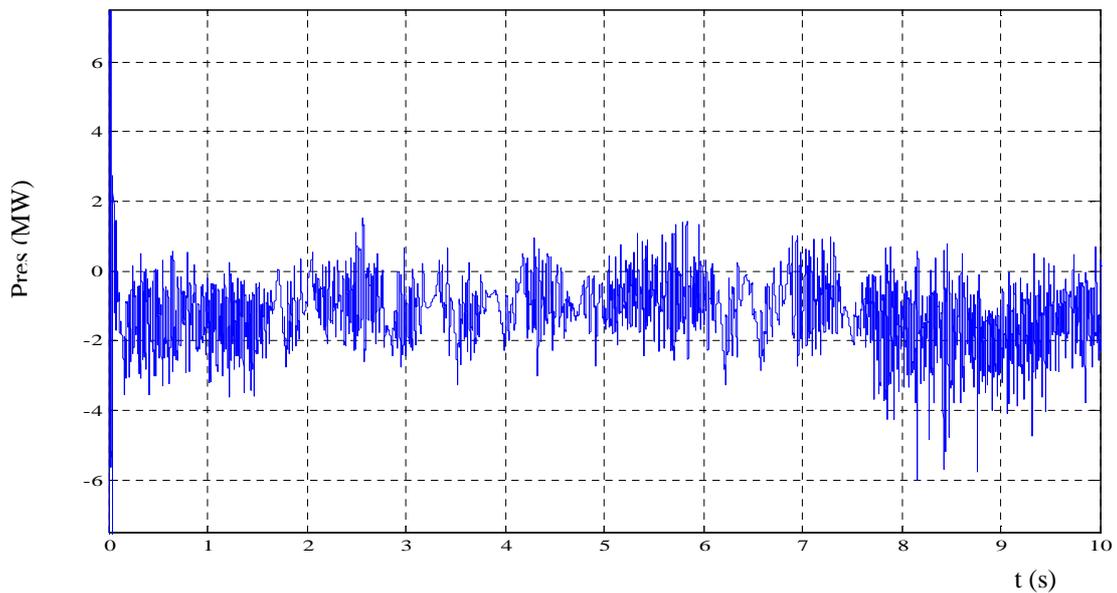


Figure (III.14) Puissance de réseau (Pres)

- Il est à noter que le profil du vent est choisi de façon à obtenir justement les différentes valeurs du glissement, c'est-à-dire différents modes de fonctionnement (hypersynchrone, hyposynchrone, asynchrone synchronisée) de la MADA, et d'après l'allure de glissement représenté dans la figure (III.13) qui montre le fonctionnement de la MADA dans les trois modes désirés, L'allure de la puissance du réseau (Pres) est montrée sur la figure (III.14) qui justifie les trois modes de fonctionnement de la MADA.

