

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Telidji – Laghouat
Faculté de Technologie
Département Electronique



Mémoire de Master

pour l'Obtention du diplôme de :

Master en Automatique

Option :

Automatique et informatique industrielle

Présenté par :

Benhaila younes abdelkader

Thème :

Etude et commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production de la puissance active et la correction du facteur de puissance

Soutenu publiquement le/10/2020 devant le jury composé de :

ABOUCHABANA Nabil	MCB	Président
BELKHIRI Mohammed	Pr	Examineur
BOUTOUBAT Mohammed	Pr	Encadrant

Année Universitaire 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

و الصلاة والسلام على رسول

الله

« وقل رب زدني علما »
"طه 144"

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance
 - A mes sœurs et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.
 - A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.
 - A tous mes professeurs qu'ils m'ont appris durant toutes mes années d'étude
 - A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès
- A tous ceux que j'aime

Remerciement

Nous remercions Dieu, le tout puissant, Dieu qui nous a donné la force, patience, volonté et surtout raison.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs

Remerciements à mon encadreur, le professeur **Boutoubat**

Mohamed pour avoir d'abord proposé ce thème, et lui

exprime mes gratitudes, pour la disponibilité et la patience

dont il a fait preuve et dont les précieux conseils et les

remarques pertinentes et pour son suivi continué tout le

long de la réalisation de ce mémoire dans les meilleures

conditions.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble

Des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger ce

travail.

Sommaire	Pages
Dédicaces	
Remercîment	
Sommaire	
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENRGIE EOLIENNE	
I.1INTRODUCION.....	5
I.2. HISTORIQUE DE L'EOLIEN.....	5
I.3 CAPACITE MONDIALE DES EOLIENNES	6
I.4 CAPACITE DES EOLIENNES EN ALGERIE	7
I.5 PRINCIPES ET ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'EOLIEN.....	9
I.5.1 Définition de l'énergie éolienne.....	9
I.5.2 Descriptif d'une éolienne.....	10
I.5.3 Principaux composants d'une éolienne	11
I.6 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNEES	13
1.6.1 Eolienne à axe horizontal.....	13
I.6.2 Eoliennes à axe vertical.....	14
I.7 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	15
I.7.1 Avantages	15
I.7.2 Inconvénients.....	16
I.8 ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE.....	16
I.8.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe.....	18
I.8.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable.....	19
I.8.3 La machine asynchrone à cage.....	20
I.8.4 Machine asynchrone à double alimentation.....	21

I.8.5 Machine synchrone.....	22
I.9 GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.....	24
I.9.1 structure de la machine asynchrone à double alimentation.....	24
I.9.2 Mode de fonctionnement de MADA.....	25
I.9.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	25
I.9.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	25
I.9.2.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	26
I.9.2.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	26
I.9.3 Application des machines asynchrones à double alimentation.....	27
I.9.3.1 Application moteur.....	27
I.9.3.2 Application génératrice.....	27
I.10 APPLICATION DE LA GADA DANS LE DOMAINE EOLIEN.....	28
I.11 CONCLUSION.....	29

CHAPITRE II :

MOELISATION DU SYSTEME EOLIEN ETUDIE

II.1 INTRODUCTION.....	31
II.2 DESCRIPTION ET MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE DE L'EOLIENNE.....	31
II.3 ZONES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME EOLIEN.....	34
II.3.1 CARACTERISTIQUE PUISSANCE –VITESSE.....	34
II.4 PUISSANCE AERODYNAMIQUE ET COEFFICIENT DE PUISSANCE.....	36
II.4.1 Loi de Betz.....	36
II.4.2 PUISSANCE MECANIQUE CAPTEE PAR L'EOLIENNE.....	39
II.4.3 PRODUCTION OPTIMALE D'ENERGIE.....	40
II.5 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA)	42

II.5.1 Modèle naturel de la MADA.....	43
II.5.2 Transformation du système triphasé en système biphasé.....	45
II.6 MODELISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES DE LA CHAINE ROTORIQUE.....	48
II.6.1 Modélisation du convertisseur du côté machine.....	49
II.6.2 Modélisation du convertisseur du côté réseau.....	51
II.7 CONCLUSION.....	54

Chapitre III :

STRATEGIES DE COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN

III .1 INTRODUCTION.....	56
III.2 STRATEGIES DE COMMANDE DE LA MADA.....	57
III.3 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA PAR ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE.....	58
III.3.1 principe de la commande vectorielle.....	58
III.3.2 Modèle interne de la MADA avec orientation du flux statorique....	60
III.4 Techniques de commande à MLI.....	63
III.4.1 principe de la MLI à hystérésis de courant.....	63
III.5 STRATEGIE DE COMMANDE APPLIQUEES OU SYSTEME.....	65
EOLIEN	
III.5.1 Stratégies de commande appliquées au CCM.....	65
III.5.2 Stratégies de commande appliquées au CCR.....	72
III.6 CORRECTION DU FACTEUR DU PUISSANCE.....	79
III .7 CONCLUSION.....	82

Liste des Symboles et Abréviations

SCE : Système de Conversion Eolien

GTO : Gate Turn-Off Thyristor.

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

GADA : Générateur asynchrone à double alimentation

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

CCM : Convertisseur côté Machine Asynchrone à Double Alimentation.

CCR : convertisseur côté réseau.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel Intégral.

J_w, J_G : Les moments d'inertie de la turbine et générateur respectivement.

f_w, f_G : les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement.

Ω_g, Ω_t : Les vitesse de la turbine et de la génératrice.

G : Le gain de Multiplicateur.

C_{aer}, C_{emg} : sont respectivement le couple aérodynamique de la turbine et le couple électromagnétique du générateur.

G : Le gain de Multiplicateur.

β : L'angle de calage des pales.

J_{tot} : L'inertie totale de l'éolienne.

f_t : Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne.

P_{aer} : La puissance aérodynamique.

λ : La vitesse spécifique de la turbine.

Liste des Symboles et Abréviations

R : Rayon des pales

$[u_{abc}]$: Le vecteur des tension statorique.

$[i_{sabc}]$: Le vecteur des courants statoriques .

$[\Psi_{abc}]$: Le vecteur des flux statoriques .

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[L_s]$: La matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: La matrice des inductances rotoriques.

$[A_s]$: La matrice de Park.

$[R_r]$: Matrice résistance rotorique.

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

u_{ds}, u_{qs} : les tensions statoriques directes et en quadrature du système diphasé.

u_{dr}, u_{qr} : les tensions rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

i_{ds}, i_{qs} : Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.

i_{dr}, i_{qr} : Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.

Ψ_{qs}, Ψ_{ds} : les flux statoriques directs et en quadrature du système.

Ψ_{dr}, Ψ_{qr} : les flux rotoriques directs et en quadrature du système.

ω_s, ω_r : Pulsation statorique et rotorique.

c_{em} : Le couple électromagnétique du la machine.

A : La matrice d'état

B : la matrice de commande

τ_s, τ_r : Les constantes de temps électrique statorique et rotorique de la MADA.

Liste des Symboles et Abréviations

σ : le coefficient de dispersion de Blondel.

P_s, Q_s : les puissance active et réactive statoriques de la MADA.

P_r, Q_r : les puissances active et réactive rotorique

Liste des figures

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENRGIE EOLIENNE

Figure (I.1) : Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.....	7
Figure (I.2): Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).....	8
Figure (I.3): Principaux organes du système de conversion éolienne.....	9
Figure (I.4): Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	10
Figure (I.5): Différentes parties d'une éolienne.....	13
Figure (I.6): Éolienne à axe horizontal.....	14
Figure (I.7): Technologie éolienne à axe vertical.....	15
Figure (I.8): Evolution de la configuration électrique.....	18
Figure (I.9): Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.....	19
Figure (I.10): Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.....	20
Figure (I.11) : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	21
Figure (I.12) : Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.....	21
Figure (I.13) : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.....	24
Figure (I.14): Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.....	24

Figure (I.15): Modes de fonctionnement de la MADA.....26

Figure (I.16): Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.....28

CHAPITRE II :

MOELISATION DU SYSTEME EOLIEN ETUDIE

Figure (II.1): Schéma de la turbine éolienne connectée à la génératrice.....32

Figure (II.2): Modèle mécanique du système éolien.....33

Figure (II.3): Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.....35

Figure (II.4): Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....37

Figure (II.5): Coefficient de puissance.....38

Figure (II.6): Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales.....38

Figure (II.7): Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....40

Figure (II.8): Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....41

Figure (II.9): Interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau.....42

Figure (II.10): Représentation géométrique de la MADA.....43

Figure (II-11) : Schéma synoptique électrique du système éolien étudié.....49

Figure (II-12) : Schéma électrique du convertisseur du coté de la machine.....50

Figure (II-13) : Schéma électrique du convertisseur du coté du réseau.....52

Chapitre III :

STRATEGIES DE COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN

Figure (III.1): Orientation du flux statorique sur l'axe d 60

Figure (III.2) : Schéma bloc interne de la MADA.....62

Figure (III.3) : Contrôleur hystérésis d'un bras de l'onduleur.....64

Liste des figures

Figure (III.4) : Commande par hystérésis de courant.....	64
Figure (III.5) : Schéma synoptique électrique du système éolien étudié.....	65
Figure (III.6) : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique $c_p(\lambda)$	66
Figure (III.7) : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la vitesse de la MADA.....	67
Figure (III.8) : Structure de la commande à hystérésis de courant du MADA.....	69
Figure (III.9) : Allure de la vitesse de vent.....	70
Figure (III.10) : Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).....	71
Figure (III.11) : Allure du coefficient de puissance (c_p).....	71
Figure (III.12) : Allure de la vitesse spécifique (λ).....	72
Figure (III.13) : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.....	75
Figure (III.14) : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).....	75
Figure (III.15) : Allure de la tension du bus continu (V_{dc})(V).....	77
Figure (III.16) : Courant de la phase A (i_{ag}) et le courant référence (i_{agref}).....	77
Figure (III.17): Allure de la tension de la phase (V_a) et son courant correspondant (i_a).....	78
Figure (III.18) : Allures des puissances active (P_s)(W) et réactive (Q_s)(VAr).....	79
Figure (III-19) : Schéma de commande du système éolien pour la correction du facteur de puissance.....	80
Figure (III.20) : Allure des puissances réactives (VAr).....	82

Introduction générale

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. L'industrie éolienne est sur le point de devenir une industrie énergétique mondiale si on se base sur l'accélération des installations dans les dernières décennies.

Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie non polluantes.

Le développement de l'énergie éolienne connaît un essor important vu la diversité des zones exploitables et aux coûts relativement intéressants [5]. Les systèmes éoliens se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. De plus, le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur dans l'avenir.

Les domaines de recherche sur l'énergie éolienne sont nombreux et divers. En particulier, les chercheurs s'intéressent à :

- améliorer la conception et la disposition des parcs éoliens ;
- augmenter la fiabilité, l'accessibilité et l'efficacité des éoliennes ;
- optimiser la maintenance, l'assemblage et l'installation des turbines ;
- réaliser des prototypes pour les grandes éoliennes et l'interconnexion des parcs éoliens ;
- identifier de nouvelles méthodes de gestion du réseau pour permettre l'intégration d'un grand système d'énergie éolienne.

Généralement, les éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable comme dans le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette dernière reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise

Introduction générale

au réseau électrique selon un mode de fonctionnement à vitesse variable [6]. Grâce à l'accessibilité au stator et au rotor, la GADA est devenue une solution attrayante qui offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour sa commande. Ainsi, elle a fait l'objet de nombreuses recherches qui portent sur les différents aspects de conception, de modélisation, d'analyse et de commande. Dans ce mémoire, nos travaux concernent le fonctionnement en mode génératrice, principalement au niveau de la modélisation et de la conception de la commande associée. Bien que la GADA ait plusieurs avantages par rapport au rendement et à la puissance (élevée), son fonctionnement demeure complexe en raison des multiples phénomènes et grandeurs du système d'intégration de la machine.

La GADA peut fonctionner en mode moteur ou en mode génératrice. La différence avec une machine asynchrone à cage réside dans le fait que, pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou génératrice, d'où son nom de machine généralisée. En effet, la machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en mode moteur et au dessus de cette vitesse pour être en mode génératrice.

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude et la commande d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA afin d'injecter la puissance maximale produite par la turbine éolienne dans le réseau électrique avec un facteur de puissance désiré. En effet, elle est commandée d'une part pour fonctionner en mode MPPT, et d'autre pour la correction facteur de puissance du côté réseau électrique.

La présentation de ce travail est organisée en trois chapitres détaillés comme suit:

Dans **le premier chapitre** nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous Donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, Ensuite, les différentes associations machine-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation seront étudiées.

Le second chapitre est dédié à l'étude des éléments essentiels de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (voilure) et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible sont développés dans ce chapitre et ensuite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation clôturera ce chapitre.

Le troisième chapitre est réservé au développement des différentes stratégies de commande appliquées aux différents convertisseurs pour faire fonctionner le système éolien en mode MPPT afin d'extraire le maximum de puissance du vent. La commande de l'onduleur permettra d'injecter la puissance maximale produite dans le réseau électrique.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale sur les travaux réalisés et nous avancerons quelques perspectives pour donner une suite fructueuse à ce travail dans le futur.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENRGIE EOLIENNE

I.1 INTRODUCTION

Depuis l'évènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des capteurs éoliens (aéromoteurs) a connu une évolution considérable surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

Dans ce chapitre, nous allons énoncer un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2. HISTORIQUE DE L'EOLIEN

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Paul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans

les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes du monde sont de fabrication Hollandaise).

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [7].

I.3 CAPACITE MONDIALE DES EOLIENNES

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde. Voir tableau 1.1 qui représente l'évolution de la capacité mondiale de production d'énergie éolienne de 1997 ~2015. C'est le secteur électrique dynamisé qui enregistre la croissance la plus forte augmentation en termes de capacité. Des installations record d'énergie éolienne dans le monde ont été effectuées en 2015.

Bien devant les installations photovoltaïques et les centrales à charbon les installations d'énergie éolienne constituent près de 44,2% du total des nouvelles capacités électriques installées dans l'Union électrique [8]. Fin 2015 (voir figure 1.1), l'énergie éolienne installée constitue près de 432.4 GW plus de 63.0 GW par rapport à l'année 2014. Avec en tête la Chine, les États-Unis et l'Allemagne, dont 33.6% en Chine, 17,2% aux États-Unis et 10,4% en Allemagne (voir le tableau 1.2). Vu que la Chine est dotée d'une loi sur les énergies renouvelables et d'un plan national d'action pour le contrôle de la pollution, ces mesures ont aidé la Chine à passer de 0.352 GW de capacité éolienne en 2000 à une capacité de 120 GW en 2015.

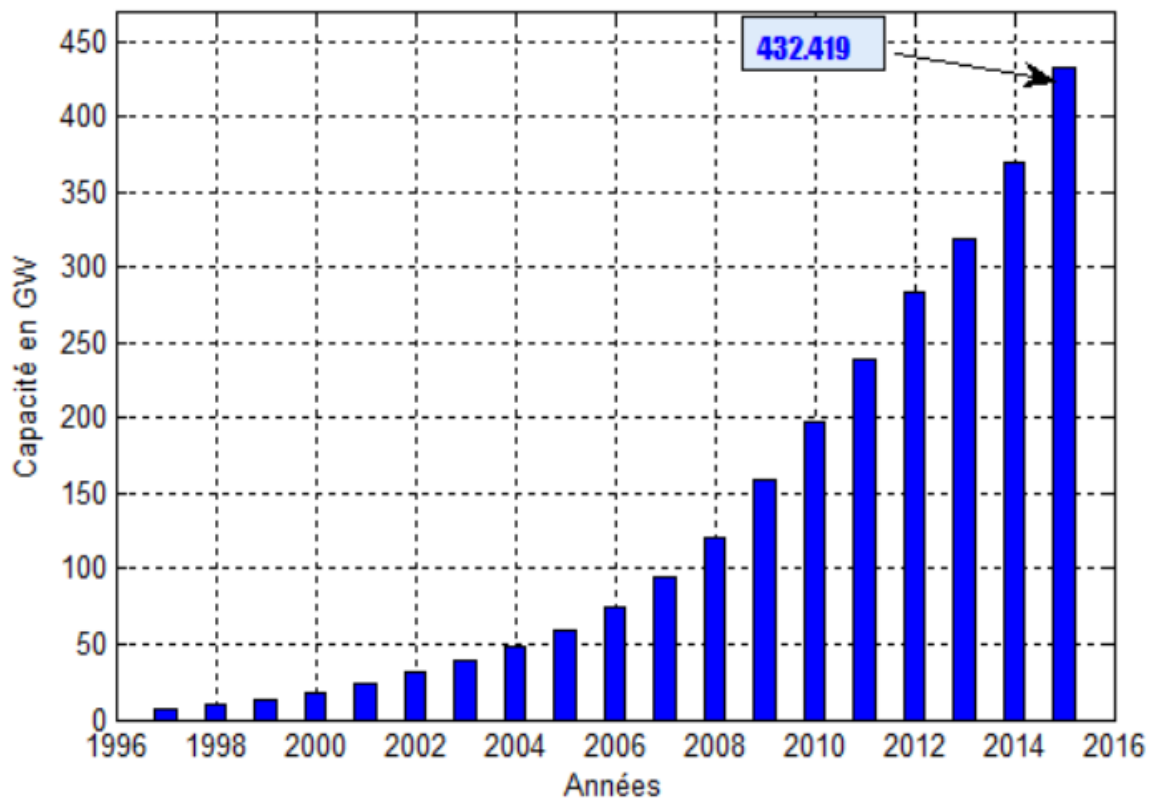


Figure (I.1): Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.

I.4 CAPACITE DES EOLIENNES EN ALGERIE

En Algérie, la première tentative de raccorder des 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 [8]. 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 racheté par Electricité et Gaz d'Algérie. La deuxième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fut en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 mètres avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables.

Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée 5010 MW pour l'éolien pour la période 2015-2020, il est programmé de réaliser 1GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux fermes éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre de 20MW à Khenchela. Le nouvel Atlas éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un important potentiel. Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m (voir figure 1.2).

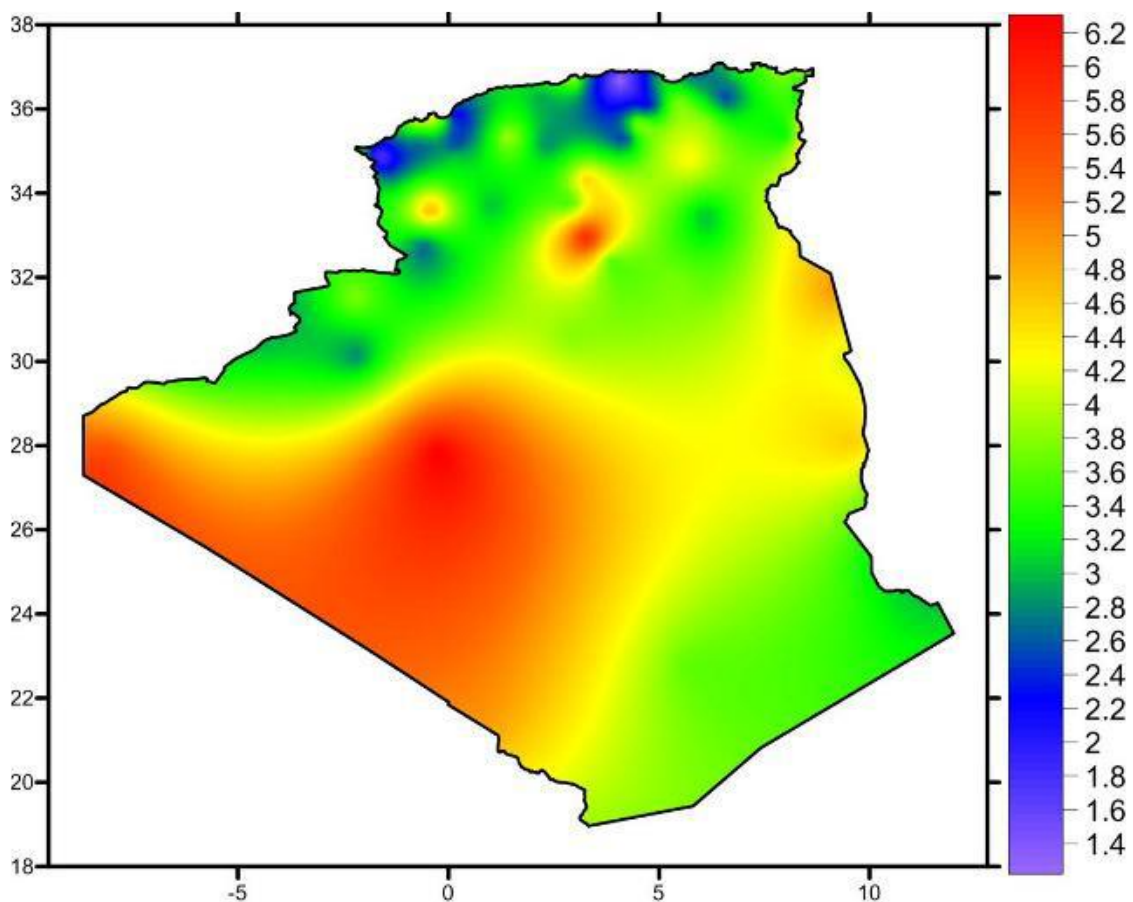


Figure (I.2): Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

I.5 PRINCIPES ET ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'EOLIEN

I.5.1 Définition de l'énergie éolienne

Le SCE (Système de Conversion Eolien), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. 1.3).

