الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــــــــــة

Faculté : Technologie
Département : Electrotechnique.
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique.
Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Étude d`une GADA pour la production d'énergie électrique.

Présenté par : FETATNIA SALAH
SAHTOUT SADDEK

Encadrant : OMEIRI AMAR Grade : prof Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

KELAIAIA SAMIA	MCA	Université d'Annaba	Président
OMEIRI AMAR	Prof	Université d'Annaba	Encadrant
BOUCHIKHA HOCINE	MCA	Université d'Annaba	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

الخلاصة

في هذه الأطروحة نقدم دراسة التحكم في توربينات الرياح على أساس GADA متصل بالشبكة. يعرض الفصل الأول عمومية توربينات الرياح وأنواعها المختلفة ومكوناتها الرئيسية وسنشرح كيفية تغطية الطاقة الحركية للرياح بالطاقة الكهربائية ومبدأ هذا التحويل، كما سنحدد تصنيف توربينات الرياح وتطبيقاتها على في نهاية هذا الفصل، نصف الآلة غير المتزامنة مزدوجة الطاقة .(GADA) إن تعديل الجزء الميكانيكي وجزء التحويل الكهروميكانيكي ونمذجة نظام طاقة الرياح، استنادًا إلى الآلة غير المتزامنة مزدوجة الطاقة هو تفصيله في الفصل الثاني). تم تخصيص الفصل الثالث للعاكس، حيث تم تصميمه قبل محولي الطاقة العكسيين، حيث يقوم المقوم بالاتصال بالشبكة، والمحول الذي يتصل بالدوار الخاص بآلة العاكس. وفي الفصل الرابع عرضنا التحكم المباشر والمحاكاة العامة لسلسلة التحويل في ماتلاب.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، GADA، العاكس متعدد المستويات، التحكم المباشر في المتجهات، .PWM

Résumé

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude d'une commande éolienne à base d'une GADA connecté au réseau. Le premier chapitre présente la généralité sur les éoliennes leur différents types et leur principaux composants et on va expliquer comment couvert l'énergie cinétique du vent à une énergie électrique et le principe de cette conversion nous déterminer également le classement des éoliennes et leurs applications à la fin de ce chapitre nous décrivons la machine asynchrone à double alimentation (GADA. La modalisation de la partie mécanique, la partie de conversion électromécanique et la modélisation du système éolien, basé sur la machine asynchrone double alimentée est détaillé dans le deuxième chapitre.). Le troisième chapitre été consacré à l'onduleur, nous modélisant avant les deux convertisseurs reverssibles de puissances , le redresseur faisant la liaison avec le réseau, et le convertisseur de liaison avec le rotor de la machine l'onduleur. Dans le quatrième chapitre nous avons présentées la commande directe et les simulations générales de la chaine de conversion sous Matlab.

Les mots clé : l'énergie éolienne, GADA, onduleur multi-niveau, commande vectorielle directe, MLI.

Abstract

In this thesis, we expose the study of a doubly fed induction generator control (DFIG) which maybe integrated in wind system connected to the network. The first chapter presented a state of the art on the wind mills, the various structures of feeding and the type of generator used; we chose the asynchronous generator with double power supply controlled through the rotor variables. The modalization of the mechanical part, the electromechanical conversion part and the modeling of the wind energy system, based on the double powered asynchronous machine is detailed in the second chapter.). The third chapter was devoted to the inverter, modeling us before the two reversible power converters, the rectifier making the connection with the network, and the converter connecting with the rotor of the inverter machine. The results obtained with simulation allowed the performance evaluation of two controls.