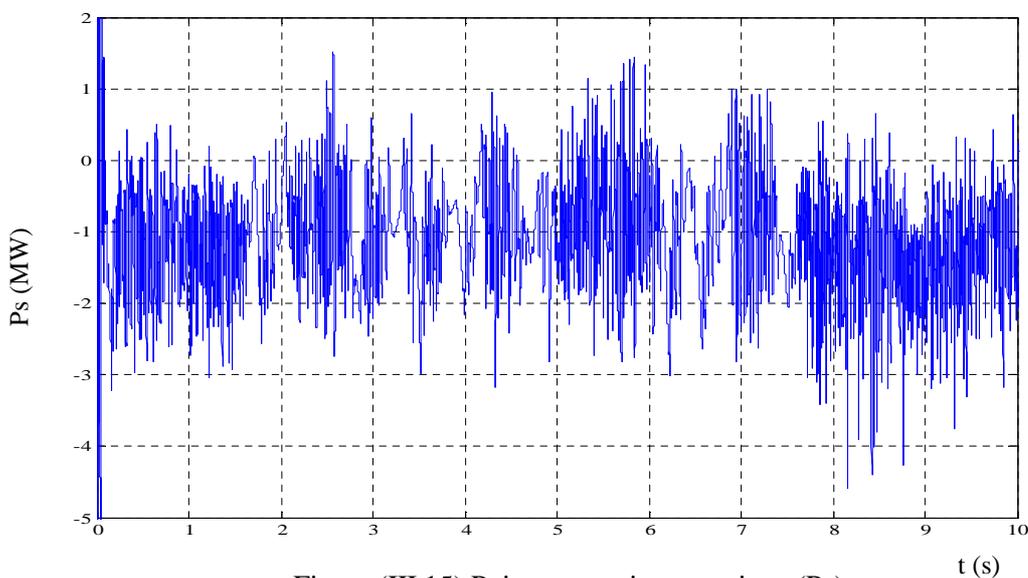


Figure (III.15) Puissance active statorique (Ps)

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

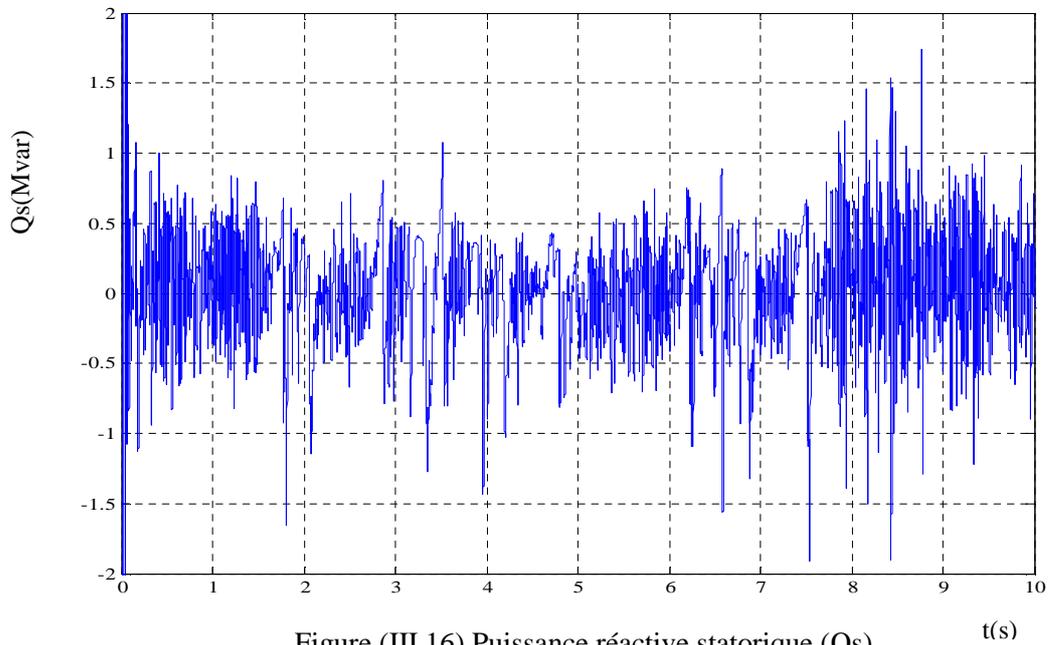
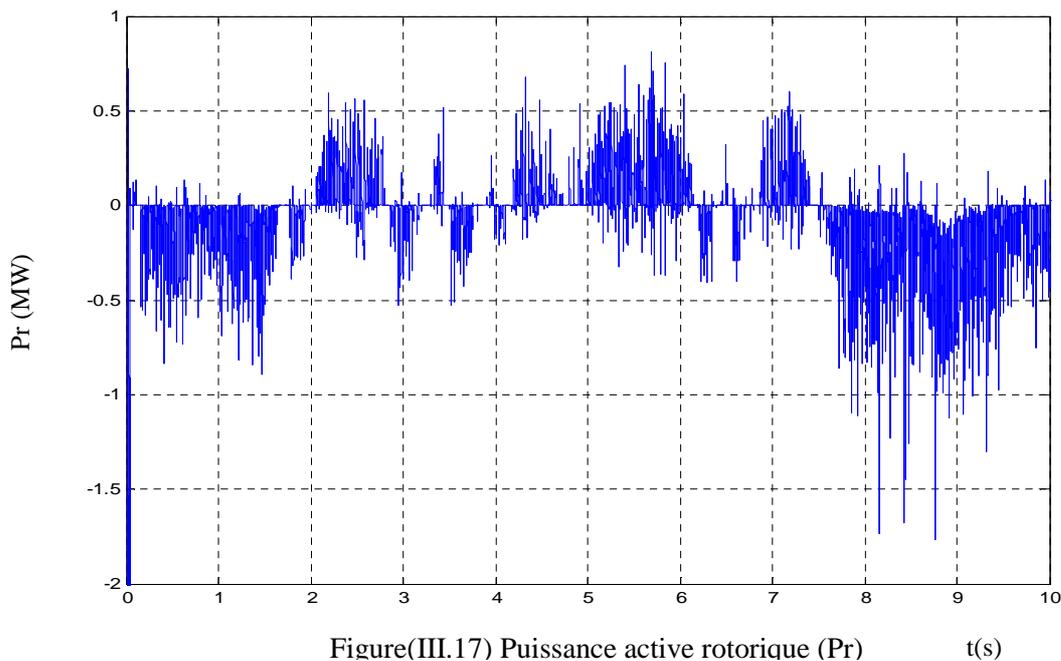