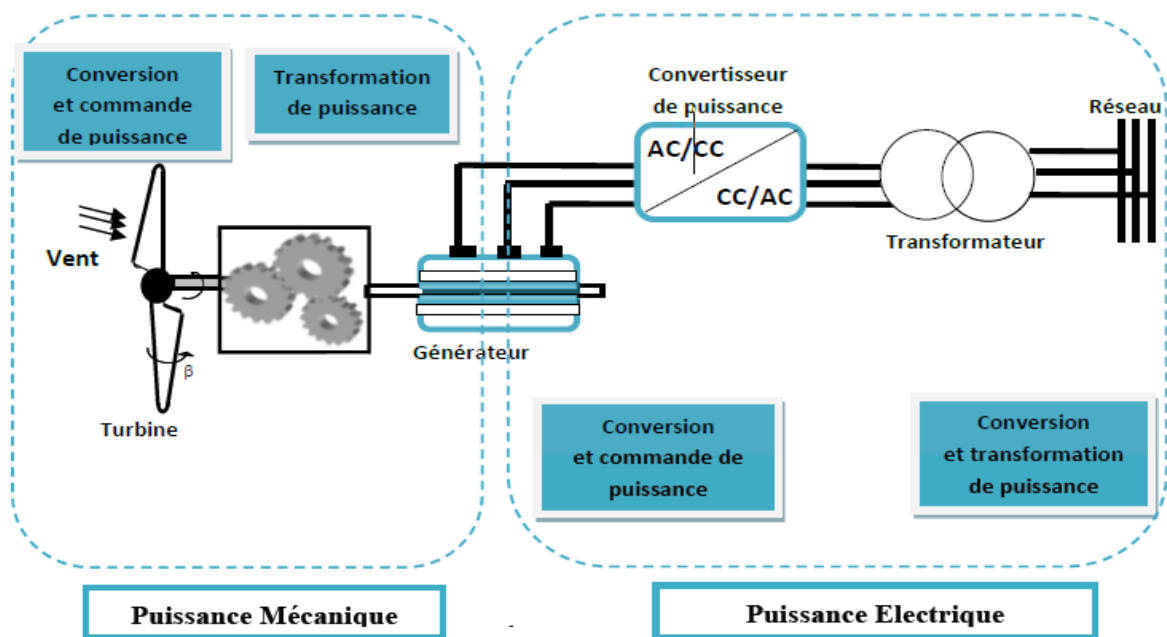


Figure (I.3): Principaux organes du système de conversion éolienne

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe,

nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [9].

I.5.2 Descriptif d'une éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique.

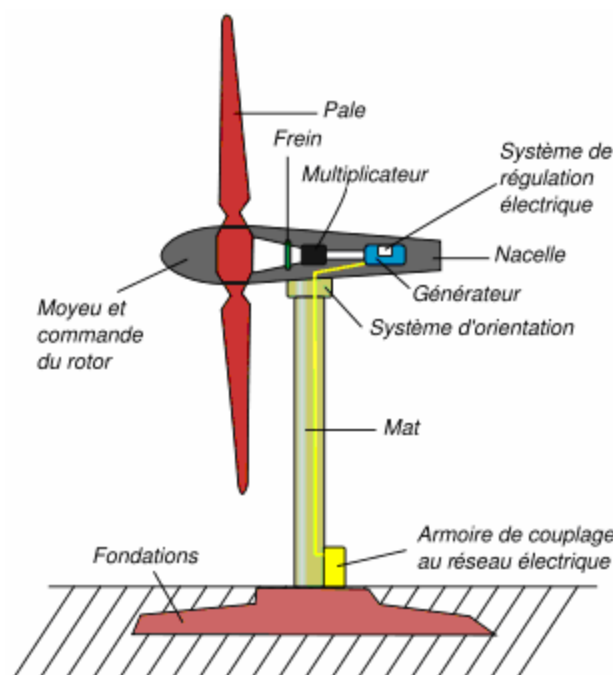


Figure (I.4): Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des fondations...Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur...

Pour qu'une éolienne produise...Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins,

Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée.

Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques.

Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [10].

I.5.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3) a nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

La tour est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur et les systèmes électriques d'orientation des pales.

Le rotor 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.

Une armoire de commande Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

Un multiplicateur de vitesse l'objective augmente ou diminuant la vitesse.

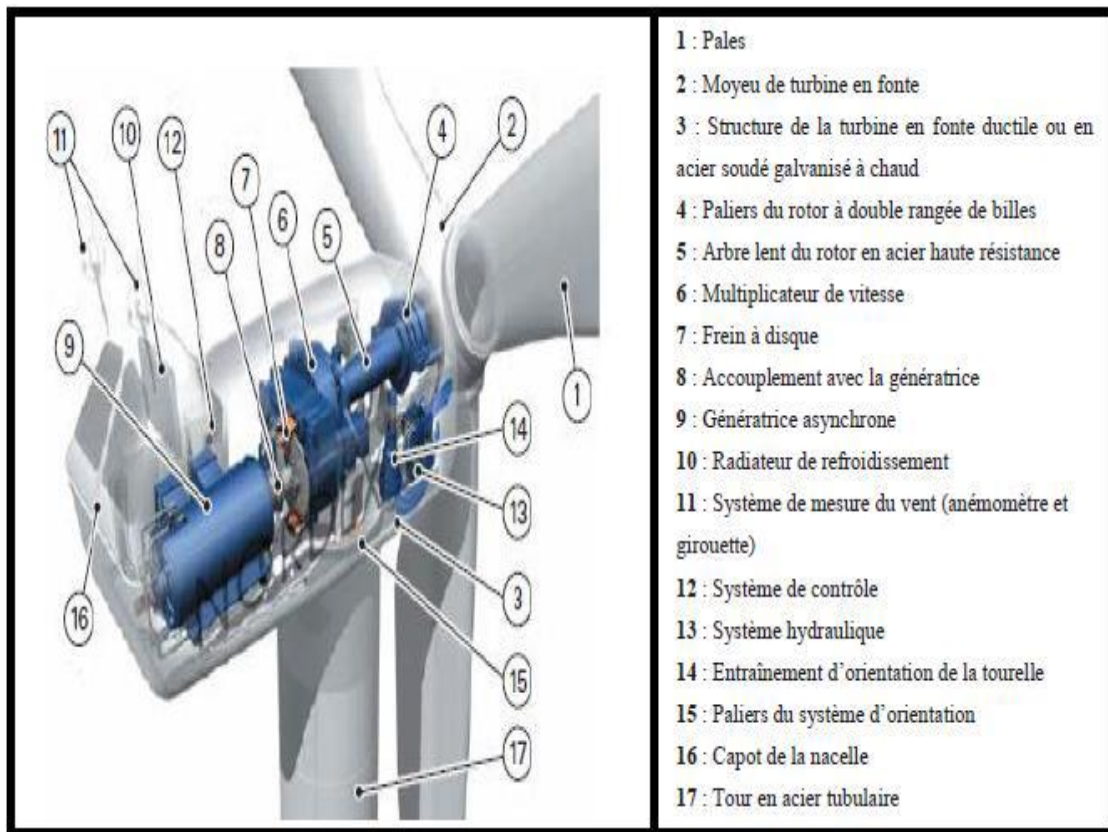


Figure (I.5): Différentes parties d'une éolienne [11]

I.6 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

1.6.1 Eolienne à axe horizontal

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



(a) Éoliennes trois pales

(b) Éoliennes deux pales

Figure (I.6): Éolienne à axe horizontal.

I.6.2 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieux possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes classiques à axe horizontal (voir figure I.7). Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h et quel que soit leur direction.[8]

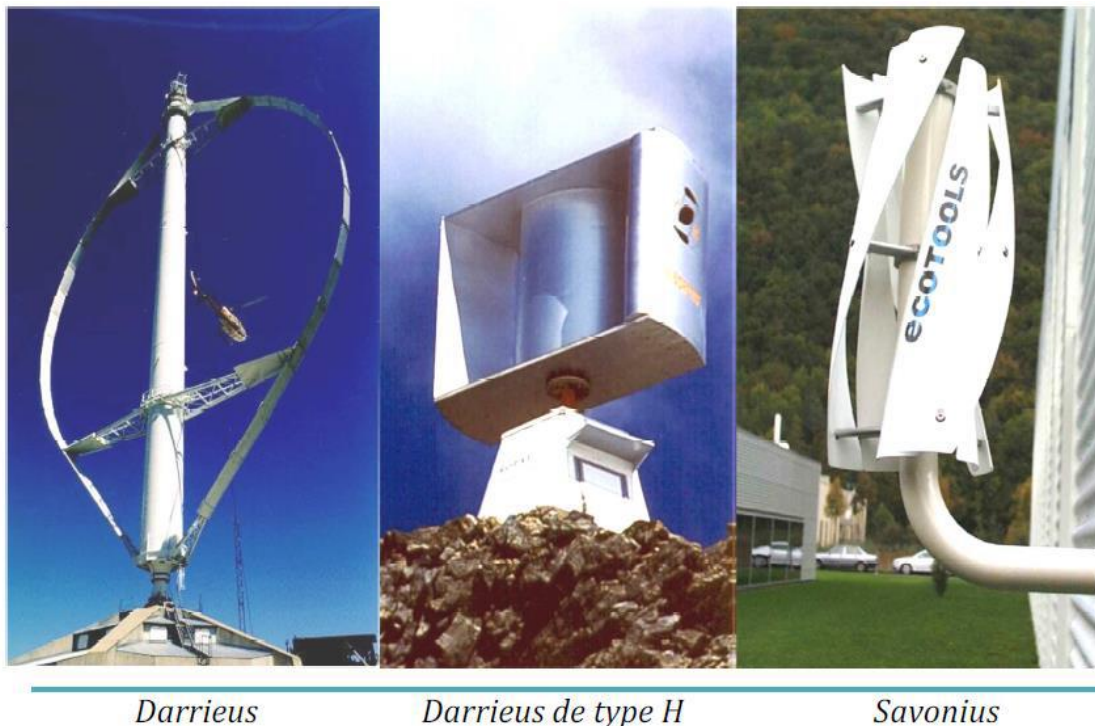


Figure (I.7): Technologie éolienne à axe vertical.

I.7 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.7.1 Avantages

« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables

I.7.2 Inconvénients

- L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux.

- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.

- Le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé par rapport aux sources d'énergie classiques.[11]

I.8 ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées. Dans le paragraphe suivant, nous développerons plus en

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

détail les caractéristiques et les performances de chacun de ces deux types de machines dans diverses configurations [12].

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil.

C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance. Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux.

L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important. Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des générateurs asynchrones doublement alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans ce mémoire [13].

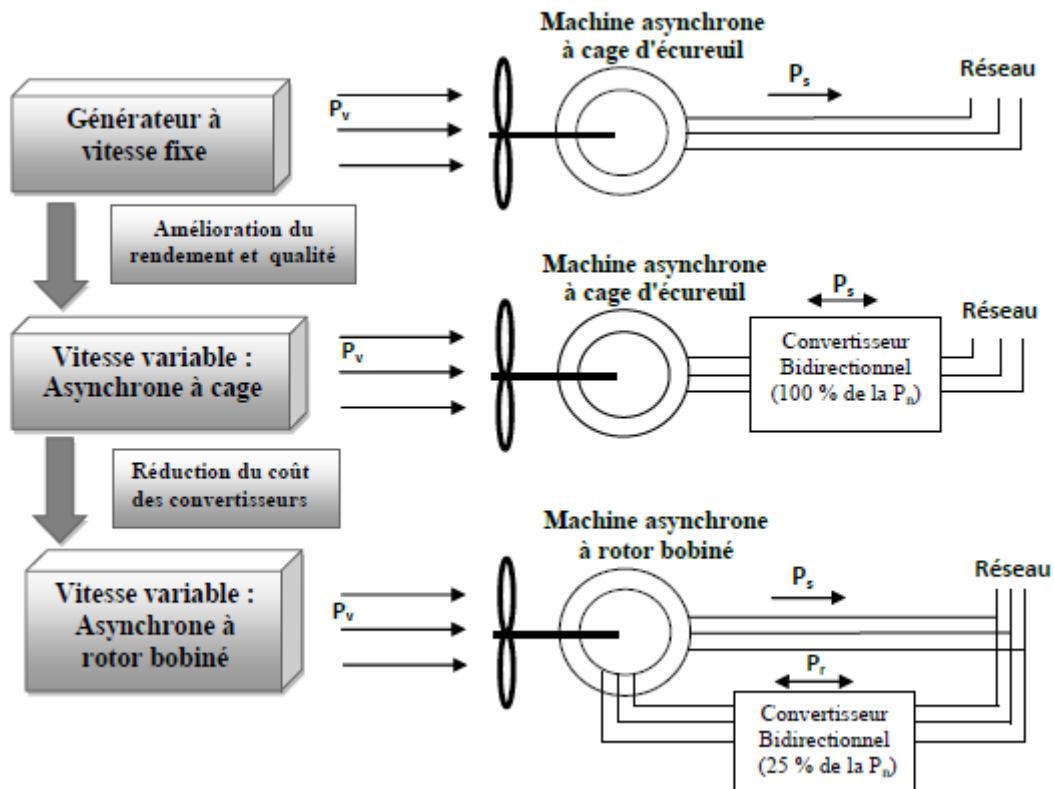


Figure (I.8): Evolution de la configuration électrique.

I.8.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe

Dans le premier cas (Figure 1.9), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seules les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [13].

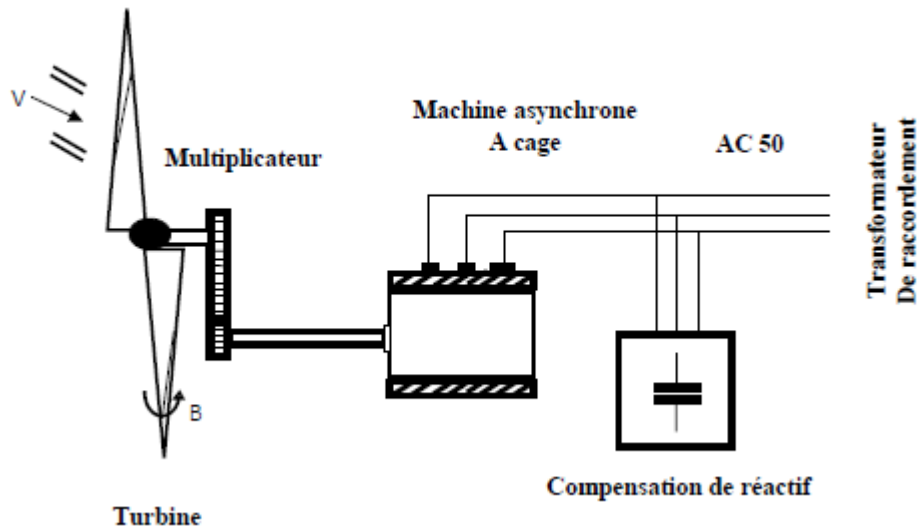


Figure (I.9): Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

I.8.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable

Dans le deuxième cas (Figure 1.10), une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable.

Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la génératrice électrique [13].

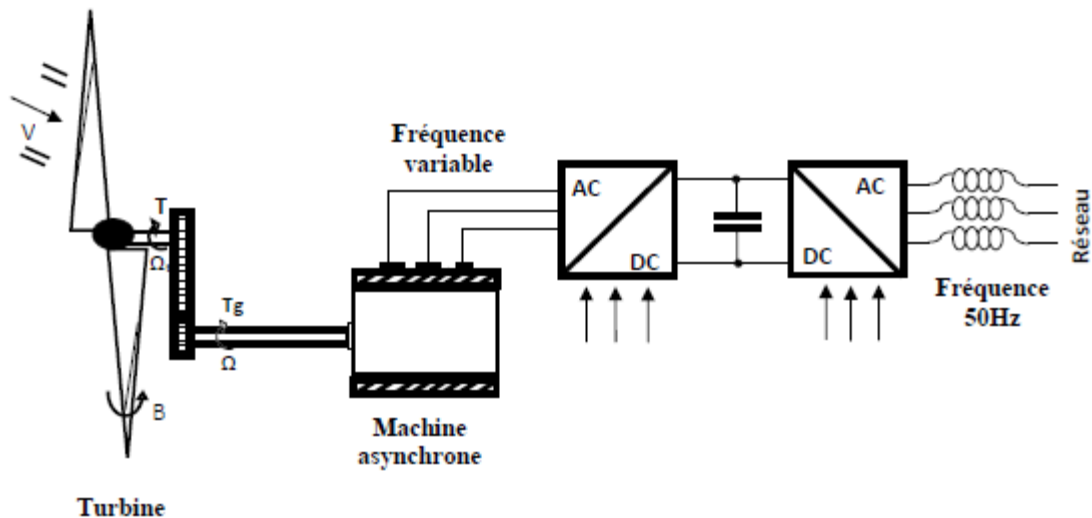


Figure (I.10) : Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

I.8.3 La machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la figure (I.9).

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais elle est globalement coûteuse. En effet, le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée car elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation.

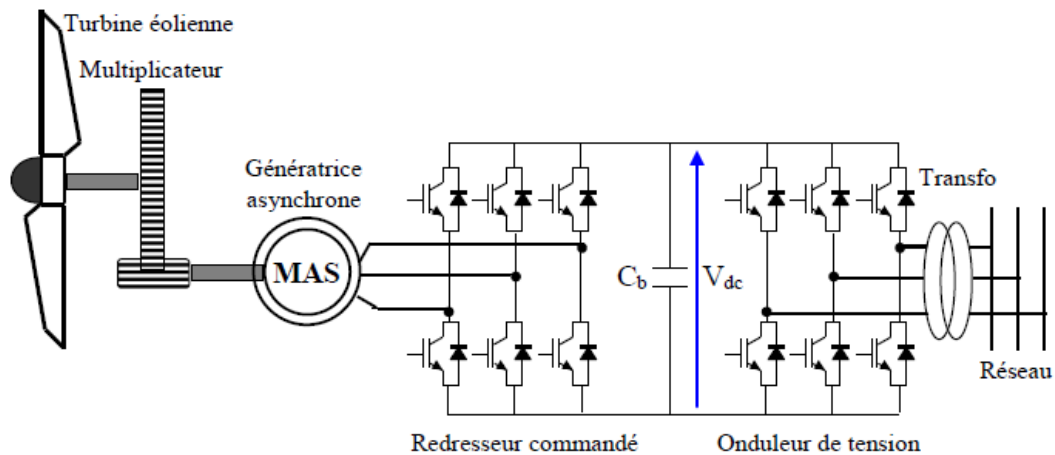


Figure (I.11) : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.8.4 Machine asynchrone à double alimentation

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

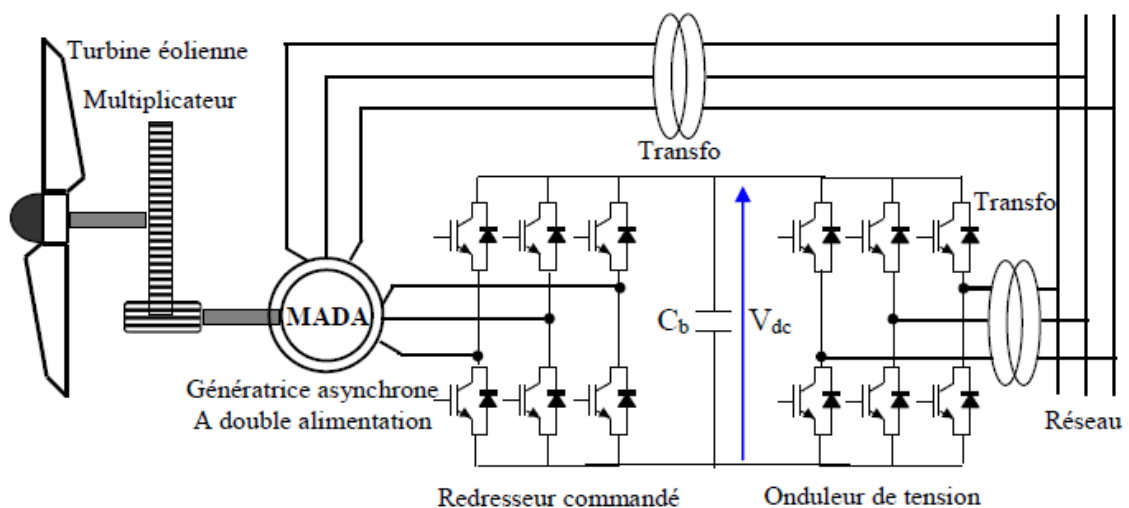


Figure (I.12) : Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure (I.12)). Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse.