The keys words: Wind system, multi-level inverter, direct vector control, energy, a doubly fed induction generator control (DFIG)

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère qui est ma source de bonheur et qui m'a entourée d'amour et de tendresse, quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence a mes coté a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

Mon cher père pour son soutien inlassable et que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

Sans oublier mon frère et mes sœurs, puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

Et enfin à tous mes camarades et mes amis sans exception surtout tous nos collègues de groupe EI (Promo 2023/2024)

FETATNIA SALAH

DEDICACES

Je dédie ce travail:

A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices qui n'a jamais dit non a mes exigences et qui n'a épargner aucun effort pour me rendre heureux.

A la mémoire de mon père, parti trop tôt, j'espère qu'il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui toujours prie pour le salut de son âme. Puisse dieu le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

A mes frères et ma sœur, ma source de joie et de bonheur. A mes grands-mères, mes oncles et tantes que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

Et enfin a tout mes camarades et mes amis avec qui j'ai partagé tant de chose et d'instant inoubliable sans oublier tout mes collègues de groupe EI (Promo 2023/ 2024)

SAHTOUT SADDEK

REMERCIMENTS

On remercie le bon dieu tout puissant et miséricordieux pour nous avoir donné la santé et la volonté de réaliser ce mémoire.

On adresse aussi nos reconnaissances à tous les professeurs et au
corps administratifs de département d'électrotechnique pour leurs conseils et leurs connaissances généreusement transmises.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de ***M.Omeiri*** *on le remercie pour ses précieux conseils et remarques, son disponibilité et ses encouragements.*

Un grand remerciement plein d'amour pour nos parents qui nous ont tellement soutenues avec l'aide et les motivations ainsi que les
moyens qu'ils nous ont procuré et nous ont facilité la réalisation de ce projet.

Nos profonds remerciement aux membres de nos deux familles (sœurs et frères) chacun en son nom pour leurs constants soutiens au cours de notre cursus universitaire et particulièrement cette année.

A touts nos amis avec qui nous avons passé d'agréables moments, pour leurs aides et encouragements.

Enfin, nos remerciements vont également aux membres de juré d'avoir accepté de juger notre travail.