Figure (III.16) Puissance réactive statorique (Q_s) t (s)

- La figure (III.15) et la figure (III.16) représentent la puissance active et réactive statoriques, celle de la puissance active est de signe négatif cela justifie que le stator génère de la puissance. On peut constater la robustesse de la commande en puissance de la MADA.



Figure(III.17) Puissance active rotorique (P_r) t (s)

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

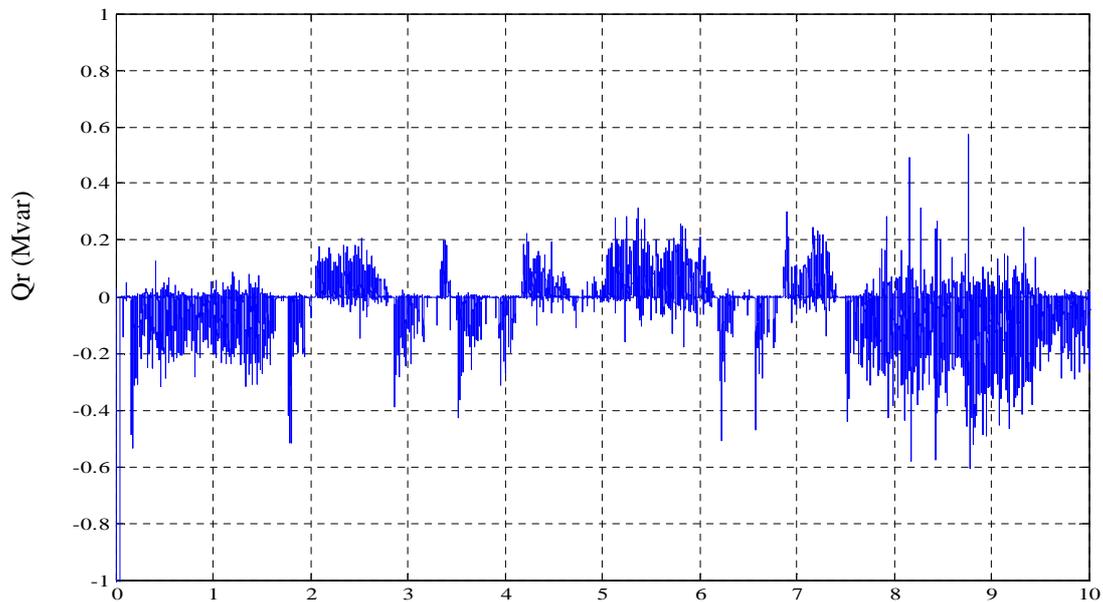


Figure (III.18) Puissance réactive rotorique (Q_r) t (s)

- Les figures (III.17) et (III.18) représentent respectivement la puissance active rotorique et la puissance réactive rotorique. Pour $g > 0$ (mode hyposynchrone), la MADA absorbe de la puissance active et pour $g < 0$ (mode hypersynchrone), la puissance active rotorique est fournie par la génératrice. Lorsque $g = 0$, le rotor absorbe une puissance active qui représente les pertes Joules rotorique, alors que la puissance réactive rotorique est nulle.