C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

I.8.5 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. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles). Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement.

Les éoliennes basées 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. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles. Le

CHAPITRE I: Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

développement des aimants permanents en terres rares permet de s'affranchir de ces inconvénients et de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables.

Comme dans le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. De plus, le redresseur peut être non commandé (à diodes) ou commandé.

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure (I.13)). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé 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. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [12].

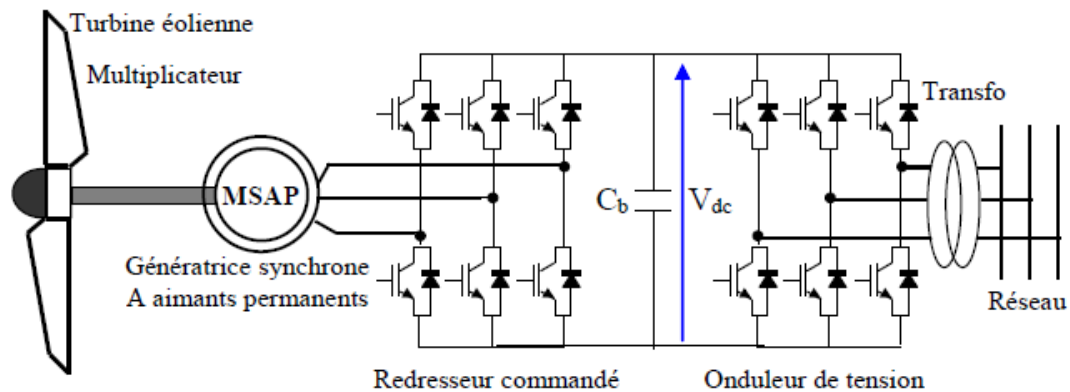


Figure (I.13) : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

I.9 GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

I.9.1 structure de la machine asynchrone à double alimentation

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

On peut voir sur la figure I.14 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.[16]

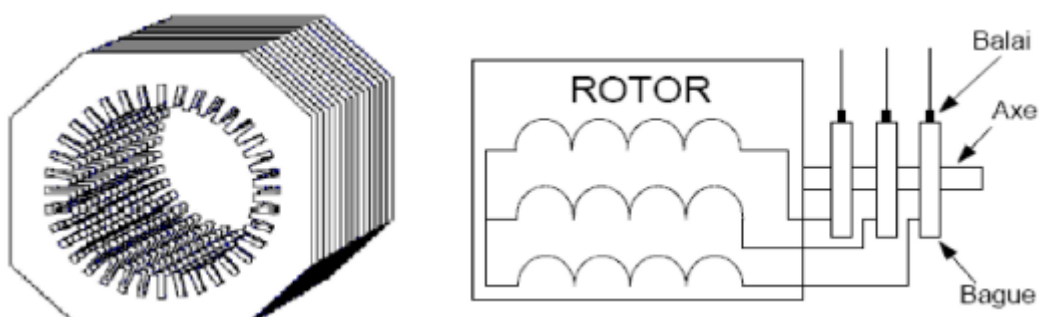


Figure (I.14): Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.

I.9.2 Mode de fonctionnement de MADA

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [8]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

I.9.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur,
- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme,
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Figure. I-15.a),

I.9.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur,
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au dessus de la vitesse de synchronisme e
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator. (Figure. I-15.b),

I.9.2.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique P_m à La machine.
- une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

(Figure. I-15.c),

I.9.2.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance correspondant à $\frac{S}{1-S} P_m$ est transmise par l'intermédiaire

du rotor. (Figure. I-15.d),[14]

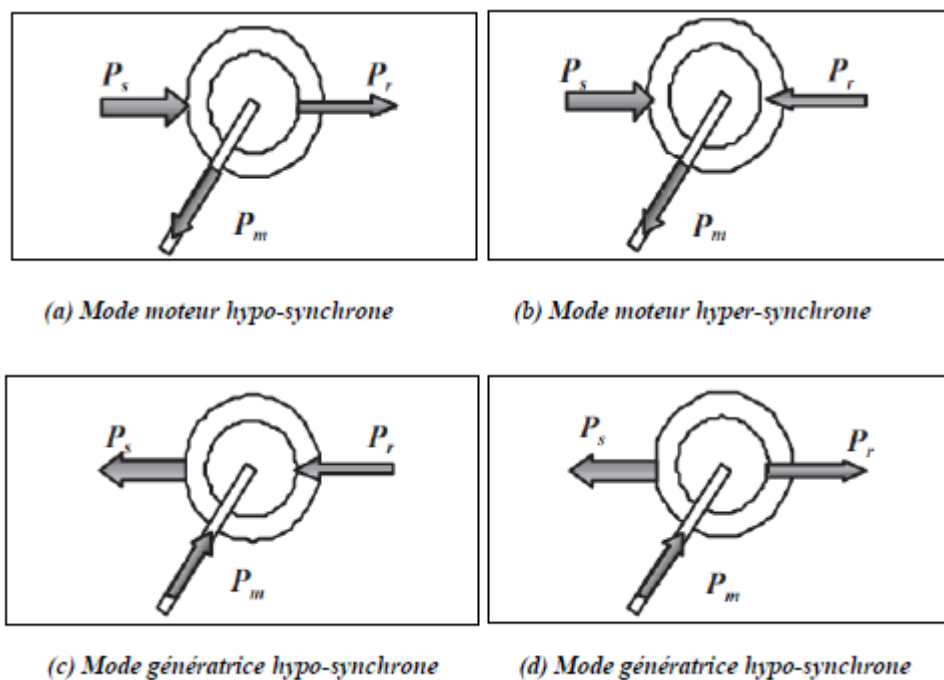


Figure (I.15): Modes de fonctionnement de la MADA.

I.9.3 Application des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications

soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

I.9.3.1 Application moteur

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

I.9.3.2 Application génératrice

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la GADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

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

I.10 APPLICATION DE LA GADA DANS LE DOMAINE EOLIEN

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance.

La GADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine.

Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau)[14],

(figure 1.16).

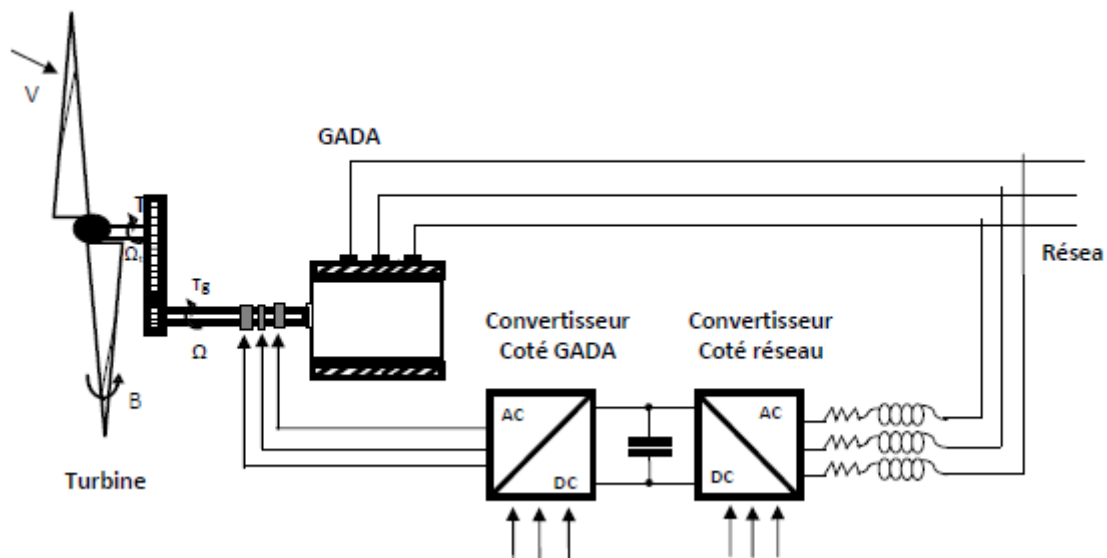


Figure (I.16): Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

I.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref aperçu historique sur l'énergie éolienne et les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements.

Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variables offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base de ce travail.

CHAPITRE II

MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN ETUDIE

II.1 INTRODUCTION

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement.[17]

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne équipé d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Effectivement, dans premier temps, nous allons établir le modèle de la turbine, dans un deuxième temps, on va s'intéresser à la modélisation de la MADA et les différents convertisseurs associés au système éolien.

Enfin, ce chapitre sera clôturé, par la description et la modélisation des différents convertisseurs utilisés dans la chaîne éolienne étudiée.

2.2 DESCRIPTION ET MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE DE L'EOLIENNE

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω_{turbine} , relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraine une génératrice électrique (Figure **II.1**) [18].

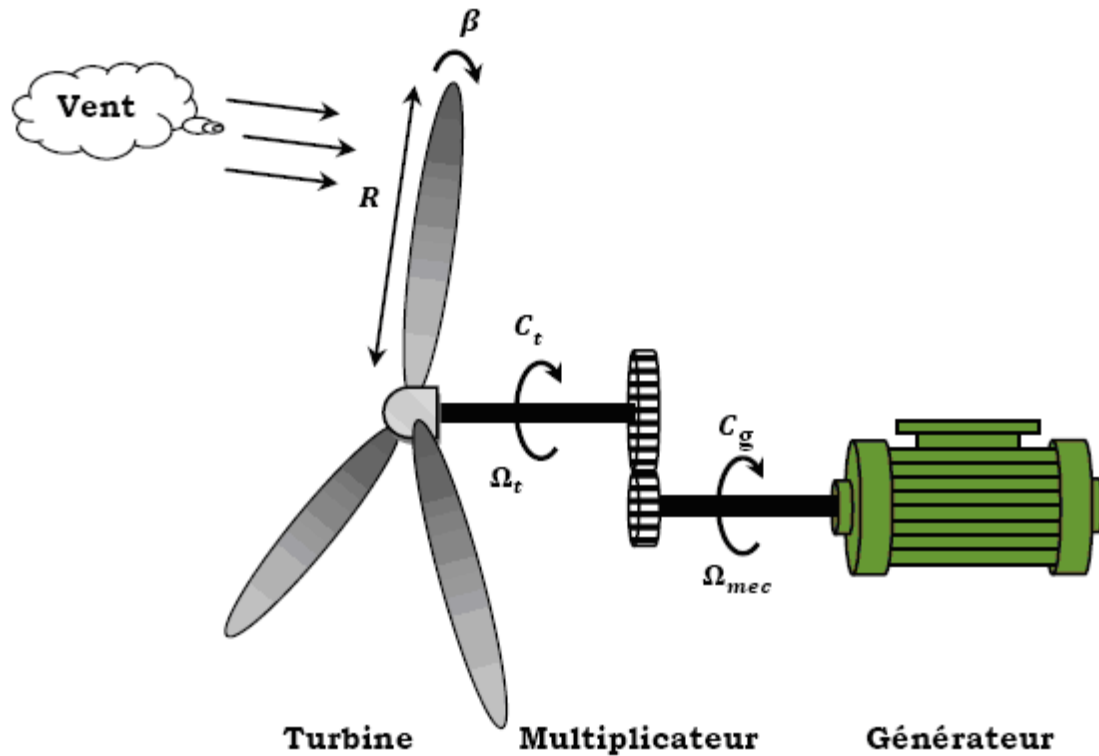


Figure (II.1): Schéma de la turbine éolienne connectée à la génératrice.

Pour pouvoir établir un modèle mathématique simple de la turbine, des hypothèses simplificatrices seront considérées à savoir :

- Les pales seront supposées à conception identique avec les même paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui nous permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul système caractérisé par un seul moment d'inertie et un seul coefficient de frottement [1]

Ainsi le modèle mécanique obtenu du système éolien est schématisé par la figure suivante :

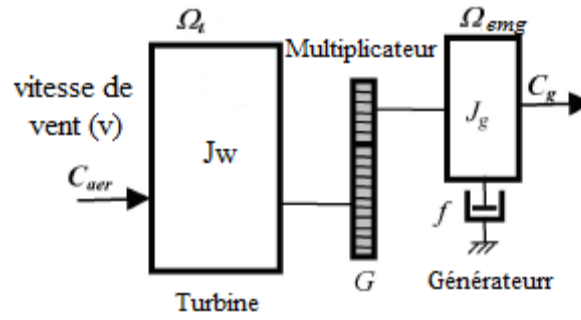


Figure (II.2): Modèle mécanique du système éolien.

Où :

- J_w et J_g sont les moments d'inertie de la turbine et générateur respectivement ;
- f_w et f_G sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement ;
- C_{aer} , C_{emg} sont les respectivement le couple aérodynamique de la turbine et le couple électromagnétique du générateur ;
- Ω_t , Ω_g sont respectivement les vitesse de la turbine et de la génératrice ;
- G c'est le gain de Multiplicateur.

Le multiplicateur de vitesse sert à adapter la vitesse lente (Ω_t) de la turbine à la vitesse rapide (Ω_g) de la générateur. Généralement, les multiplicateurs des systèmes éoliens comportent deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettent d'obtenir des rapports de multiplicateur de l'ordre désiré .Notons que Les différents engrenages mécaniques sont à l'origine du bruit sonore et de pertes mécaniques. Ceci a pour conséquence la diminution de la puissance en sortie. Pour une raison de simplification, on a supposé, dans ce travail, que le multiplicateur est parfait et par conséquent les pertes sont négligeables. Donc, le multiplicateur sera modélisé mathématiquement par un simple gain (G) de telle sorte que les équations reliant les vitesses et les couples sont vérifiées :

$$\Omega_g = G\Omega_t \quad (II.1)$$

$$C_{emg} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.2)$$

D'autre part, à partir de la figure (II.2), l'équation mécanique du système éolien ramené du côté du générateur, peu s'écrire :

$$C_{eng} = -C_{emg} + j_{tot} \frac{d\Omega_g}{dt} + f_t \Omega_g \quad (II.3)$$

Avec :

J_{tot} : le moment d'inertie total du système ramené du côté du générateur dont l'expression mathématique est la suivante :

$$j_{tot} = \frac{J_w}{G^2} + J_g \quad (II.4)$$

f_t : Le coefficient de frottement total du système ramené du côté du générateur dont l'expression mathématique est la suivante :

$$f_t = \frac{f_w}{G^2} + f_g \quad (II.5)$$

II.3 ZONES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME EOLIEN

II.3.1 CARACTERISTIQUE PUISSANCE -VITESSE

La caractéristique Puissance-Vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones [14], comme le montre la figure II.3.

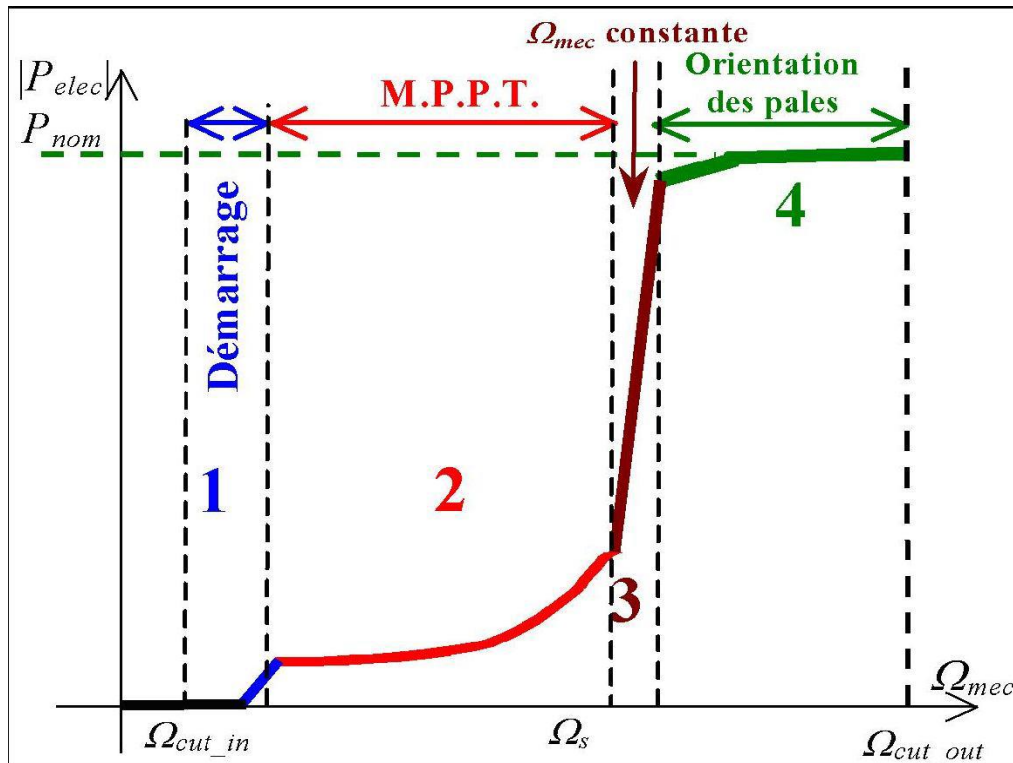


Figure (II.3): Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.

Les quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées de la manière suivante :

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut-in}
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse du générateur atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance à partir du vent, avec l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est-à-dire $\beta=2^\circ$. Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.
- **Zone 3** : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance du générateur atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales (*pitch control system*). Au delà de la vitesse $\Omega_{cut-out}$, un dispositif d'urgence est actionné de manière à mettre les pales de l'éolienne sous forme de drapeau et éviter la détérioration du système éolien.

II.4 PUISSANCE AERODYNAMIQUE ET COEFFICIENT DE PUISSANCE

II.4.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.4) sur lequel on a représenté la vitesse du vent $V1$ en amont de la turbine et la vitesse $V2$ en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne $V1$ et la vitesse du vent après passage à travers le

rotor $V2$ soit $\frac{(V1+V2)}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{II.6})$$

Alors, La puissance P_{aer} alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aer} = \frac{m (v_1^2 + v_2^2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.6):

$$P_{aer} = \frac{m (v_1 + v_2) (v_1^2 + v_2^2)}{2} \quad (\text{II.8})$$

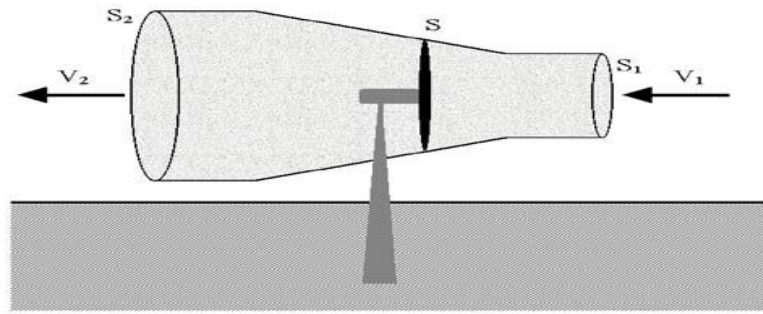


Figure (II.4): Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{th} correspondante serait alors :

$$P_{th} = \frac{\rho s v_1^3}{2} \quad (I.9)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{aer}}{P_{th}} = \frac{(1 + \frac{v_2}{v_1})(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2})}{2} \quad (I.10)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus sur Figure (II.5), on s'aperçoit que le rapport $\frac{P_{aer}}{P_{th}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un Maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

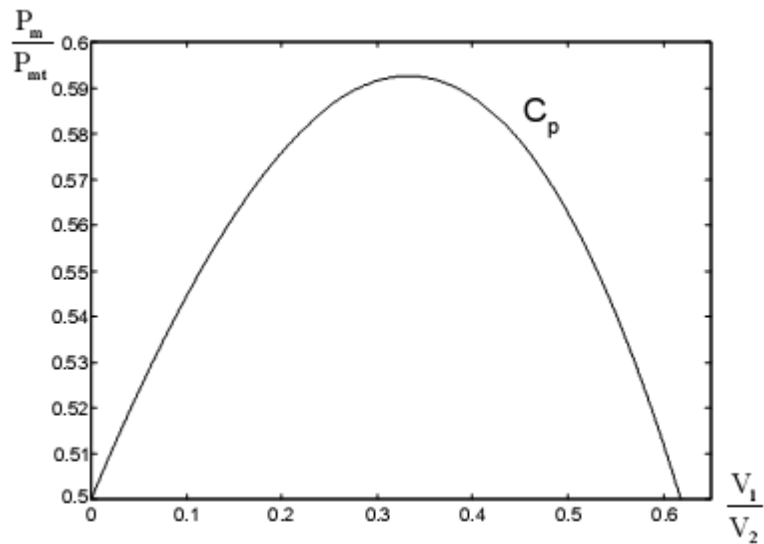


Figure (II.5): Coefficient de puissance.