Liste des symboles

CP Coefficient de puissance

Ce Couple électromagnétique N.m

Cr Couple résistant N.m

$Caéro$ Couple aérodynamique de la turbine N.m

J Moment d'inertie des parties tournantes K.g.m2

f Coefficient de frottement visqueux de la MADA N.m.s/rad

G Rapport de vitesse du multiplicateur

g Glissement

Kp, Ki Gains du régulateur PI classique

Msr Inductances mutuelles entre le stator et le rotor H

Ms Inductances mutuelles entre les phases statoriques H

Mr Inductances mutuelles entre les phases rotoriques H

$Pmec$ Puissance mécanique sur l'arbre de la machine W

Pr Puissance active rotorique W

PS Puissance active statorique W

Pv Puissance portée par le vent W

$Prés$ Puissance de réseau W

Qs Puissance réactive statorique VAR

R Rayon de la turbine m

Rs Résistances statorique Ω

Rr Résistances rotorique Ω

LS Inductances propres statorique H

Lr Inductances propres rotorique H

S Surface balayée par le rotor de la turbine m

$Caér$ Couple aérodynamique de la turbine W

$iabcr$ Courants instantanés des phases rotoriques A

$vabcr$ Tensions instantané des phases rotoriques V

$iabcs$ Courants instantanés des phases statoriques A

$vabcs$ Tensions instantané des phases statoriques V

$idqr$ Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q) A

$vdqr$ Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q) V

$idqs$ Composantes du courant statoriqe dans le repère (d, q) A

$vdqs$ Composantes de tension statoriqe dans le repère (d, q) V

p Nombre de paires de pôles

Liste des symboles

s Opérateur de Laplace

$vabcr$ Tensions instantanées des phases rotoriques V

$vabcs$ Tensions instantanées des phases statoriques V

$vdqr$ Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q) V

$vdqs$ Composantes de tension statorique dans le repère (d, q) V

β Angle de calage des pales °

Ω vitesse de rotation mécanique du rotor rd/sec

Ωmec Vitesse de rotation mécanique rd/sec

Ωref vitesse mécanique de la génératrice de référence rd/sec

θ Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique . rd

θs Position de stator rd

θr Position électrique de rotor rd

λ Vitesse spécifique

$\lambda cpmax$ Vitesse spécifique optimale de l'éolienne

ω Vitesse angulaire de rotation du rotor rd/sec

$\omega coor$ Vitesse angulaire du repère biphasé rd/sec

ωS Pulsation des courants statoriques rd/sec

$\emptyset abcr$ Flux instantanés des phases rotoriques Wb

$\emptyset abcs$ Flux instantanés des phases statoriques Wb

$\emptyset dqr$ Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q) Wb

$\emptyset dqs$ Composantes du flux statorique dans le repère (d, q) Wb

PI Proportionnelle intégrale

[P (θ)] $^{-1}$ Transformation de Park inverse

[P (θ)] Transformation de Park directe

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA Générateur Asynchrone à Double Alimentation

MLI Modulation de Largeur d'Impulsions

MPPT Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale

$\Omega cut - out$ Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est arrêtée Puissance mécanique fournie par l'arbre

$\Omega cut - in$ Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l éolienne est démarrée

Sa,b,c États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension

Ki Paramètre intégrateur

KP Paramètre proportionnel

Liste des figures

Figure I.1 Principe de la conversion d'énergie. 5
Figure I.2 Principaux composants d'une éolienne. 6
Figure I.3 éolienne de Savonius. 7
Figure I.4 Eoliennes type Darrieu. 7
Figure I.5 Eoliennes à axe horizontal. 8
Figure I.6 Tube de courant autour d'une éolienne. 10
Figure I.7 Coefficient de puissance. 12
Figure I.8 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. 14
Figure I.9 Éolienne directement connectée au réseau. 16
Figure I.10 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur. 17
Figure I.11 Système avec GS pour un fonctionnement à vitesse variable. 18
Figure I.12 Système à vitesse variable par double alimentation. 19

Figure II.1 Schéma global de l'ensemble turbine éolienne, GADA. 22
Figure II.2 Courbe de coefficient $cp\lambda,\beta$ 25
Figure II.3 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide. 26
Figure II.4 Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne. 26
Figure II.5 Modèle de l'éolienne. 27
Figure II.6 Axes de repères (abc) machine asynchrone. 27
Figure II.7 Axes de repères (d, q). 29

Figure III.1 Convertisseur monté au rotor de la GADA. 37
Figure III.2 Onduleur. 38
Figure III.3 Schéma s bloc de l'onduleur. 40
Figure III.4 Structure du redresseur à MLI. 41
Figure III.5 Schéma bloc du redresseur à MLI. 43

Figure VI.1 schéma structurel du système éolien global. 45
Figure VI.2 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne. 46
Figure VI. 3 la turbine éolienne. 46
Figure VI.4 Multiplicateur. 46
Figure VI.5 Modèle de GADA. 47
Figure VI.6 La tension et le courant statorique. 47
Figure VI.7 La tension et le courant rotorique. 48
Figure VI.8 La puissance Active et reactive. 48
Figure VI.9 la vitesse et couple 48

Liste des tableaux

Tableau II.1 Coefficients définissant l'évolution de Cp 24

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I - Généralité sur l'énergie éolienne 3

I. Introduction 4

I.2 Définition de l'énergie éolienne 4

I.3 Principaux composants d'une éolienne 5

I.3.1. Le mât 5

I.3.2. Les pales 5

I.3.3. La nacelle 5

I.4 Les différents types d'éolienne 6

I.4.1. Eolienne à axe vertical 6

I.4.2 Eoliennes à axe horizontal 8

I.5 Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz) 8

I.6 Fonctionnement optimal d'une éolienne 13

I.6.1 Système d'orientation des pales ou "Pitch Control" 14

I.6.2 Système à décrochage aérodynamique ou "Stail Control" 15

I.7 Etat de l'art sur la conversion électromécanique 15

I.7.1 Système utilisant les machines asynchrones à cage (MAS) 16

I.7.2 Système utilisant les machines Synchrone 17

I.7.3 Système utilisant les machines double alimentation stator-rotor 18

I.8 Conclusion 19

Chapitre II - Modélisation d'une turbine éolienne associée à un générateur asynchrone double alimentation 21