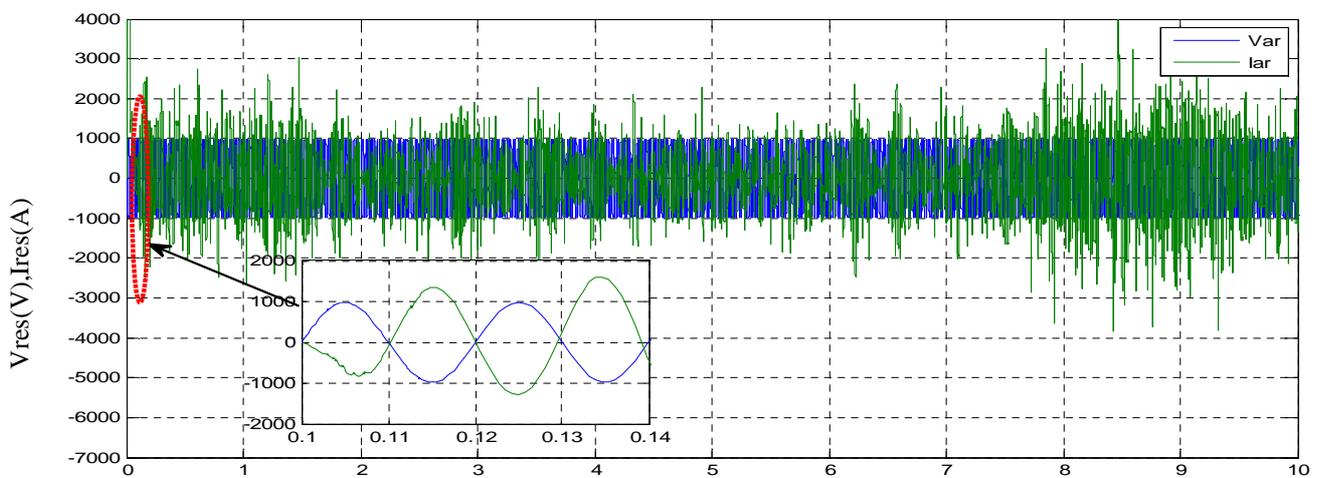


Figure (III.19) Tension (V_{res}) et le courant (I_{res}) de réseau t(s)

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

- Les figures (III.19), dans notre étude on a supposé que le réseau est stable ce qui est montré par ces figures, et ça veut dire que la tension est imposée par le réseau. Les amplitudes des courants et tension de réseau sont en opposition de phase pour tous les modes de fonctionnement.