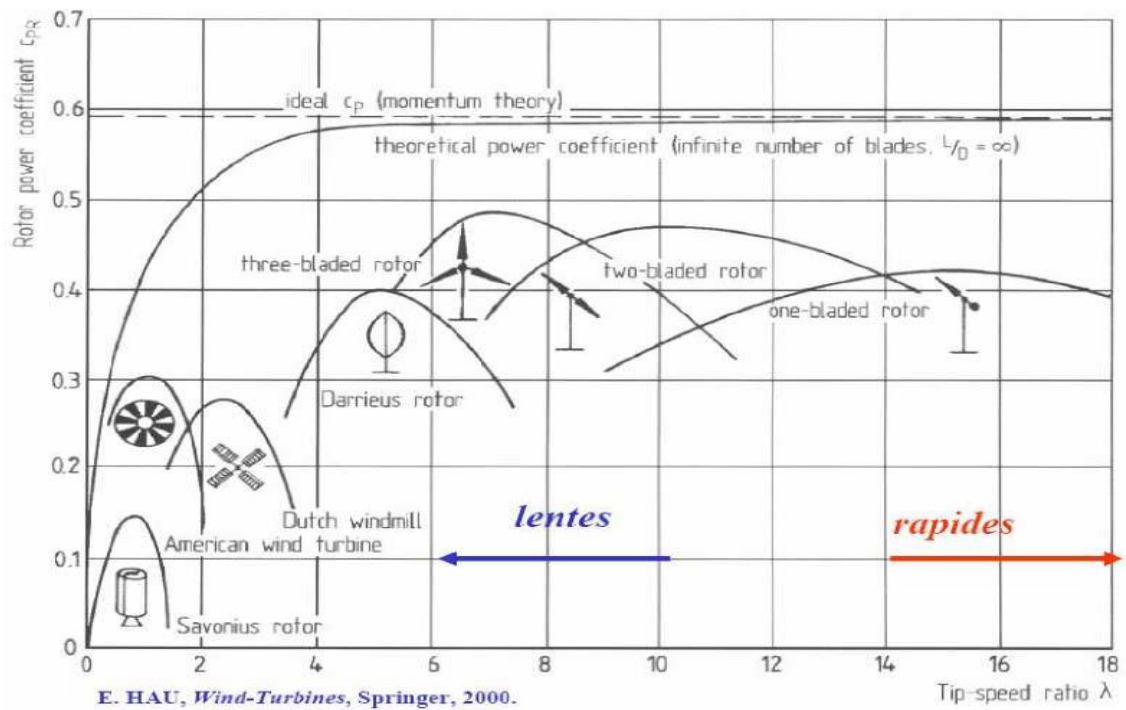


Figure (II.6): Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales [15].

Les éoliennes à lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40),leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur

coefficient de puissance (Figure II.6) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II.6) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s[15].

II.4.2 PUISSANCE MECANIQUE CAPTEE PAR L'EOLIENNE

En combinant les équations (II.6), (II.9) et (II.10), la puissance mécanique (P_m) disponible sur l'arbre de la turbine s'exprime ainsi :

$$P_{aer} = \frac{P_{aer}}{P_{th}} P_{th} = C_p \cdot P_{th} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 v_1^3 \quad (II.11)$$

Avec (λ) la vitesse spécifique exprimée par:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v_1} \quad (II.12)$$

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine et R : rayon des pales

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G, la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime Par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_g R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 v_1^3 \quad (\text{II.13})$$

.Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent Figure(II.7).

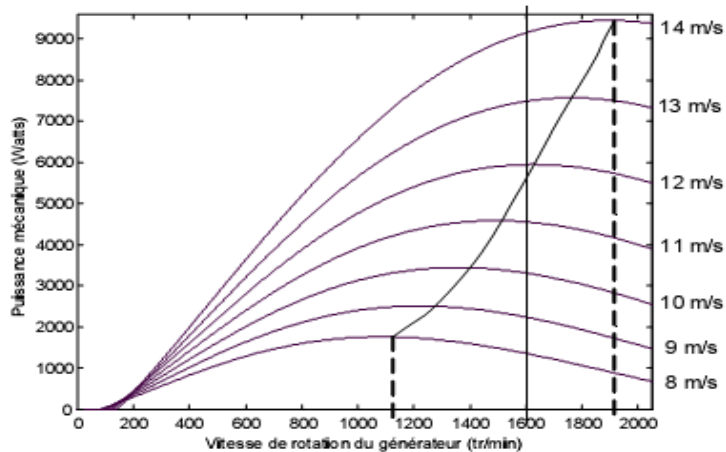


Figure (II.7): Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (II.7) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

II.4.3 PRODUCTION OPTIMALE D'ENERGIE

Dans un système de production d'énergie par une éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure(II.8). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à

une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} Résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (\text{II.14})$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone **II** de la figure (II.8). La zone **I** correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone **III** correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

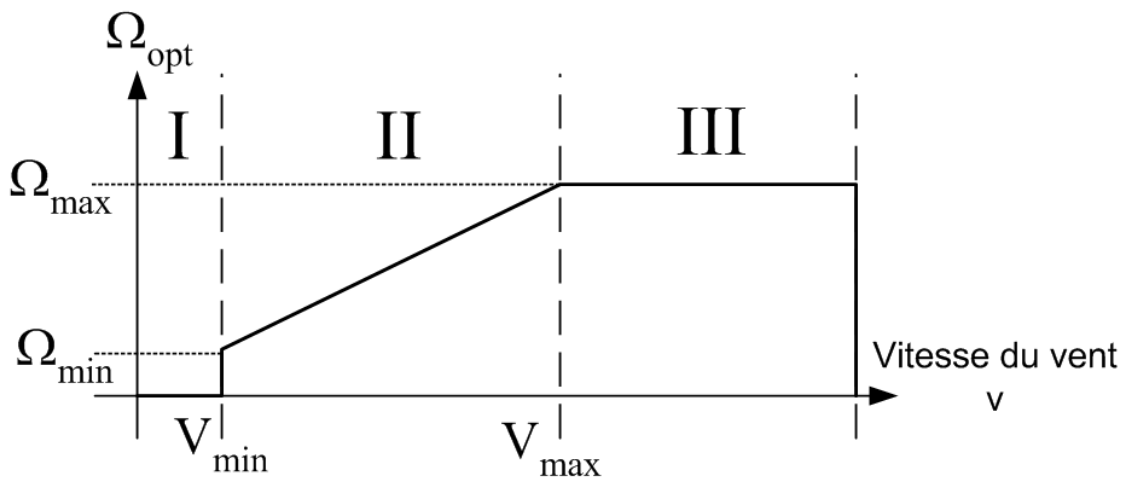


Figure (II.8): Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

Dans un système éolien, La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable. Donc, et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure II.9). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif

doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.[16]

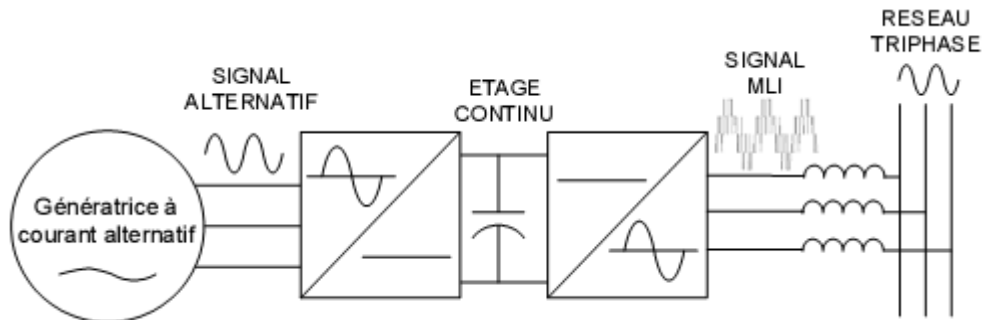


Figure (II.9): Interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau.

II.5 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA)

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est une machine triphasé à courant alternatif, avec deux enroulement triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage, et son rotor n'est pas composé d'une cage d'écureuil, mais d'enroulement triphasés identiques reliés à des bagues sur les quelles glissent des balais. La représentation géométrique classique d'une MADA est illustrée par la Figure (II.10).

Où : θ est l'angle géométrique entre le stator et le rotor.

Pour faciliter la modélisation de la MADA, en vu de sa commande, nous avons assibilé les hypothèses simplificatrices usuelles suivant :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale ;
- La machine a une construction symétriques ;

- Effet de la saturation des circuits magnétiques, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

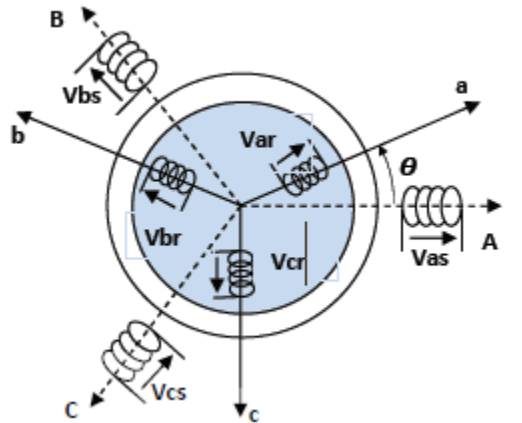


Figure (II.10): Représentation géométrique de la MADA.

II.5.1 Modèle naturel de la MADA

En tenant compte de ces hypothèses, les tensions statoriques et rotoriques peuvent être exprimées, respectivement, par les relations suivantes (on a opté pour la convention moteur ou Récepteur) :

$$[u_{abc}] = R_t [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{abc}] \quad (\text{II.15})$$

$$[u_{ABC}] = R_r [i_{rABC}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ABC}] \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$[u_{abc}] = [u_{as}; u_{bs}; u_{cs}]$ le vecteur des tensions statoriques ;

$[i_{sabc}] = [i_{as}; i_{bs}; i_{cs}]$ le vecteur des courants statoriques ;

$[\Psi_{abc}] = [\Psi_{as}; \Psi_{bs}; \Psi_{cs}]$ le vecteur des flux statoriques ;

On définit de la même manière les vecteurs rotoriques $[u_{ABC}]$, $[\Psi_{ABC}]$ et $[i_{rABC}]$, par le changement d'indices .

D'autre part, les flux statoriques et rotoriques sont exprimés, respectivement, en fonction des courants, des inductances propres des enroulements (rotoriques et statoriques) et des inductances mutuelles par les relations suivantes :

$$[\Psi_{abc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (\text{II.17})$$

$$[\Psi_{ABC}] = [L_r][i_{rabc}] + [M_{sr}]^T [i_{sabc}] \quad (\text{II.18})$$

Où :

$[M_{sr}]$ Est la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

$[L_s]$ Est la matrice des inductances statoriques ;

$[L_r]$ Est la matrice des inductances rotoriques ;

Avec :

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Telles que L_s , L_r sont respectivement les inductances statorique et rotorique par phase ; et M est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique,

En remplaçant les flux dans (II.15) et (II.16) par leurs expressions (II.17) et (II.18), on aura :

$$[u_{abc}] = R_s [i_{sabc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [[M_{sr}][i_{rabc}]] \quad (\text{II.20})$$

$$[u_{ABC}] = Rr[i_{rabc}] + [L_r] \frac{d}{dt} [[M_{sr}]^T [i_{sabc}]] \quad (\text{II.21})$$

On ne conclut que les coefficients de ces équations différentielles dépendent de l'angle géométrique entre le rotor et le stator (θ), donc du temps. Donc il est difficile de résoudre facilement ces équations différentielles à coefficients variables dans le temps. Par conséquent, nous avons besoin d'une transformation qui va nous permettre d'avoir un modèle mathématique décrit par des équations différentielles indépendantes de l'angle géométrique θ . Cette transformation est celle de Park qui est détaillée dans le paragraphe suivant :

II.5.2 Transformation du système triphasé en système biphasé

Comme nous venons de le voir, la modélisation de la MADA, dans le repère triphasé, aboutit à un système d'équations à coefficients variables (équations (II.20) et (II.21)). On peut transformer ces équations, non linéaires, du système triphasé à un système biphasé équivalent à coefficients constantes indépendantes de l'angle θ . Pour ce but, on utilise la transformation de Park qui a pour principe d'exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques dans un repère biphasé (d,q) . Le passage du repère triphasé (abc) au repère biphasé (d-q) se fait par la transformation mathématique suivante qui conserve la force magnétomotrice :

$$[U]_{dq0} = [A_s][U]_{abc} \quad (\text{II.22})$$

$$[i]_{dq0} = [A_s][i]_{abc} \quad (\text{II.23})$$

$$[\Psi]_{dq0} = [A_s][\Psi]_{abc} \quad (\text{II.24})$$

Où $[A_s]$ est la matrice de Park, elle est donnée par :

$$[A_s] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec θ_s est l'angle entre l'axe du repère de Park et l'axe (a) du stator. De même, pour les grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer l'indice s par r dans les équations statoriques.

Suivant que le repère de Park est lié au stator, au rotor ou au champ tournant, On peut obtenir trois modèles mathématiques de la machine. Comme dans notre étude, il s'agit d'un problème de régulation, nous avons choisi un référentiel lié au champ tournant, car il nous permet d'aboutir à des grandeurs de Park (courants,tensions,flux) constantes en régime permanent, ce qui nous facilite commande. Ainsi, dans un référentiel de Park lié au champ tournant, les tensions statoriques et rotoriques (équations (II.20) et (II.21)) de la MADA sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \\ u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \end{aligned} \tag{II.26}$$

$$\begin{aligned} u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} \\ u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} \end{aligned}$$

De plus, les équations des flux (équation (II.20) et (II.21)) s'expriment dans le repère de Park et comme suit :

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{dr} &= L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} &= L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{aligned} \tag{II.27}$$

Chapitre II : Modélisation du système éolienne étudié

De plus, le couple électromagnétique peut être exprimé en fonction des courants et/ou des flux, Dans notre cas, on a choisi l'expression suivante :

$$c_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.28})$$

Où p est le nombre de paires de pôles de la MADA.

En prenant $X = (i_{ds} i_{qs} \Psi_{ds} \Psi_{qs})$ comme vecteur d'état, on peut écrire le modèle de la MADA

sous la forme d'état suivante :

$$\dot{X} = A X + B U_1 \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$U_1 = [v_{ds} v_{qs} v_{dr} v_{qr}] : \text{Vecteur de commande.}$$

Les matrices d'état (A) et la matrice de commande (B), sont exprimées par :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_s} \right) & \omega_s - p\Omega_g & \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} & \frac{p\Omega_g}{\sigma L_s} \\ -(\omega_s - p\Omega_g) & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_s} \right) & -\frac{p\Omega_g}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \\ -R_s & 0 & 0 & \omega_s \\ 0 & -R_s & \omega_s & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Où :

τ_s et τ_r sont respectivement les constantes de temps électrique statorique et rotorique de la MADA et qui sont exprimés respectivement par :

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (\text{II.32})$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{II.33})$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad \text{Est le coefficient de dispersion de Blondel.}$$

En introduisant l'équation du couple électromagnétique (équation (II.28)) dans l'équation mécanique du système éolien (équation II.29), on obtient :

$$\frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{3PM}{2j_t L_s} (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) - \frac{j_t}{j_t} \Omega_g + \frac{c_{emg}}{j_t} \quad (\text{II.34})$$

De plus, les puissances active et réactive statoriques de la MADA sont exprimées par :

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \quad (\text{II.35})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}) \quad (\text{II.36})$$

De même, les puissances active et réactive rotorique de La MADA sont exprimées par :

$$P_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}) \quad (\text{II.37})$$

$$Q_t = \frac{3}{2} (u_{qr} i_{dr} - u_{dr} i_{qr}) \quad (\text{II.38})$$

II.6 MODELISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES DE LA CHAINE ROTORIQUE

Comme il a été déjà mentionné auparavant, La structure du système éolien étudié est basée sur une la MADA dont le rotor est relié au réseau par le biais de deux convertisseurs à MLI (convertisseurs du coté machine (CCM) et convertisseur du coté réseau (CCR)) (voir Figure 11). L'objectif principal de cette section est de modéliser les deux convertisseurs avant de les utiliser dans à la commande du système éolien au chapitre prochain.

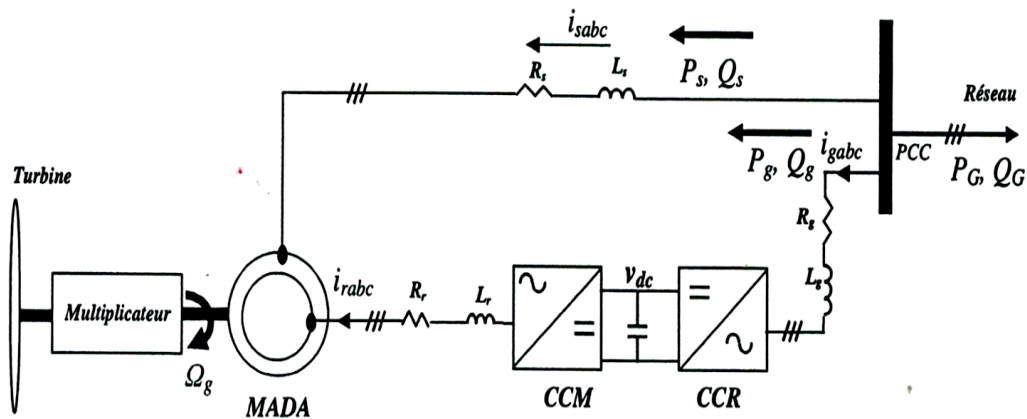


Figure (II-11) : Schéma synoptique électrique du système éolien étudié.

II.6.1 Modélisation du convertisseur du côté machine

Le schéma électrique du convertisseur du côté du rotor est montré sur la figure (II.12). Il est constitué des cellules de commutation forcée, généralement à transistors ou thyristors GTO pour les grandes puissances. Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. On note que chaque groupe (transistor, diode), assemblés en parallèle inverse, forme un interrupteur (demi-bras) commandé à l'ouverture et à la fermeture et que chaque demi-bras possède son demi-bras complémentaire [1].