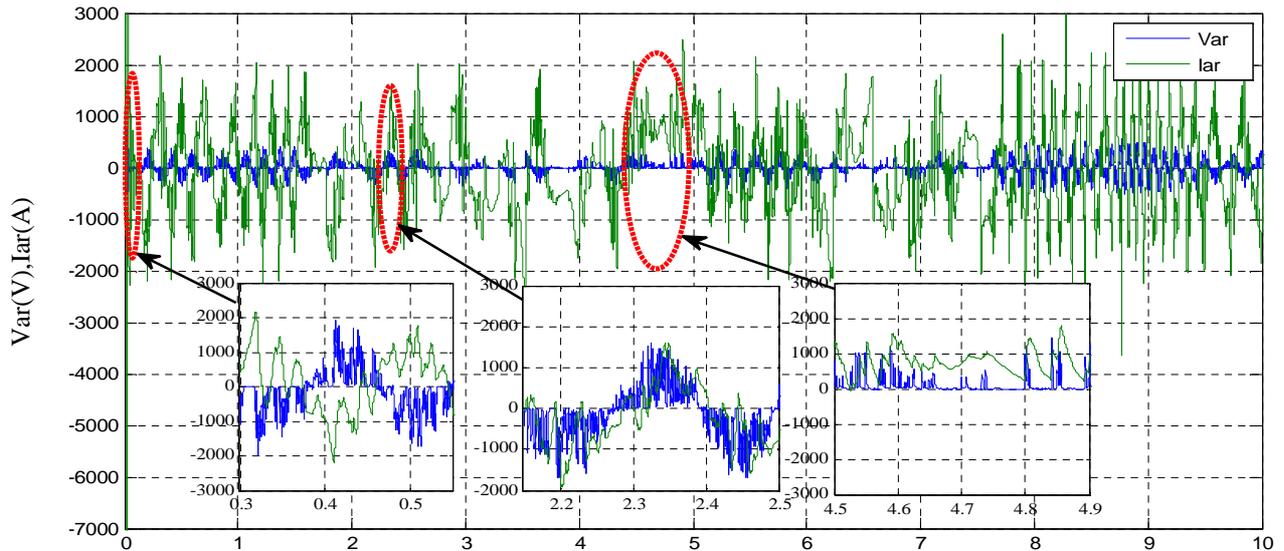


Figure (III. 20) Tension et courant rotorique (Var,Iar) t(s)

- Les figures (III.20), montre que le courant est en avance de phase d'un angle Θ de $\frac{\pi}{2} < \Theta < \pi$, ceci correspond à un glissement négatif ; et sur la période où le glissement est positif l'angle Θ entre la tension et le courant est $0 < \Theta < \frac{\pi}{2}$ et pour les valeurs de glissement nul les grandeurs rotoriques sont continues.

III.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe (d, q).

La technique de l'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

CHAPITRE 3 Contrôle de la puissance active et réactive par Des régulateurs en mode glissant

Nous avons étudié aussi les techniques de conception des régulateurs par mode glissant. En effet, la conception de ces régulateurs prend en charge les problèmes de stabilité et les performances désirées d'une façon systématique.

La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes:

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

Dans ce chapitre nous sommes intéressés aussi à la simulation et l'interprétation des résultats obtenus après l'application d'une commande non linéaire pour étudier les performances de la (MADA) dans une chaîne de production d'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent.

Les résultats obtenus, ont montrés que la technique de réglage utilisée apporte des améliorations remarquables. De plus les performances obtenues avec la commande par mode glissant sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leurs références désirées. De plus, la puissance active injectée au réseau varie en fonction de la vitesse de vent et suit la puissance de référence.

Les résultats de simulations montrent aussi que pour $g > 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice hyposynchrone. Pour $g < 0$, elle fonctionne en mode génératrice hypersynchrone, tandis que pour $g = 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice asynchrone - synchronisée. En effet, la MADA offre l'avantage de s'adapter aux variations de vitesse vent.

Conclusion Générale

Conclusion générale

le but assigné dans ce travail est de faire une étude sur un système de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique. Dans ce mémoire on a traité la commande non linéaire par des régulateur en mode glissant, la commande est appliqué sur une machine a double alimentation dans une chaine de conversion éolienne à vitesse variable.

Dans le premier chapitre, un aperçu sur l'énergie éolienne, ensuite le potentiel éolien en Algérie est présenté, les aspects constitutifs et technologiques des éoliennes, les différentes configurations des systèmes de conversion d'énergie éolienne, un aperçu sur les techniques de commande, de régulation et de l'optimisation de puissance sont d'écrites.

Le deuxième chapitre est consacré pour la modélisation de la turbine éolienne, et la génératrice asynchrone à double alimentation que nous avons choisie pour ces multiples avantages, Ensuite on a modélisé les deux convertisseurs statiques.