A partir de ce schéma, on peut écrire les équations suivantes :

$$v_{AO} = v_{AN} + v_{NO}$$

$$v_{BO} = v_{BN} + v_{NO}$$

$$v_{CO} = v_{CN} + v_{NO}$$

(II.39)

Comme ces tensions forment un système triphasé équilibré, leur somme est nulle. Par conséquent, la tension v_{NO} est donné par :

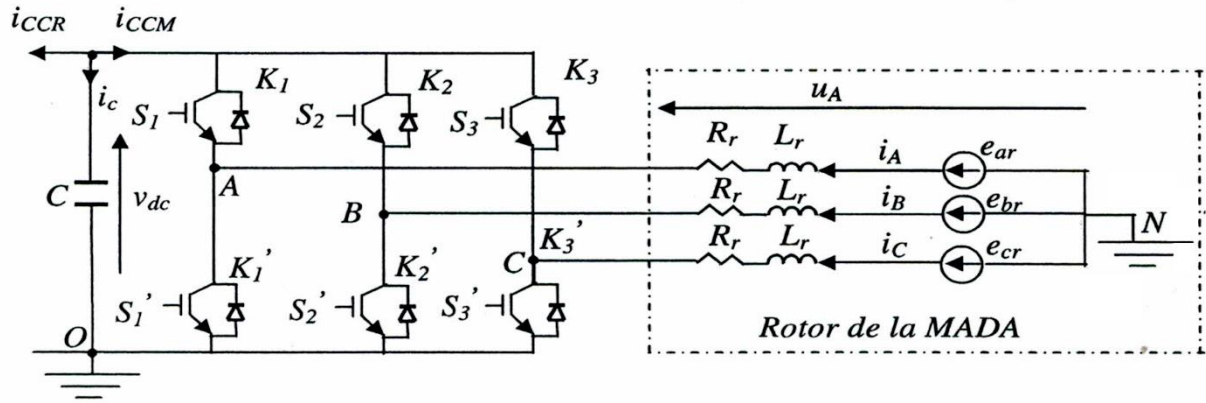


Figure (II-12) : Schéma électrique du convertisseur du coté de la machine.

En remplaçons l'équation (II.40) dans l'équation (II.39), on obtient les expressions des tensions rotoriques de la MADA :

$$\begin{aligned}
 v_{AN} &= \frac{1}{3}(2v_{AO} - v_{BO} - v_{CO}) \\
 v_{BN} &= \frac{1}{3}(-v_{AO} + 2v_{BO} - v_{CO}) \\
 v_{CN} &= \frac{1}{3}(-v_{AO} - v_{BO} + 2v_{CO})
 \end{aligned}
 \tag{II.42}$$

Introduisons maintenant les variables S_i caractérisant l'état des interrupteurs K_i ($i=1,2,3$) tel que :

$$\begin{aligned}
 S_i &= 1 && \text{si } K_i & \text{ fermé et } K_i' & \text{ ouvert} \\
 S_i &= 0 && \text{si } K_i & \text{ ouvert et } K_i' & \text{ fermé}
 \end{aligned}$$

Ainsi les tensions (v_{AO}, v_{BO}, v_{CO}) peuvent être exprimées en fonction de la tension du bus

Continu v_{dc} comme suit :

$$v_{AO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } s_1 = 1 \\ 0 & \text{si } s_1 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

$$v_{BO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } s_2 = 1 \\ 0 & \text{si } s_2 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

$$v_{CO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } s_3 = 1 \\ 0 & \text{si } s_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Finalement, les tensions rotoriques en fonction des états des interrupteurs et de la tension du bus continu, peuvent être exprimées de la manière suivante [2] :

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

D'autre part, le courant filtré (i_{CCM}) (à l'entrée du CCM) peut s'écrire en fonction des états logiques (S_i) des interrupteurs et les courants rotoriques triphasés (i_A, i_B, i_C) comme suit :

$$i_{CCM} = S_1 i_A + S_2 i_B + S_3 i_C \quad (\text{II.47})$$

Notons que la détermination des états logiques (S_i) des interrupteurs dépend de la stratégie de commande à MLI appliquée au convertisseur qui sera présentée en détail dans le chapitre suivant

II.6.2 Modélisation du convertisseur du côté réseau

Pour qu'il soit près à être utilisé dans la commande du système éolien, dans cette section, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur du côté du réseau.

Comme pour le CCM, le CCR est constitué aussi de cellules de commutation forcée, généralement à transistors ou thyristors GTO pour les grandes puissances. Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquencement imposé aux interrupteurs statique qui réalise la

modulation des tensions de commande appliquées à la ligne triphasé couplant le réseau et le convertisseur. Le schéma électrique de ce convertisseur est illustré par la figure (II.13)

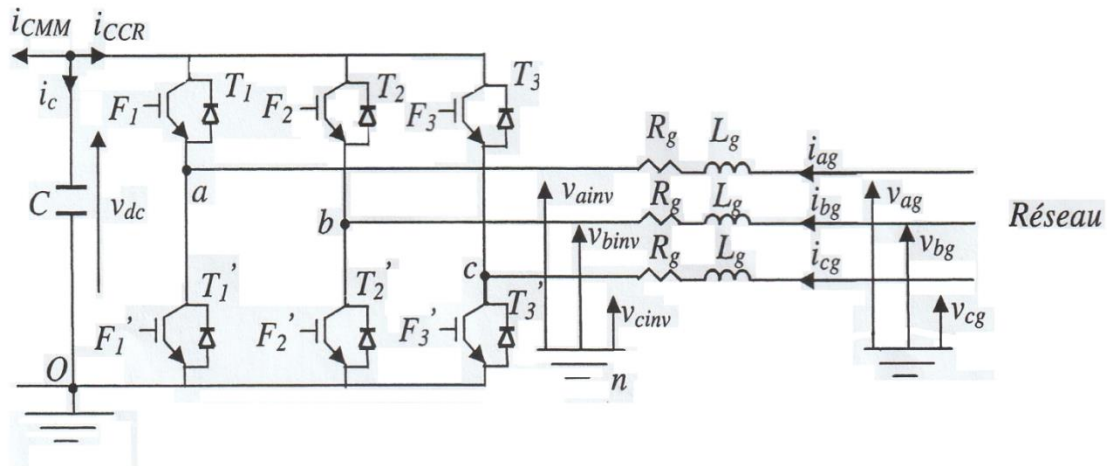


Figure (II-13) : Schéma électrique du convertisseur du coté du réseau.

A partir de ce schéma, on peut écrire les équations électriques suivantes :

$$v_{aO} = v_{ainv} + v_{nO}$$

$$v_{bO} = v_{binv} + v_{nO} \tag{II.48}$$

$$v_{cO} = v_{cinv} + v_{nO}$$

Par conséquent, La tension v_{nO} peut s'écrire de la manière suivante :

$$v_{nO} = \frac{1}{3}(v_{aO} + v_{bO} + v_{cO}) \tag{II.49}$$

En remplaçant l'équation (II.49) dans l'équation (II.48), on obtient les tensions triphasés à la sortie du convertisseur :

$$v_{ainv} = \frac{1}{3}(2v_{aO} - v_{bO} - v_{cO})$$

$$v_{binv} = \frac{1}{3}(-v_{aO} + 2v_{bO} - v_{cO}) \quad (II.50)$$

$$v_{cinv} = \frac{1}{3}(-v_{aO} - v_{bO} + 2v_{cO})$$

D'autre part, les tensions (v_{aO}, v_{bO}, v_{cO}) peuvent être exprimées en fonction de la tension du bus continu v_{dc} suivant les états logiques des interrupteurs :

$$v_{aO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } T_1 \text{ fermé et } T'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert et } T'_1 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (II.51)$$

$$v_{bO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } T_2 \text{ fermé et } T'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert et } T'_2 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (II.52)$$

$$v_{cO} = \begin{cases} v_{dc} & \text{si } T_3 \text{ fermé et } T'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_3 \text{ ouvert et } T'_3 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (II.53)$$

Enfin les tensions à MLI, à la sortie du convertisseur, peuvent être exprimées en fonction de v_{dc} et des états logiques (F_i) des interrupteurs (T_i) ($i=1,2,3$) :

$$\begin{bmatrix} v_{ainv} \\ v_{binv} \\ v_{cinv} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (II.54)$$

Les états logiques des interrupteurs du CCR sont définis de la même manière que celle du CCM. Par conséquent, le courant redressé (i_{CCR}) (à l'entrée du CCR) peut être exprimé en fonction des états logiques des interrupteurs (T_i) et les courants (i_{ag}, i_{bg}, i_{cg}), circulant dans la ligne triphasée, comme suit :

$$i_{CCR} = F_1 i_{ag} + F_2 i_{bg} + F_3 i_{cg} \quad (II.55)$$

De même, la détermination des états logiques (F_i) des interrupteurs dépendra aussi de la stratégie de commande à appliquer au convertisseur. Ce convertisseur sera utilisé principalement pour régler la tension du bus continu tout en assurant des courants quasiment sinusoïdaux du côté réseau.

D'autre part, la ligne triphasée reliant le CCR et le réseau est modélisée par le systèmes d'équations suivant (voir figure I.13) :

$$\begin{aligned}v_{ag} &= R_g i_{ag} + L_g \frac{di_{ag}}{dt} + v_{ainv} \\v_{bg} &= R_g i_{bg} + L_g \frac{di_{bg}}{dt} + v_{binv} \\v_{cg} &= R_g i_{cg} + L_g \frac{di_{cg}}{dt} + v_{cinv}\end{aligned}\tag{II.56}$$

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé toutes les parties essentielles du système éolien. EN effet, on a modélisé la partie mécanique de l'éolienne, on aussi modélisé le machine (MADA) et les convertisseurs associés, et à la fin nous avons modélisé des convertisseurs statiques de la chaîne rotorique.

Maintenant, notre système éolien est près à être commandé par les différents technique De commande qui serrant l'objet du chapitre prochaine.

Chapitre III :

STRATEGIES DE COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN

III.1 INTRODUCTION

Après avoir décrit au chapitre précédent la modélisation du système éolien, ce présent chapitre est consacré au développement de ses stratégies de commande. Pour cela, nous allons commencer par présenter brièvement les différentes techniques de la commande de la MADA à savoir : la commande vectorielle, la commande directe du couple et la commande directe des puissances.

Ensuite, on va s'intéressé au développement des stratégies de commande à appliquer au système afin de satisfaire certains objectifs. Ces derniers sont réalisés en commandant deux convertisseurs à MLI. En effet, on va décrire la technique de contrôle à suivre pour commander le convertisseur côté machine (CCM) en utilisant une boucle d'asservissement de vitesse menue d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction maximale de la puissance captée du vent à travers l'ajustement en temps réel de la vitesse spécifique λ de la turbine qui mène à un point optimal de fonctionnement à chaque fois que la vitesse de vent change et réalisant ainsi MPPT. Un autre régulateur de type PI sera conçu et appliqué au convertisseur du côté réseau (CCR) pour réguler la tension du bus continu à sa valeur de référence afin de garantir un transfert optimal vers le réseau électrique.

Notons que vu sa simplicité la technique MLI à hystérésis de courant a été retenue pour être appliquée à commande des deux convertisseurs. Enfin, la présentation et la discussion des résultats de simulation clôtureront ce chapitre.

III.2 STRATEGIES DE COMMANDE DE LA MADA

Plusieurs stratégies de commande ont été développées dans la littérature pour pouvoir réaliser un contrôle découplé des machines électriques à savoir :

A. La commande vectorielle qui a pour principe de découpler le couple et le flux assurant ainsi à la machine un fonctionnement similaire à celui de la machine à courant continu. A cause de sa simplicité d'implémentation et de ses performances de découplage pratiquement parfait entre le couple et le flux. Cette méthode s'appuie fortement sur une modélisation parfaite de la machine ainsi sur des hypothèses théoriques simplificatrices à savoir [3] :

- Les enroulements électriques de la machines sont parfaitement équilibrés ;
- La distribution du flux dans la machine est parfaitement de forme sinusoïdale ;
- Pas de saturation magnétique ;
- Les pertes fer sont négligeables.

B. Récemment deux autres méthodes, regroupées sous le terme direct, sont apparues pour commander les machines électriques à savoir :

- La première méthode, connue sous le nom de contrôle direct du couple (Direct torque control(DTC)), qui a fait son apparition dans les années quatre vingt (NOGUCHI et TAKAHACHI, 1984). Cette méthode permet de contrôler à la fois le couple de la machine et son flux d'une manière plus rapide. L'avantage principale de cette méthode réside dans le fait que les états logiques de la commande du convertisseur sont déterminés instantanément par une commande à hystérésis de flux et de couple sans passer par une modulation à largeur d'impulsions (MLI) ,
- La deuxième méthode, inspirée de la méthode (DTC), a connu son apparition en 1998 sous le nom de la commande directe des puissances (Direct Power Control (DPC)).

Elle a été proposée aussi par le même inventeur (NOGUCHI) de la DTC. Similaire à la DTC, son bloc de commande ne contient aucune boucle de commande interne du courant ni de bloc de MLI. En plus, les états logiques de la commande du convertisseur sont obtenus directement (sans passer par une stratégie de commande à MLI) en utilisant un tableau de commutations optimales. L'inconvénient majeur de ces méthodes réside dans leur dépendance étroite de la résistance statorique de la machine avec laquelle est estimé le flux. En plus, la fréquence de commutation des interrupteurs, formant le convertisseur, est indéterminée et le temps d'échantillonnage est assez petit.

III.3 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA PAR ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE

Vu sa simplicité et son efficacité, la commande vectorielle a été retenue pour être appliquée à la MADA sur principe est décrit dans la paragraphe suivant :

III.3.1 principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est l'une des techniques de commande appliquées aux machines électriques. Elle permet d'établir un mode de fonctionnement de la machine triphasée similaire à celui d'une machine à courant continu par une orientation appropriée de son flux. En effet, le couple électromagnétique et le flux d'une machine à courant continu sont exprimés respectivement par :

$$c_{em} = k\psi_f i_a \quad (\text{III-1})$$

$$\psi_f = k_f i_f \quad (\text{III-2})$$

D'après ces deux équations, on remarque le couple électromagnétique est commandé par le courant d'induit (i_a), tandis que le flux est commandé par le courant d'inducteur (i_f). Donc la commande des deux composantes est indépendante.

D'autre part, l'expression du couple électromagnétique de la MADA, exprimé en fonction des composantes (d-q) du flux statorique et celles du courant statorique, est donnée par :

$$c_{em} = 1.5p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{III-3})$$

On remarque d'après cette équation que le couple électromagnétique et le flux sont couplés entre eux. Alors, on fait appel à la commande vectorielle pour réaliser un découplage entre le flux et le couple. En effet, on procède à l'orientation de flux statorique de telle sorte que le flux soit orienté totalement sur l'axe d. Par conséquent, le couple sera commandé par le courant en quadrature (i_{qs}) et le flux par la composante du courant statorique directe (i_{ds}). Suivant les objectifs préalablement fixés, la commande vectorielle peut être réalisée par l'orientation de l'un des flux à savoir : le flux statorique ; le flux rotorique ou le flux magnétisant.

Dans ce travail, le stator est relié à un réseau supposé puissant qui impose à la machine un flux statorique légèrement constant. Le principe de l'orientation du flux statorique sur l'axe d est illustré sur la figure (III.1) :

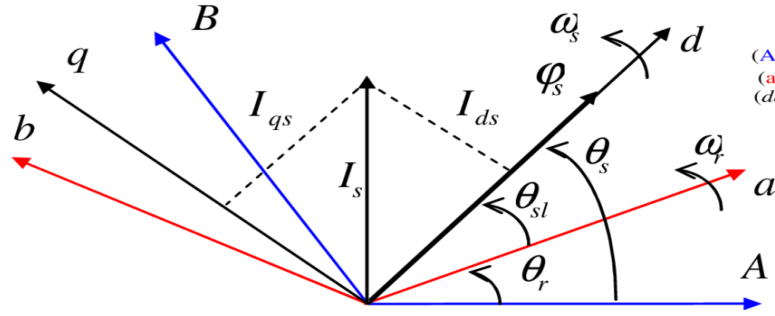


Figure (III.1): Orientation du flux statorique sur l'axe d .

III.3.2 Modèle interne de la MADA avec orientation du flux statorique

Si on suppose que la commande vectorielle est parfaite (orientation complète du flux statorique sur l'axe d), on peut écrit :

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= \psi_s \\ \psi_{qs} &= 0 \end{aligned} \tag{III-4}$$

De plus, si on néglige la résistance statorique (R_s) de la MADA (ce qui vrai pour une machine de grande puissance), l'équation (II-31) devient [3] :

$$u_{ds} = 0 \tag{III-5}$$

$$u_s = u_{qs} = \omega_s \psi_s \tag{III-6}$$

D'autre part, à partir de l'équation (II-32), on peut écrire aussi :

$$\psi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \tag{III-7}$$

$$0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \tag{III-8}$$

L'expression du couple électromagnétique de la MADA (équation II-28) et les expressions des puissances active et réactive statorique de la MADA (équation II-35) deviennent respectivement :

$$c_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{M u_s}{L_s \omega_s} i_{qr} \quad (\text{III-9})$$

$$p_s = -\frac{3M u_s}{2L_s} i_{qr}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{u_s}{L_s \omega_s} (u_s - M \omega_s i_{dr}) \quad (\text{III-10})$$

D'après l'équation (III-9), le couple électromagnétique peut être contrôlé en agissant sur la composante en quadrature du courant (i_{qr}). De même, d'après l'équation (III-10), la puissance réactive statorique peut être contrôlée en agissant sur la composante directe du courant rotorique (i_{dr}). Par conséquent, l'expression de la composante en quadrature du courant rotorique de référence pour commander le couple électromagnétique à une valeur de référence (C_{emref}) est exprimée par :

$$i_{qrref} = -\frac{2L_s \omega_s}{3pMu_s} C_{emref} \quad (\text{III-11})$$

De plus, la puissance active statorique peut être commandée à sa valeur de référence (P_{sref}) en agissant sur la même composante en quadrature du courant rotorique (i_{qr}) dont l'expression est la suivante :

$$i_{qrref} = -\frac{2L_s}{3Mu_s} P_{sref} \quad (\text{III-12})$$

De même, la composante directe du courant rotorique de référence nécessaire pour commander la puissance réactive à une valeur de référence (Q_{sref}) est exprimée par :

$$i_{drref} = \frac{2L_s}{3u_s M} \left(\frac{3u_s^2}{2L_s \omega_s} - Q_{sref} \right) \quad (\text{III-13})$$

D'autre part, pour pouvoir commander la MADA par le rotor on a besoin d'établir les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques. Pour cela, on utilise les équations de la MADA issues de la commande vectorielle pour établir les expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques. Ces tensions sont données par :

$$\begin{aligned}
 u_{dr} &= R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\
 u_{qr} &= R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M u_s}{L_s}
 \end{aligned}
 \tag{III-14}$$

Le modèle interne de la MADA, commandée par les tensions rotoriques est schématisé par la figure suivante :

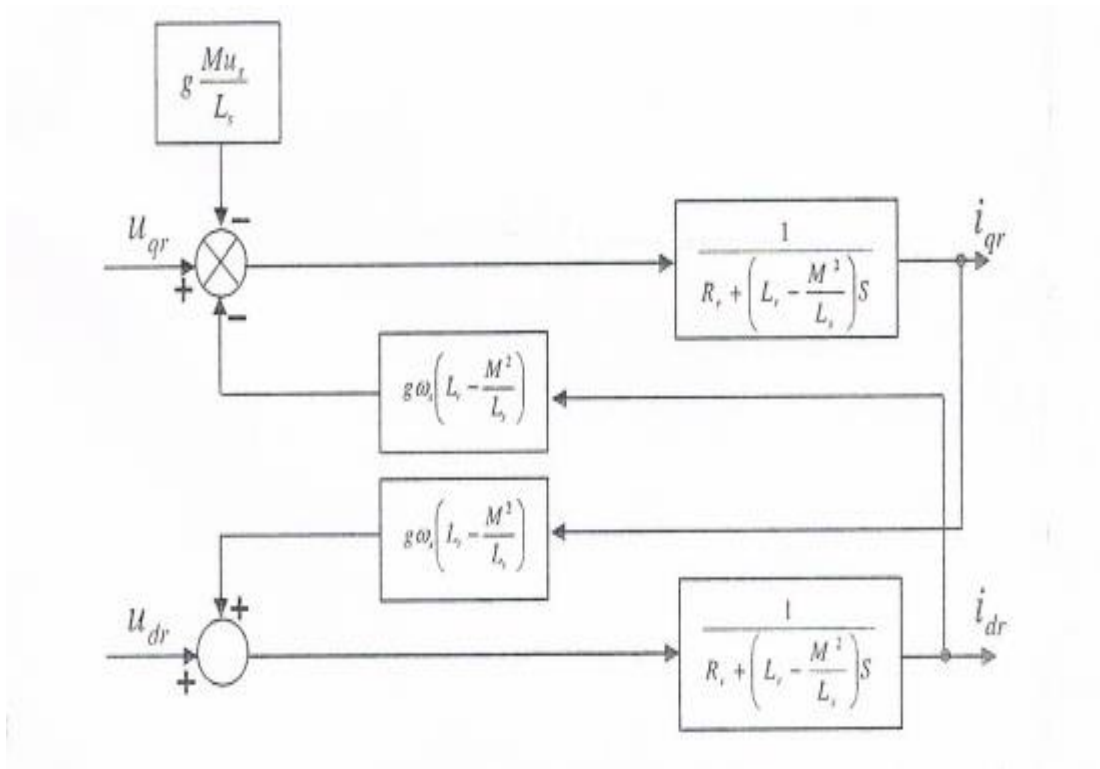


Figure (III.2) : Schéma bloc interne de la MADA.

Où : S est l'opérateur de Laplace.

III.4 Techniques de commande à MLI

On peut appliquer aux convertisseurs (CCM et CCR) plusieurs types de commande à MLI (commande à hystérésis de courant, commande sinus triangle,...). Dans notre cas et vu sa simplicité, on s'est limité à l'application de MLI à hystérésis de courant. Le principe de cette technique est décrit en détail ci-après :

III.4.1 principe de la MLI à hystérésis de courant

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à présenter le principe de la technique à MLI à hystérésis de courant. En effet, la commande par hystérésis de courant appelée aussi tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant mesuré. L'erreur obtenue est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis (ΔI). Le principe de cette technique est illustré sur la Figure (III-3), A l'aide d'un comparateur à hystérésis de courant, les impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur sont produites, de façon à limiter le courant de phase dans la bande d'hystérésis (ΔI) autour du courant de référence.

De ce fait, les conditions de commutation des trois interrupteurs statiques $F_i (i = a, b, c)$ (voir figure (III-4)) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques correspondants de la façon suivante :

$$F_i = 1 \text{ si } i_{iref} - i_i > \Delta I \quad (\text{III-15})$$

$$F_i = -1 \text{ si } i_{iref} - i_i < -\Delta I \quad (\text{III-16})$$

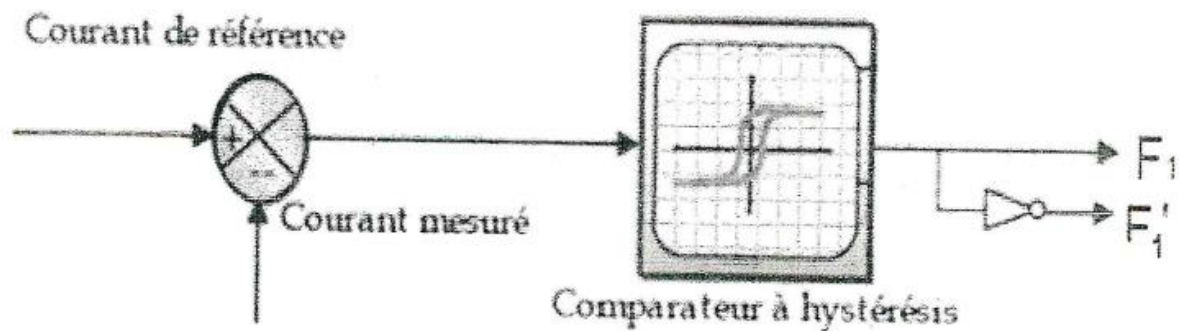


Figure (III.3) : Contrôleur hystérésis d'un bras de l'onduleur.

Le principe de cette technique est détaillé dans la figure suivante :

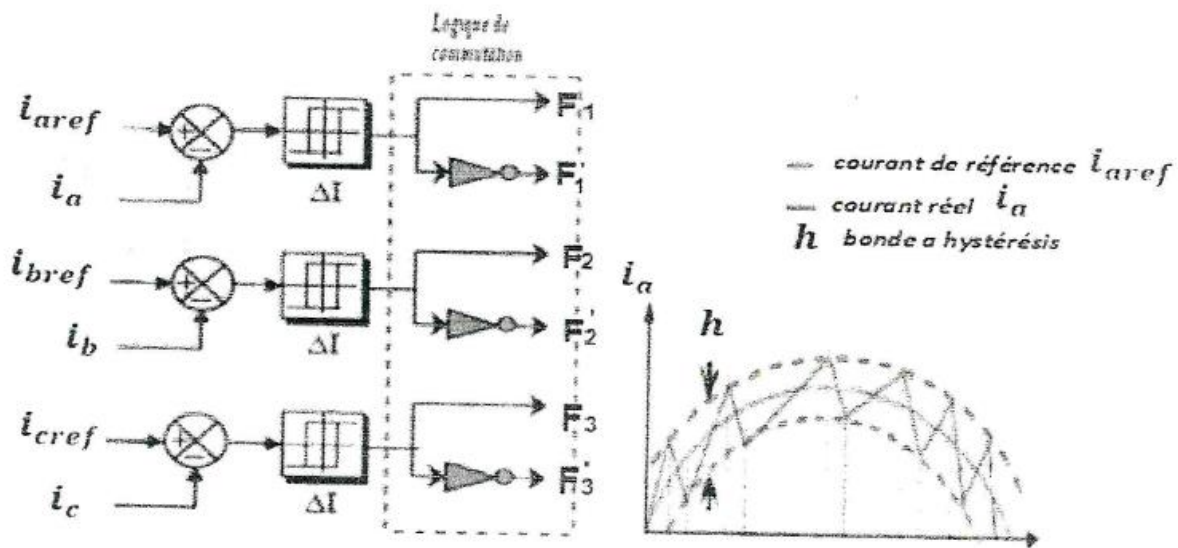


Figure (III.4) : Commande par hystérésis de courant.

III.5 STRATEGIE DE COMMANDE APPLIQUEES OU SYSTEME EOLIEN

On rappelle tout d'abord, le schéma général du système éolien :

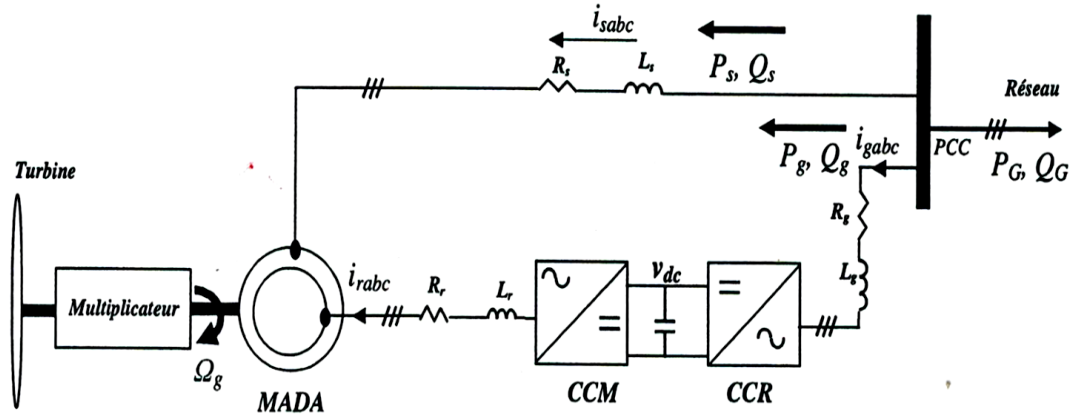


Figure (III.5) : Schéma synoptique électrique du système éolien étudié.

On passe maintenant, au développement des stratégies de commande à appliquer aux deux convertisseurs (CCM et CCR) afin de réaliser des performances prédéfinies.

III.5.1 Stratégies de commande appliquées au CCM

L'objectif principal fixé par la commande du convertisseur du côté machine est l'extraction de puissance maximale du vent et l'injection dans le réseau électrique. La variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique est présentée sur la figure suivante :

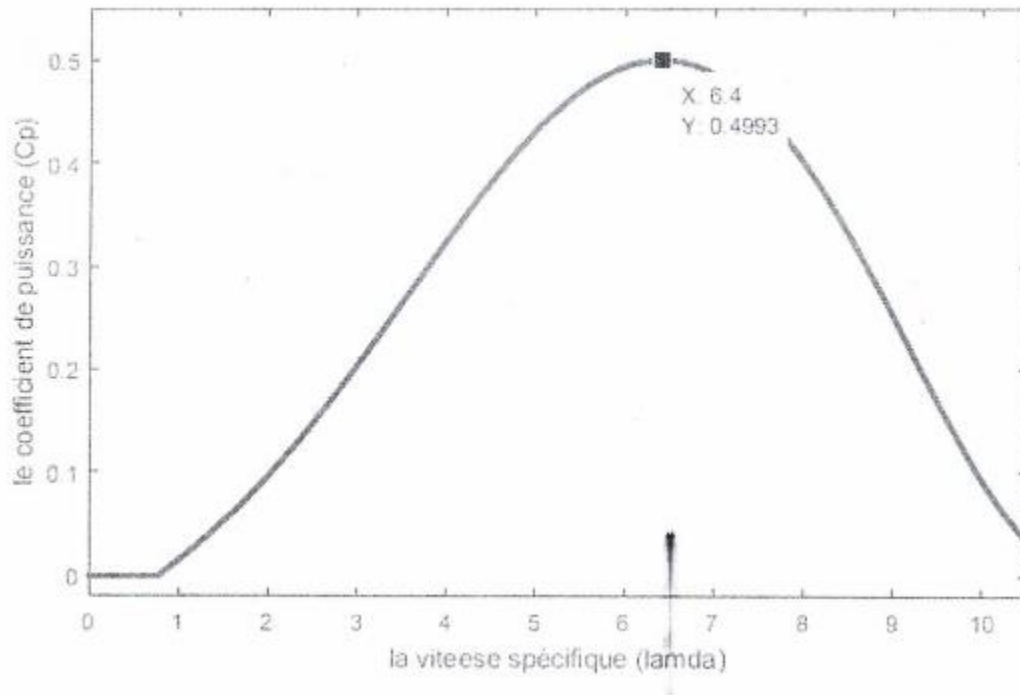


Figure (III.6) : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique cp (λ).

On a vu déjà que la vitesse spécifique est donnée par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \quad (\text{III-17})$$

Pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et réaliser ce qu'on appelle MPPT (*maximum power point tracking*), il faut assurer que la vitesse spécifique (λ) soit égale pratiquement sa valeur optimale, pour chaque vitesse de vent (v), exprimée par :

$$\lambda_{opt} = \frac{R \cdot \Omega_{tref}}{v} \quad (\text{III-18})$$

Par conséquent la vitesse de la MADA doit suivre sa valeur de référence donnée par :

$$\Omega_{gref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \cdot G \quad (\text{III-19})$$

Chapitre III : Stratégies de commande du système éolien

Plusieurs régulateurs existants dans la littérature peuvent être utilisés pour asservir la vitesse de la MADA (Logique floue, mode glissant,..). Dans notre cas, nous avons choisi à utiliser un régulateur de type PI pour asservir la vitesse de la génératrice (Ω_g) à sa valeur de référence optimale (Ω_{gref}) afin de réaliser MPPT.

Le schéma fonctionnel de l'asservissement de la vitesse est présenté sur la figure suivante :

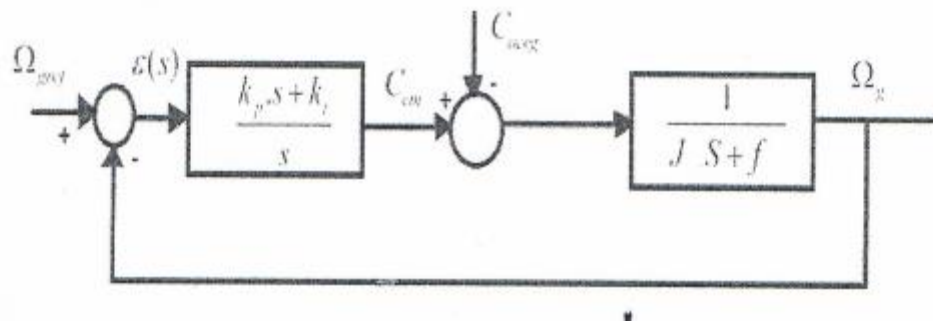


Figure (III.7) : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la vitesse de la MADA.

La fonction de transfert standard d'un régulateur PI est la suivante :

$$\frac{C_{em}(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \quad (\text{III-20})$$

L'objectif de régulation de la vitesse est de pouvoir rejeter la perturbation due au couple éolien. D'après la Figure (III-7), la fonction de transfert de système en boucle ouverte est :

$$G_o(s) = \left(\frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \right) \left(\frac{1}{J \cdot S + f} \right) \quad (\text{III-21})$$

Et par conséquent la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_F(s) = \left(\frac{K_p \cdot S + K_i}{J \cdot S^2 + (f + K_p)S + K_i} \right) \quad (\text{III-22})$$

On remarque que la dynamique de la fonction de transfert en boucle fermée est de deuxième ordre. Son polynôme caractéristique est de la forme suivante :

$$P_1(s) = \frac{R_s}{w_0^2} S^2 + \frac{2\varepsilon}{w_0} S + 1 \quad (\text{III-23})$$

ε : Le coefficient d'amortissement.

w_0 : La pulsation propre de système.

Par comparaison de l'équation (III-23) et le dénominateur de l'équation (III-22), on trouve facilement les deux gains du régulateur PI comme suit :

$$K_i = Jw_0 \text{ et } K_p = \frac{2\varepsilon K_i}{w_0} - f \quad (\text{III-24})$$

Notons que les paramètres (J) et (f) sont obtenus par identification de la machine.

Pour faire fonctionner le stator de la machine avec un facteur de puissance unitaire, on doit régler la puissance réactive statorique (Q_s) à zéro via l'ajustement du courant rotorique (i_{dr}).

Pour ce faire, et en utilisant l'équation (III-13), le courant (i_{dr}) de référence doit être fixé à :

$$i_{drref} = \frac{u_s}{M\omega_s} \quad (\text{III-25})$$

En fin le schéma détaillé de la commande de CCM pour assurer MPPT est donné par la figure suivante :

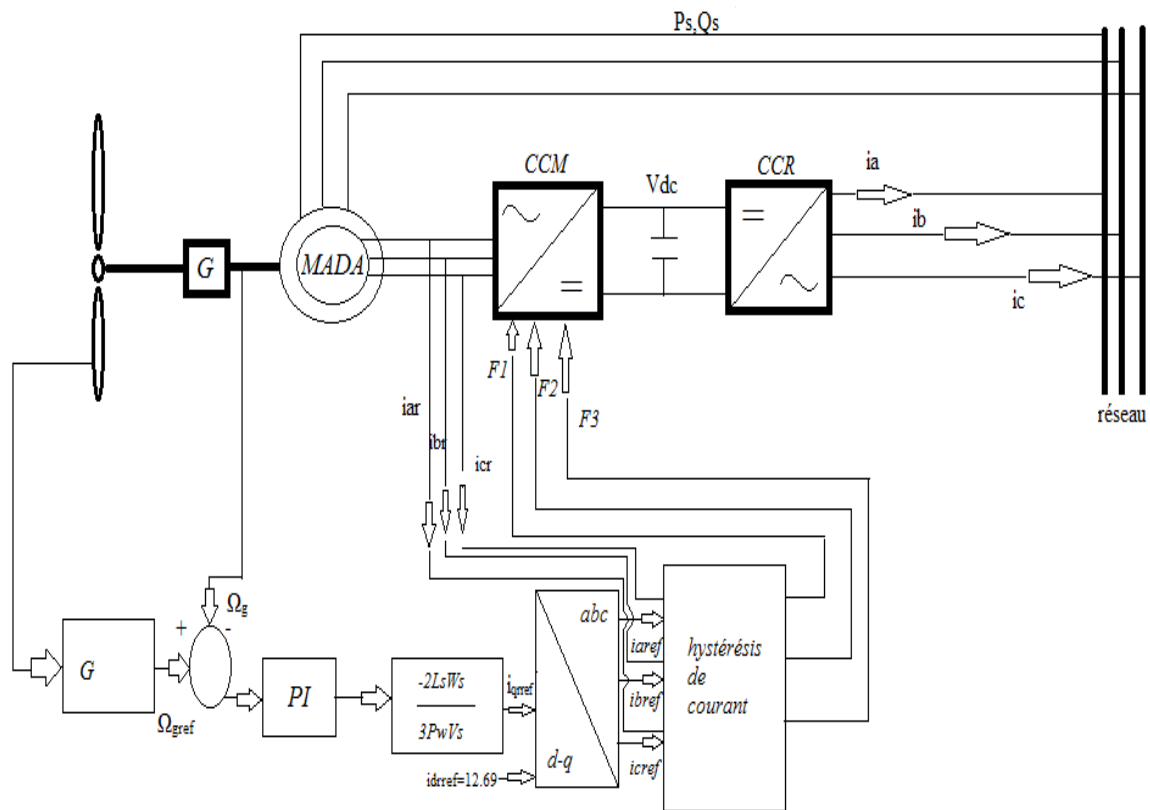


Figure (III.8) : Structure de la commande à hystérésis de courant du MADA.

Le fonctionnement en mode MPPT du système éolien a été testé pour une vitesse du vent sous la forme illustrée sur la figure suivante :

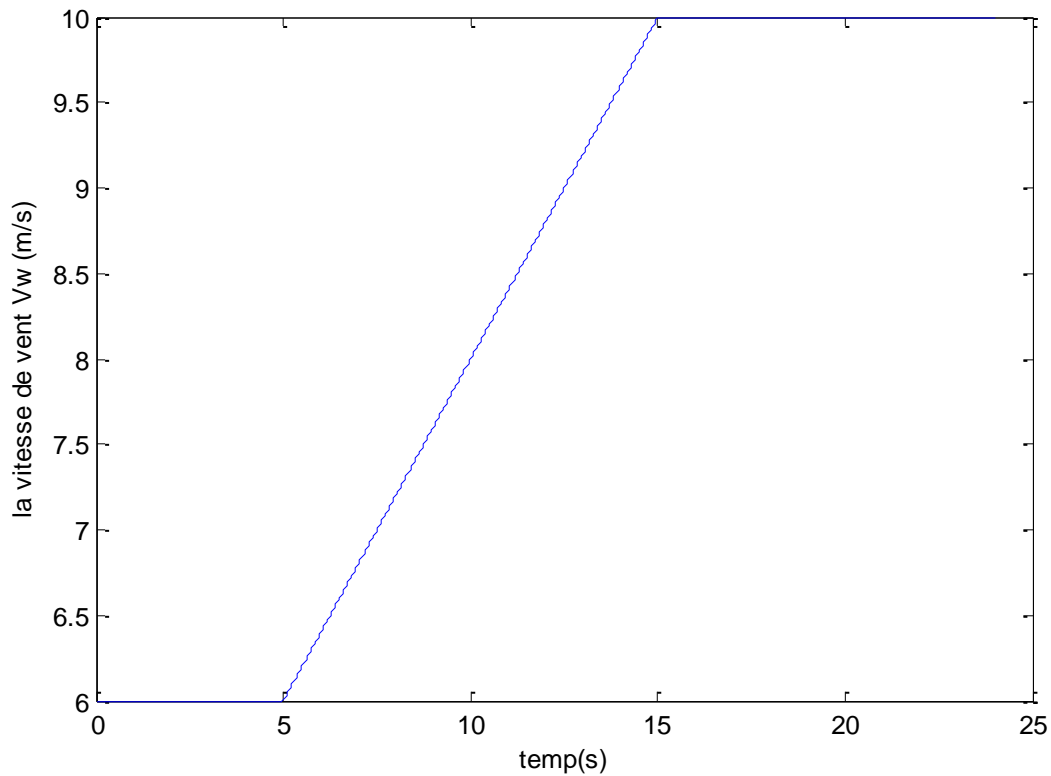


Figure (III.9) : Allure de la vitesse de vent.

Les figure (III (10-12)) illustrent les résultants de simulation obtenus.