Dans le troisième, commençant par la description de la commande vectorielle en puissance pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, ce qui nous a permet d'avoir des équations qui relie les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations que nous avons utilisés pour sur les signaux rotoriques, puis on a exposé les bases théoriques et les fondements des régulateurs en mode glissant, ainsi que la structure d'une commande basée sur cette approche, puis on effectue la synthèse des régulateurs de puissance en mode glissant dans l'objectif de l'intégrer dans la structure de la commande non linéaire, les résultats de simulation sont exposés et discutés à la fin de chapitre. L'étude faite dans ce présent travail nous a permet de constater que :

La MADA constitue l'une des meilleurs solutions pour le choix du système de conversion éolien, et ce du à la possibilité de fonctionner pour une large plage de vitesse du vent, et Les résultats de simulations montrent, la possibilité de faire fonctionner la (MADA) dans les deux quadrants couple-vitesse. Pour $g > 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice hypo-synchrone. Pour $g < 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice hyper-synchrone et tandis que pour $g = 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice asynchrone - synchronisée. En effet, la MADA

La commande vectorielle assure un bon découplage entre les grandeurs électromagnétiques de la machine ce qui rend le comportement de la machine est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, ce qui facilite le contrôle indépendant des puissances active et réactive entre la machine et le réseau.

Les performances obtenues avec la commande par mode glissant sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leur référence désirée.

Face aux résultats obtenus, des perspectives peuvent contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif étudié

- Remplacement des onduleurs de tension par des convertisseurs matriciels.
- Tester, sur un banc expérimental, afin de valider les algorithmes proposés dans ce travail
- Combinaisons entre les différentes techniques associées à la commande par mode de glissement.
- Etude et réalisation d'une éolienne à base de la MADA.

Références
Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

[ABD 07] **A. ABDELLI** -« Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.

[AMI 08] **H. AMIMEUR** -« Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement », mémoire de magister, université de Batna, Algérie, 2008.

[B`uh86] **H. B`uhler** -« Réglage par mode de glissement », Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.

[BEN 05] **F. BENCHABANE** -« Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé a aimants permanents avec minimisation du chattering », mémoire de magister, université de Biskra, Algérie, 2005.

[BEN 12] **C. BENNOUR** -« Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, université de Biskra, Algérie, 2012.

[BOK 06] **B. BOUKHEZZAR** -« les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » thèse de doctorat en science de l'université paris XI Orsay, France, 2006.

[BOU11] **A. BOUHEDDA** -« Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne », Mémoire de magister en électrotechnique, Université de UMMTO, Algérie, 2011.

[CAM 03] **H. CAMBLONG** -« Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[CDE 11] Bulletin des Energies Renouvelables article N° 21 Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), 2011.

[CDE 15] PORTAIL.CDER .dz/spip.php? rubrique44, 2015.

[CON 16] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/cop21-conference-sur-le-climat-de-paris>, 2016.

[DAV 07] **A. DAVIGNY** -« Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.

[DEF 12] **R. DEFONTAINE**-« Etude et simulation de la MADA », Mémoire d'ingénieur, Université de Québec, Canada, 2012.

[ELA 04] **S. EL AIMANI** -« Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Co habilité avec l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1 (USTL), Lille, France, 2004.

[ENR 15] [http:// enegeia.site.voila.fr/index2.htm](http://enegeia.site.voila.fr/index2.htm), 2015.

[GHE 08] **K. GHEDAMSI** -« Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone », Thèse de doctorat ,Ecole Nationale Polytechnique, Algérie,2008.

[IDJ 10] **K. IDJDAREN** -« contribution à l'étude et la commande de la génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques Eoliennes Autonomes » Thèse de Doctorat, université de Bejaia (Algérie), université de Lille 1 (France). mai 2010.

[KER 05] **M. KERCHA** -« Commande par mode de glissement d'un moteur pas à pas à aimant permanent », Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 2005.

[LAV 05] **N. LAVERDURE** -« Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, France, 2005.

[MAG 14] <http://www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/item/38807-1-algerie-inaugure-sa-premiere-ferme-eolienne-de-10-megawatts-a-adrar.html>,2014.

[MAY 08] **M. MAYOUF** -«Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur à aimants permanents », mémoire magistère, Université de Biskra, Algérie, 2008.