D'après la figure (III-10) la vitesse de la génératrice (Ω_g) poursuit la vitesse optimale de référence (Ω_{gref}) pour extraire le maximum de puissance et assurer le fonctionnement en mode MPPT. De plus, le coefficient de puissance (C_p) est resté proche de sa valeur optimale ($C_{popt} = 0.4993$) (voir figure III-11). De même pour la vitesse spécifique qui est gardée autour de sa valeur optimale ($\lambda_{opt} = 6.4$) (voir figure III-12) durant tout le fonctionnement du système éolien [4]

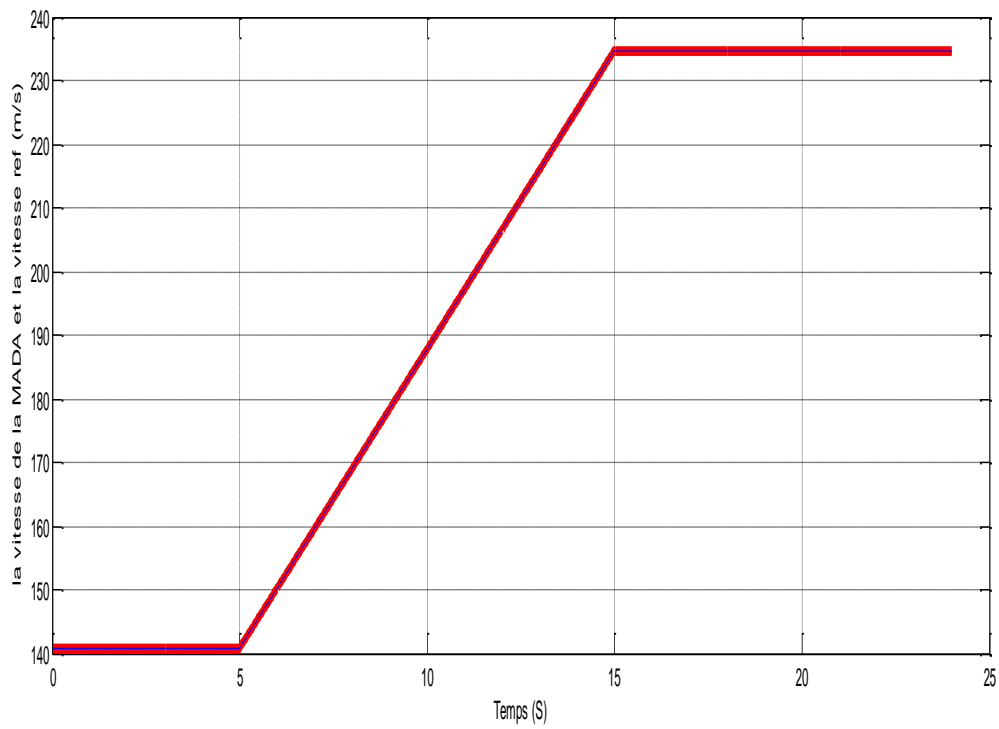


Figure (III.10) : Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).

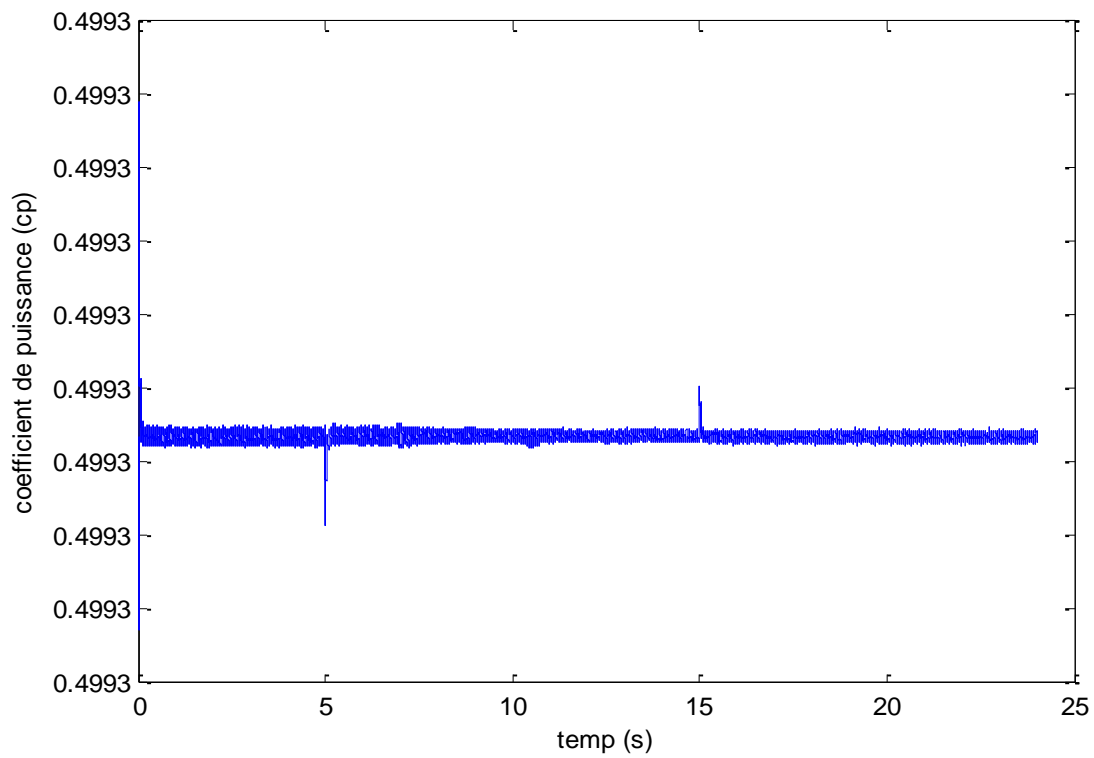


Figure (III.11) : Allure du coefficient de puissance (cp).

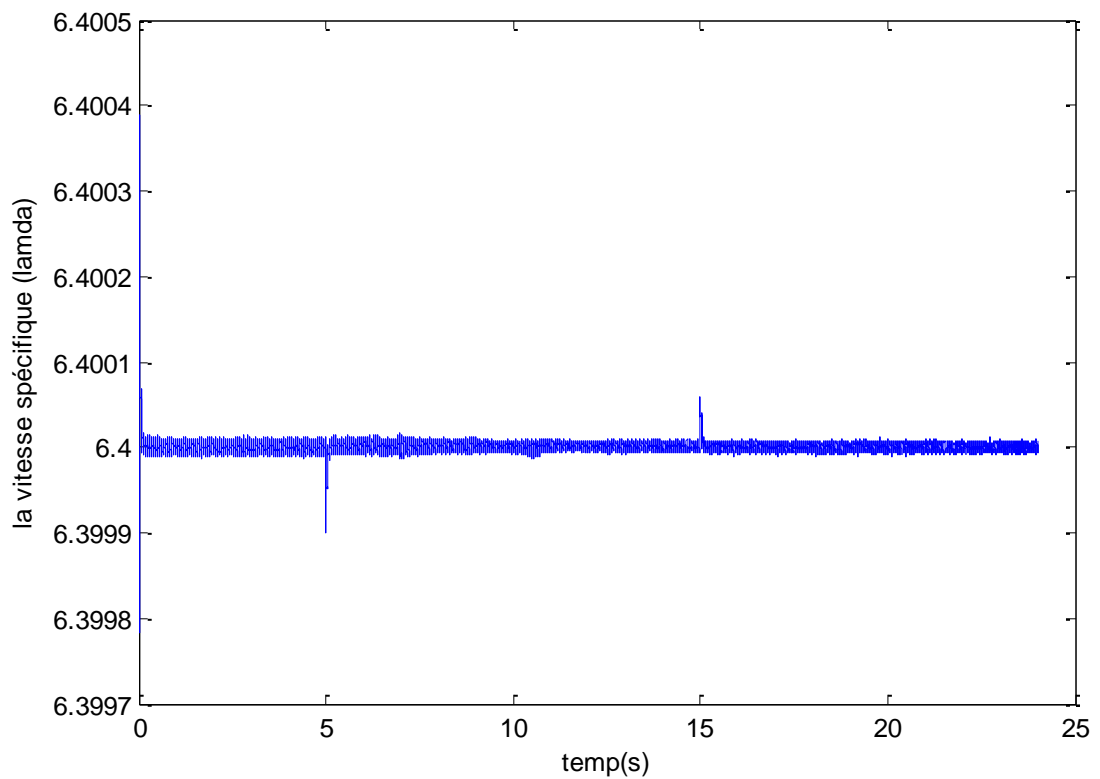


Figure (III.12) : Allure de la vitesse spécifique (λ).

III.5.2 Stratégies de commande appliquées au CCR

Ce convertisseur, modélisé auparavant, est commandé indépendamment du CCM de telle sorte que :

- a) La tension du bus continu soit gardée constante quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance au niveau du stator de la MADA ;
- b) Une commande découplée du débit de puissance active et réactive entre le réseau et le bus continu soit assuré avec un facteur de puissance désiré.

Dans cette section, nous allons établir le schéma de commande du CCR. Pour ce faire, un régulateur PI sera aussi synthétisé pour commander la tension du bus continu (V_{dc})

à sa valeur de référence (V_{dcref}). D'autre part, les puissances active et réactive circulant dans la ligne triphasée, reliant le CCR et le réseau sont exprimées par :

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg})$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(v_{qg}i_{qg} - v_{dg}i_{dg}) \quad (\text{III-26})$$

L'orientation de la tension de réseau sur l'axe (d) du repère de Park permettra d'écrire :

$$v_{dg} = u_s \quad (\text{III-27})$$

$$v_{qg} = 0 \quad (\text{III-28})$$

Par conséquent, les expressions donnant les puissances active et réactive (équation III-26) se simplifient et deviennent :

$$P_g = \frac{3}{2}u_s i_{dg} \quad (\text{III-29})$$

$$Q_g = -\frac{3}{2}u_s i_{qg} \quad (\text{III-30})$$

A partir de ces dernières équation, on peut conclure que :

- a) La puissance active (P_g) peut être contrôlée, à sa valeur de référence (P_{gref}), en agissant sur la composante en quadrature (i_{qg}) du courant de la ligne et par conséquent la consigne de ce courant est exprimée par :

$$i_{dgref} = \frac{2}{3u_s} P_{gref} \quad (III-31)$$

- b) La puissance réactive (Q_g) peut être régulée à sa valeur de référence (Q_{gref}) par la composante directe (i_{dg}) du courant de la ligne. D'où, on peut tirer le courant de référence par :

$$i_{qgref} = -\frac{2}{3u_s} Q_{gref} \quad (III-32)$$

D'autre part, la puissance moyenne à l'entrée de bus continu est pratiquement égale à la puissance active échangée entre le CCR et le réseau aux pertes près. Par conséquent on peut écrire :

$$v_{dc} i_{red} = \frac{3}{2} u_s i_{dg} = v_{dc} i_{ond} \quad (III-33)$$

Où :

i_{red} : est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCR

i_{ond} : est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCM

Par conséquent, la tension du bus continu (V_{dc}) peut être contrôlée en agissant sur la composante (i_{dg}).

Le schéma de commande de convertisseur est illustré sur la figure suivante :

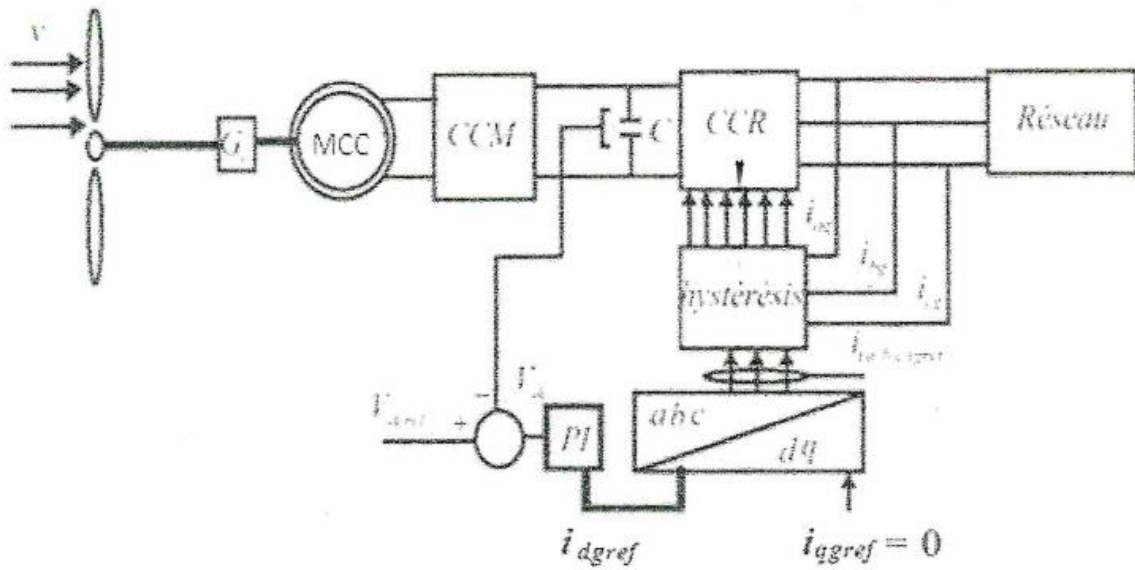


Figure (III.13) : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.

Le schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu en utilisant un régulateur PI est illustré par la figure suivante :

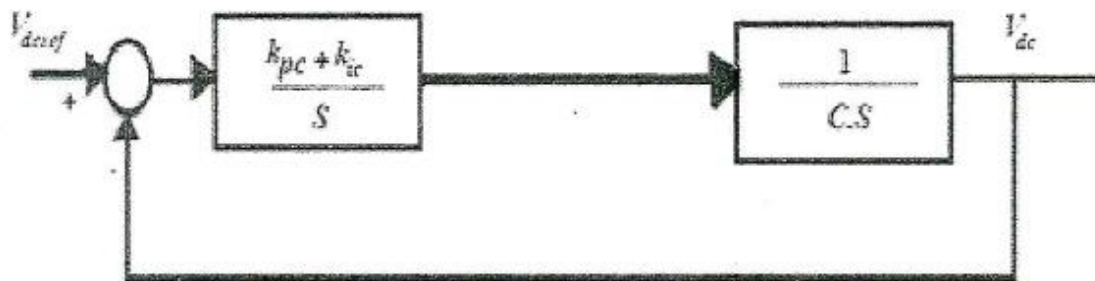


Figure (III.14) : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).

La fonction de transfert standard d'un régulateur PI est la suivante :

$$V_{dcRég} = \frac{s.k_{pc} + k_{ic}}{s} \quad (III-34)$$

D'après la figure (III-14), la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{oc}(s) = \left(\frac{s.k_{pc} + k_{ic}}{s} \right) \left(\frac{1}{C.s} \right) \quad (\text{III-35})$$

Et par conséquent la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{fc}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dcref}} = \frac{Sk_{pc} + k_{ic}}{S^2C + Sk_{pc} + k_{ic}} \quad (\text{III-36})$$

On remarque que la fonction de transfert en boucle fermée est de deuxième ordre. Son polynôme caractéristique est de la forme suivante :

$$p_1 = \frac{1}{\omega_0^2} S^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_0} S + 1 \quad (\text{III-37})$$

Par comparaison de l'équation (III-37) et le dénominateur de l'équation (III-36), on trouve facilement les deux gains du régulateur PI comme suit :

$$k_{pc} = 2\varepsilon\omega_0 \quad \text{et} \quad k_{ic} = C\omega_0^2 \quad (\text{III-38})$$

les résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures (III-(15-17)) :

on remarque que la tension du bus continu (V_{dc}) est régulée à sa référence ($V_{dcref} = 700 \text{ V}$) grâce à la commande du CCR (voir figure III-15). Le zoom de la tension de la phase (a) (V_a) et son courant correspondant (i_a) montre que le système éolien injecte uniquement de la puissance active au réseau avec un facteur de puissance unitaire (voir figure III-17)

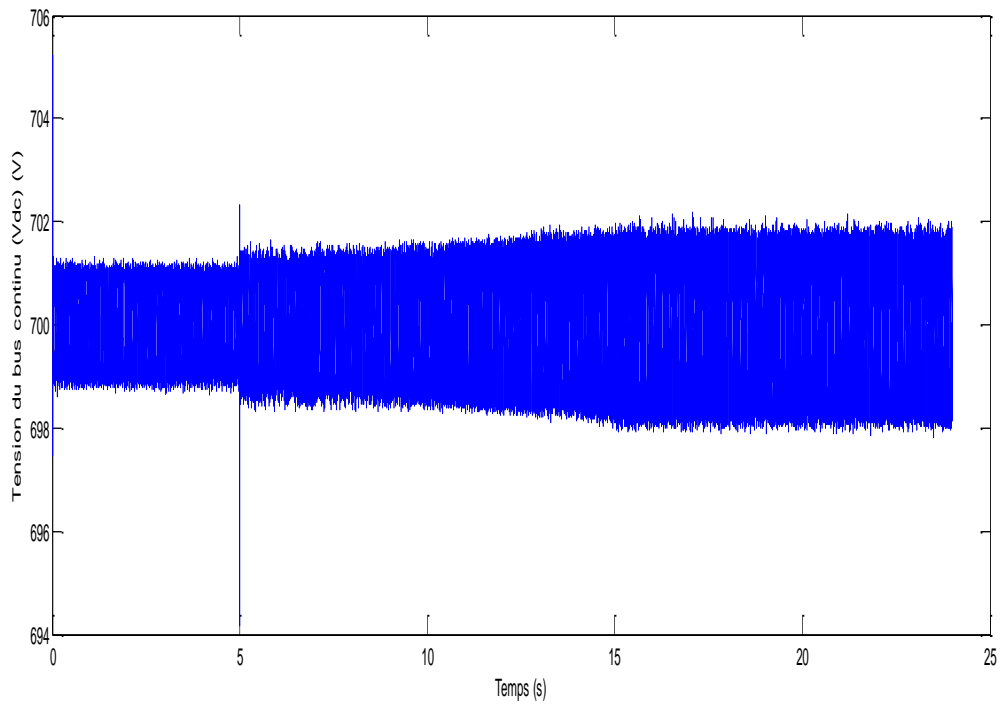


Figure (III.15) : Allure de la tension du bus continu (V_{dc})(V).

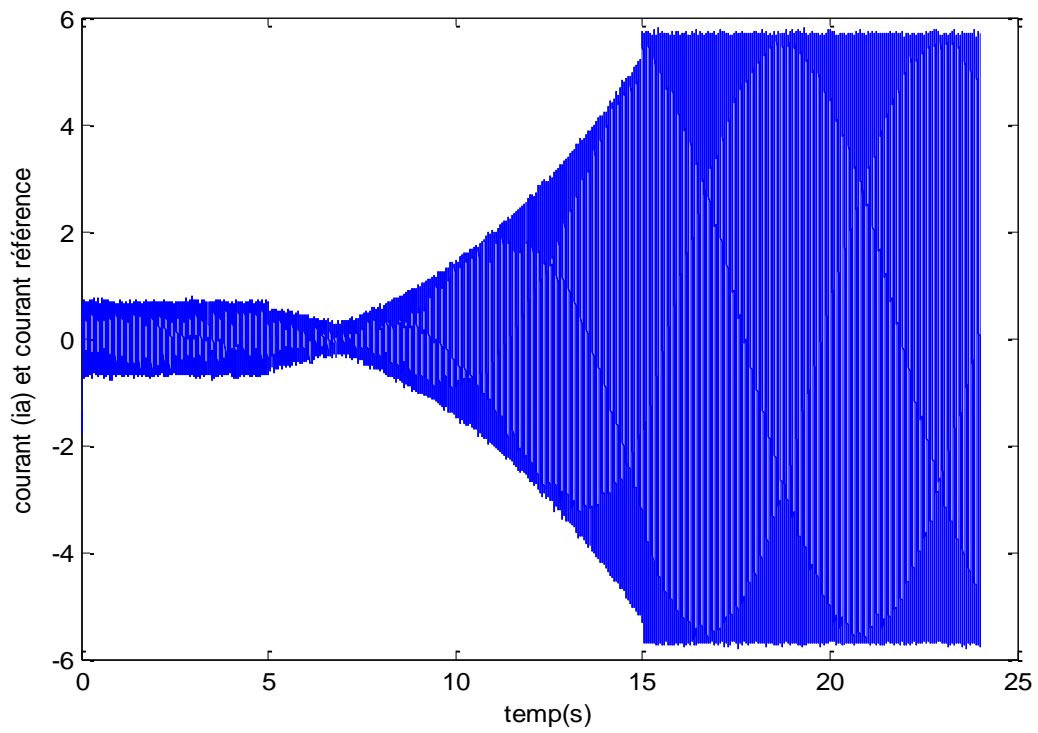


Figure (III.16) : Courant de la phase A (i_a) et le courant référence (i_{agref}).