[MIR 05] **A. MIRECKI** -« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.

[MSB 14] **M. MALKI, S. ALI BELARBI** -«Etude et simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (turbine +MADA+réseau) en mode continu et discret », Mémoire de master, université ABOUBKR BELKAID Tlemcen, Algérie, 2014.

[TAM 15] **A. TAMAART**-« Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA» thèse de doctorat, université, Biskra, Algérie, 2015.

[TAR 08] **S. TARAFT** -« Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, université de Bejaia, Algérie, 2008.

[TOU 15] **M K. TOUATI** -« Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique », mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2015.

[ZOU 10] **Y. ZOUAOUI** -« commande par glissant des courants statoriques de la machine asynchrone », Mémoire de magistère, université de setif, Algerie 2010.

ANNEXES

Annexe A

Le correcteur considéré a pour expression (figure A-1).

$$C_{em-ref} = (k_p + \frac{K_i}{p})(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (A.1)$$

k_p, k_i sont respectivement le gain intégral et le gain proportionnel du correcteur.

La fonction de transfert est déterminée de la même manière que la précédente.

$$F(p) = \frac{k_p p + k_i}{j p^2 + (f + k_p) p + k_i} \quad (A.2)$$

$$F(p) = \frac{p}{j p^2 + (f + k_p) p + k_i} \quad (A.3)$$

Pour atténuer l'action du couple éolien C_g , il faut que le paramètre k_i soit élevé.

Comme précédemment, Les paramètres (k_p, k_i) sont déterminés de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle ω_n et un coefficient d'amortissement ξ définis comme suit :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_i}{j}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{f + j + k_p}{k_i} \frac{\omega_n}{2} \quad (A.4)$$

Donc les paramètres k_i et k_p sont déterminés comme suit :

$$k_i = \omega_n^2 j \quad \text{et} \quad k_p = \frac{2 k_p \xi}{\omega_n} - f - j \quad (A.5)$$

Pour un coefficient d'amortissement ζ et un temps de réponse t_r imposés en boucle fermée, on considère la fonction anticipatrice suivante (figure A.1):

$$F'(p) = \frac{j p^2 + (f + k_p) + k_i}{(k_p p + k_i) (\frac{t_r}{3} p + 1)} \quad (A.6)$$

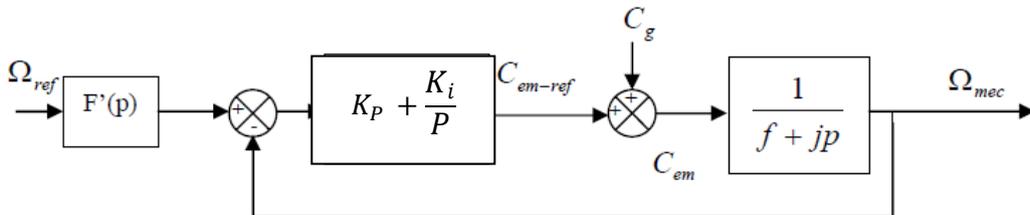


Figure (A.1) Schéma bloc du correcteur PI avec anticipation

$Kp= 3150, Ki=81000 ;$

Annexe B

➤ Paramètres de la turbine

$$R = 36 \text{ m ;}$$

$$\text{Nombre de pales}=3 \text{ ;}$$

$$G= 90 \text{ ;}$$

$$\rho=1.225 \text{ ;}$$

$$f= 0.0024 \text{ N.m.s/rd;}$$

$$J_{\text{turbine}}=90$$

➤ Paramètres de la MADA

$$P_n= 1.5 \text{ Mw}$$

$$R_s = 0.012\Omega \text{ ;}$$

$$R_r = 0.021\Omega \text{ ;}$$

$$L_s = L_r = 0.0137 \text{ H ;}$$

$$M = 0.0135 \text{ H ;}$$

$$J = 50 \text{ kg.m}^2 \text{ ;}$$

$$P = 2 \text{ ;}$$

$$f = 0.0071 \text{ N.m.s/rd;}$$

$$V_s= 690 \text{ (V) ;}$$