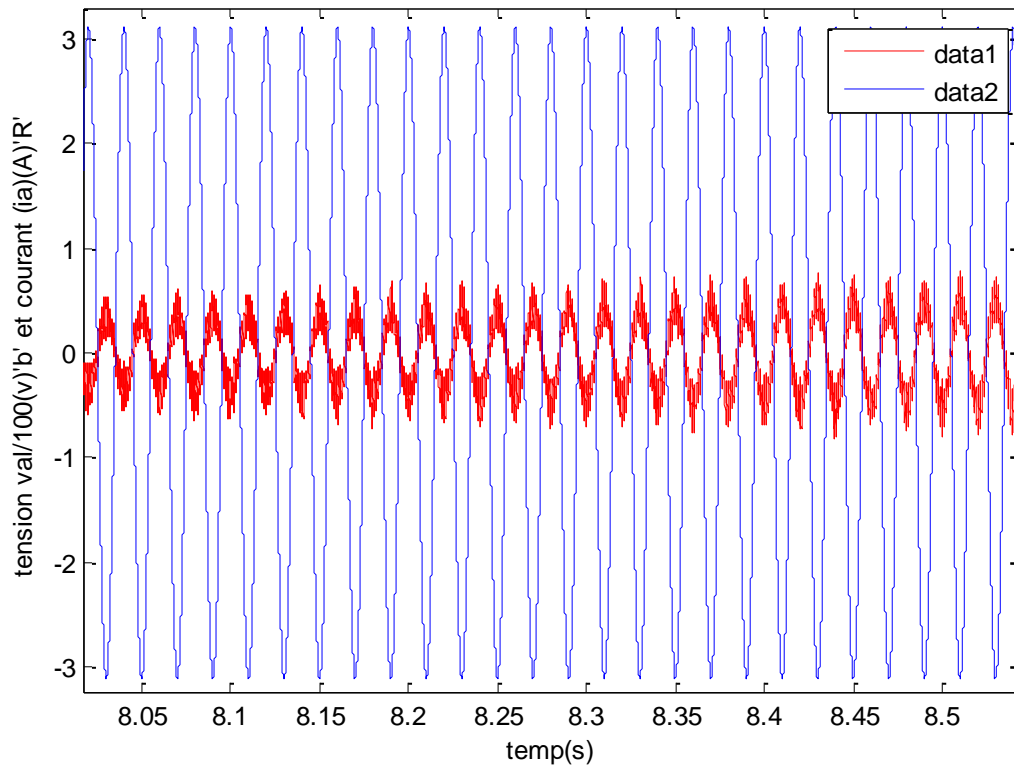


Figure (III.17): Allure de la tension de la phase (V_a) et son courant correspondant (i_a).

La figure (III-18) représente l'allure de la puissance active (P_g) et la puissance réactive (Q_g).

On remarque que la puissance active statorique (P_g) augmente en valeur absolue avec l'accroissement de la vitesse de vent confirmant ainsi le fonctionnement en mode MPPT du système éolien. La puissance réactive est gardée pratiquement nulle ce qui prouve que le stator fonctionne avec facteur de puissance unitaire du côté réseau. Donc toute la puissance éolienne est injectée au réseau avec des pertes près.[4]

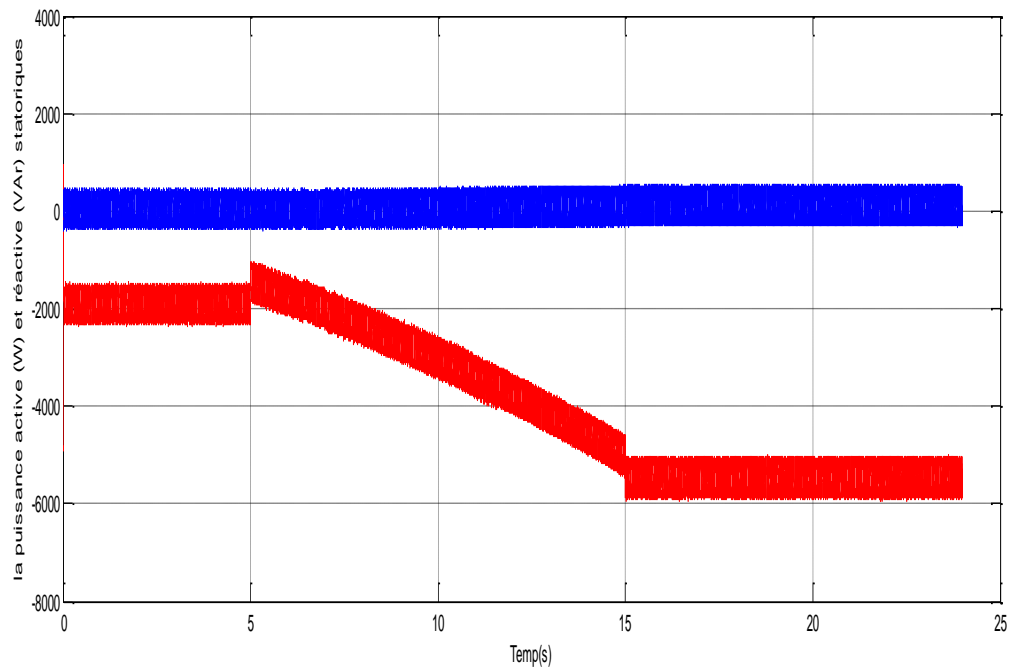


Figure (III.18) : Allures des puissances active (P_s) (W) et réactive (Q_s) (VAR).

III.6 CORRECTION DU FACTEUR DU PUISSANCE

Dans ce paragraphe, on va commander le système éolien pour compenser la puissance réactive d'une charge linéaire connectée au réseau électrique et assurer un facteur de puissance unitaire du côté de réseau.

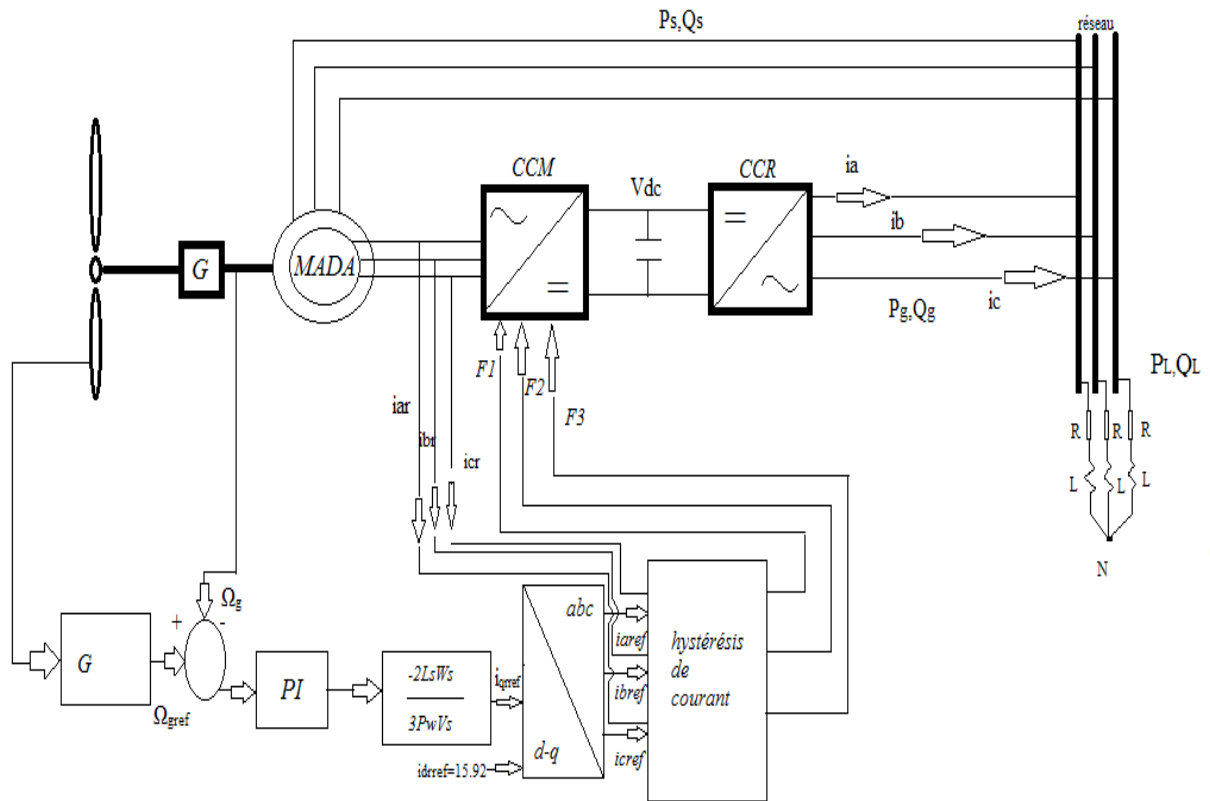


Figure (III-19) : Schéma de commande du système éolien pour la correction du facteur de puissance.

En effet, d'après le schéma de la figure (III-19) la puissance réactive du réseau s'écrit comme suit :

$$Q_{grid} = Q_s + Q_g + Q_L \quad (III-39)$$

Dance ce travail le convertisseur côté réseau fonctionne avec facteur de puissance unitaire du côté réseau ($Q_g = 0$).

On s'intéresse à rendre le facteur de puissance unitaire en commandant la puissance réactive statique (Q_s) pour rendre ($Q_{grid} = 0$). Pour ce faire, on doit commander la puissance réactive statorique pour qu'elle soit égale à : $Q_{sref} = -Q_L$.

D'après l'équation mathématique (III-13), la puissance réactive statorique est régulée à sa valeur de référence ($Q_{sref} = -Q_L$) via le courant rotorique de référence :

$$i_{drref} = \frac{2L_s}{3u_s M} \left(\frac{3u_s^2}{2L_s \omega_s} + Q_L \right) \quad (III-40)$$

Pour une charge linéaire inductive connectée au réseau et de puissance réactive ($Q_L = 1400 \text{ VAR}$), les résultats de simulation sont présentés sur la figure (III-20).

D'après les résultats obtenus, on remarque que la puissance réactive du réseau (Q_{grid}) a été compensée totalement par le stator de la MADA dont la puissance réactive (Q_s) est passée à ($t=5 \text{ S}$) à la valeur de (-1400 VAR).

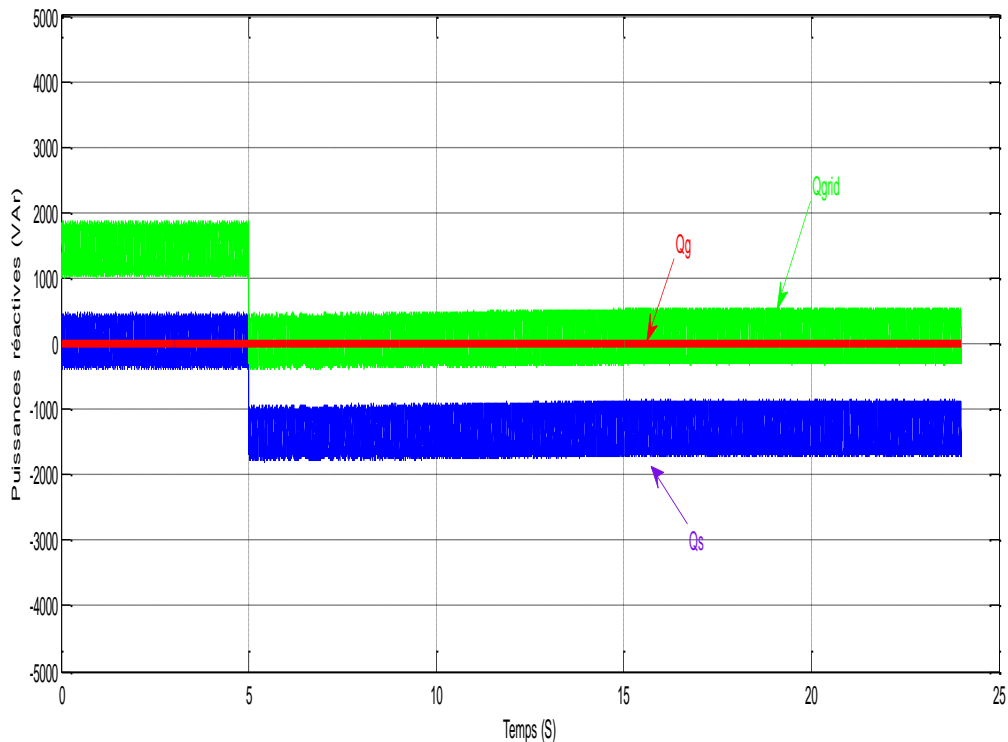


Figure (III.20) : Allure des puissances réactives (Var).

III.7 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré principalement à la commande des convertisseurs (CCM et CCR) du système éolien pour satisfaire des performances désirées en boucle fermée. En effet, le CCM a été commandé par un régulateur PI simple pour assurer le fonctionnement en mode MPPT.

Des résultats de simulation satisfaisants ont été obtenus. Effectivement, la vitesse de la génératrice a suivi sa valeur optimale pour achever le mode de fonctionnement en MPPT. Ainsi l'extraction de la puissance maximale du vent a été efficacement achevée et elle est prête à être acheminée vers le réseau électrique en commandant le convertisseur du côté réseau.

Effectivement, le convertisseur du côté réseau (CCR) a été contrôlé par un autre régulateur PI pour assurer l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}) et assurer ainsi l'injection dans le réseau électrique de puissance maximale extraite du vent avec des pertes près. D'après le graphe illustrant (V_{dc}), cette dernière a été réglée convenablement à sa valeur de référence ($V_{dcref}=700$ V) L'allure des puissances active et réactive ont montré que bien que la totalité de la puissance active est injectée dans le réseau avec un facteur de puissance unitaire. De plus, le convertisseur (CCM) a été sollicité pour corriger le facteur de puissance en commandant la puissance réactive statorique de telle sorte que la puissance réactive du réseau soit compensée totalement. Effectivement, d'après les résultats obtenus, la puissance réactive du réseau a été compensée assurant ainsi un facteur de puissance unitaire du côté réseau.

Enfin et pour donner une suite fructueuse de ce travail, on peut avancer quelques perspectives:

Chapitre III : Stratégies de commande du système éolien

- La mise en œuvre pratique de ce système éolien;
- Commander le système éolien afin qu'il tienne en cas de creux de tension dans le réseau électrique;
- Commander le système éolien pour participer à l'amélioration de la qualité d'énergie ;
- Utiliser le convertisseur (CCR) pour corriger le facteur de puissance ;
- Coordonner entre les deux convertisseurs pour améliorer la qualité d'énergie en termes de compensation de la puissance réactive et filtrage des courants harmoniques.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était l'étude et la commande d'un système éolien à base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (MADA). En effet, Nous avons considéré, dans notre étude, une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une GADA dont le stator est relié directement au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté au réseau via un dispositif d'électronique de puissance composé de deux convertisseurs (CCM et CCR).

Le premier objectif de la commande est de capter et transmettre le maximum de l'énergie produite par le vent vers le réseau à travers la chaîne de conversion éolienne.

Cet objectif a été pratiquement atteint par la commande du Convertisseur du Côté Machine (CCM) dont la commande est basée sur la technique de MLI hystérésis de courant associée à un régulateur PI classique.

D'après les résultats de simulation obtenus, il a été remarqué que pour des différentes allures de vitesse de vent, la vitesse de la MADA suit sa valeur optimale pour réaliser MPPT. Notons que la vitesse de la machine a été régulée à travers un régulateur PI classique qui a permis à la vitesse de suivre pratiquement sa référence optimale.

L'autre convertisseur (CCR) a été commandé aussi par un régulateur PI simple, associé à la technique MLI à hystérésis de courant, pour réguler la tension du bus continu et permettre au système éolien d'injecter la puissance active au réseau électrique avec un facteur de puissance désiré.

En effet, les résultats de simulation ont montré clairement l'asservissement de la tension du bus continu à sa valeur de référence (700 V). De plus, l'allure de la puissance

Conclusion générale

active produite et injectée dans le réseau électrique, a montré que la totalité de la puissance éolienne à pertes près a été captée et injectée dans le réseau.

Enfin, Pour pouvoir donner une suite fructueuse de ce travail dans le futur, on peut avancer quelques perspectives :

- Remplacer le régulateur PI par d'autres types de correcteurs (Logique floue, mode glissant, prédictive,...);
- Commander le système éolien pour participer à l'amélioration de la qualité d'énergie produite;
- Mise en œuvre de la commande sur un banc d'essai pratique en utilisant une carte DSP;
- Associé ce système éolien à d'autres systèmes à énergie renouvelable en réalisant ainsi un système hybride pour produire davantage d'électricité;
- Elargir le système éolien pour concevoir un parc éolien pour produire plus d'électricité.

Bibliographies

- [1]: **M. BOUTOUBAT, L. Mokrani , M. Machmoum,** " Grid power factor enhancement by using a coordinated control of a wind system without any system over rating ", the 8th IEEE International Conference on Modelling, identification and control, Médéa, Algérie, 2016.
- [2]: **M.BOUTOUBAT,** L. Mokrani , M. Machmoum, " Full capability of harmonic current mitigation for a wind energy system ", Electric Power Component and Systems, Vol. 42 , NO. 15, pp:1743-1753, 2014.
- [3]: **M. BOUTOUBAT,** L. Mokrani , M. Machmoum, " Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement ", Renewable Energy, Vol. 50, pp:378-386, 2013.
- [4]: **M. BOUTOUBAT,** " commande optimisée d'un aérogénérateur asynchrone doublement alimenté, application à une ferme éolienne à commande centralisée ", Thèse de Doctorat, Université de Laghouat, 2013.
- [5]: **P.W. CARLIN,** "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology ", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [6]: **Djilali Kairous,** "Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne ", l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie.2019.
- [7]: **GUASMI Abdenour , GUELMINE Said,** " Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA ", UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.2016/2017.

[8]: **DJAAFRI Othman, HARIZI Assam-Eddine**, "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne ", UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.2016/2017.

[9]: **M. T LATRECHE**, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012.

[10]: **REDJEM Radia** "*Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*" mémoire de magistère, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE.04/07/2009.

[11]: **YAICHI Hayat**, " Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur ",mémoire de magister , UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR.06/06/2018.

[12]: **M. K. IDJDARENE**, " Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", Thèse de doctorat d'université de Lille 1 (France).2010

[13]: **Y. BEKAKRA**, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider.21/10/2014.

[14]: **M.A HASSAD**, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.

[15]: **BEN AMAR ASMA**, " étude de la commande d'un système éolien base sur une GADA ", Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar – Batna.24/04/2016

Bibliographies

[16]: **Khelfat Lotfi. Maataoui Lakhdar** , "Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée",MEMOIRE DE MASTER,UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA. juin 2017.

[17]: **F. KENDOULI**, "centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine. 2012.

[18]: **S. AIMANI**, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 06/12/2004.

ملخص:

يعرض هذا العمل دراسة نظام الرياح والتحكم فيه استناداً إلى مولد غير متزامن مزدوج الإمداد (Mada) لتصحيح عامل الطاقة واستخراج أقصى طاقة من الرياح وضخ طاقة في شبكة الكهرباء. ولكي نفعل هذا، فقد اعتبرنا أن سلسلة تحويل الرياح تتألف من توربين مرتبط بجادة يتصل مقعدتها مباشرة بشبكة الكهرباء، في حين يتصل الدوار بالشبكة عبر جهاز إلكترونيات الطاقة يتألف من محولين (CCM و CCR). وقد تم تحقيق هذه الأهداف، المذكورة أعلاه، من خلال أمر المحولين عن طريق منظمات PI بسيطة مرتبطة بتقنية MLI الحالية للستريو.

كلمات مفتاحية:

المولد اللا تزامني المزدوج التغذية، التحكم الشعاعي تصميم النموذج.

Abstract :

This work presents the study and control of a wind system based on a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) for the correction of the power factor and the extraction of maximum power from the wind and injects it into the electricity grid. To do this, We considered, a wind conversion chain consisting of a turbine associated with a DFIG whose stator is connected directly to the electricity grid, while the rotor is connected to the network via a power electronics device consisting of two converters (MSC and NSC). These objectives, mentioned above, were achieved by ordering the two converters via simple PI regulators associated with the hysteresis current MLI technique.

Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, vector control.

Résumé :

Ce travail présente l'étude et la commande d'un système éolien à base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (MADA) pour la correction du facteur de puissance et l'extraction de puissance maximale à partir du vent et l'injecter dans le réseau

Résumé

électrique. Pour ce faire, Nous avons considéré, une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une GADA dont le stator est relié directement au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté au réseau via un dispositif d'électronique de puissance composé de deux convertisseurs (CCM et CCR). Ces objectifs cités ci-dessus, ont été atteints en commandant les deux convertisseurs via des régulateurs PI simples associés à la technique à MLI à hystérésis de courant.

Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, turbine, modélisation, onduleur, commande vectorielle.