II.1 Introduction 22

II.2 Schéma global de modélisation de l'ensemble turbine éolienne, générateur asynchrone à double alimentation, lors d'un fonctionnement réseau 22

II.3 Modélisation de la turbine éolienne 23

II.3.1 Couple aérodynamique de la turbine 23

II.3.2 Modèle à une masse du multiplicateur (Gear box) 25

II.4 Modélisation de la Machine Asynchrone 27

II.4.1 Modèle de la Machine asynchrone dans le Repère (ab c) 27

II.4.2 Modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park (d, q) 29

II.4.2.1 Transformation de Park 29

II.4.2.2 Équation de tension dans le référentiel de Park 31

II.4.2.3 Équations de flux en coordonnées de Park 32

II.4.2.4 Équations des puissances dans le référentiel de Park 32

II.4.2.5 Équations du couple électromagnétique dans le référentiel de Park 33

Table des matières

II.4.3 Choix du référentiel (d, q) *33*
II.4.3.1 Référentiel lié au stator *33*
II.4.3.2 Référentiel lié au rotor *33*
II.4.3.3 Référentiel lié au champ tournant *33*
II.5 Commande vectorielle de la machine asynchrone *33*
II.5.1 Commande vectorielle directe et indirecte *34*
II.6 Conclusion *34*
Chapitre III - Modélisation des Convertisseurs statiques *36*
III.1 Introduction *37*
III.2 Modélisation des Convertisseurs statiques. *37*
III.3 Modélisation Onduleur de tension *38*
III.4 Modélisation du redresseur *40*
III.4.1 Le réseau *41*
III.4.2 L'étage Convertisseur *42*
III.4.3 La charge *42*
III.5 Conclusion *43*
Chapitre IV - Association et simulation de la chaine éolienne *44*
IV.1 Introduction *45*
IV.2 Performances de la chaine complete *45*
VI.3 La turbine éolienne *46*
VI.4 Modèle de GADA *47*
VI.5 Les résultats de simulation *47*
VI.5.1 Interprétation des résultats *49*
VI.6 Conclusion *49*
Conclusion générale *50*
Bibliographie *51*

Introduction générale

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

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO2 par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW.

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

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

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes, les éléments constituants ainsi la modélisation de l'éolienne.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse fixe. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle qui permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive .

Dans le troisième chapitre, on va présenter la modélisation de l'alimentation du rotor, basée sur deux convertisseurs électroniques commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). L'un de ces deux convertisseurs (celui du coté réseau) est commandé pour assurer la stabilisation de la tension du bus continu alimentant le deuxième convertisseur et des courants sinusoïdaux purement actifs à l'entrée. Ce dernier est placé du coté du rotor, il est commandé pour garantir un réglage du couple électromagnétique de la machine à sa consigne optimale qui correspond à la production maximale de l'énergie et permettre l'orientation du flux statorique de la machine tout en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au stator.

Dans le quatrième chapitre nous avons présentées la commande directe et les simulations générales de la chaine de conversion sous Matlab

Chapitre I - Généralité sur l'énergie éolienne

Chapitre I - Généralité sur l'énergie éolienne

I. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettent de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on décrit le système éolien. On montre ses éléments et son principe de fonctionnement, on présente les principaux types du système et leurs applications, leurs systèmes de régulation mécanique utilisés pour avoir un meilleur rendement, puis l'impact de l'énergie éolienne. Ainsi que les différents types des machines utilisées dans l'éolienne.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne, est un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [2]. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique

Le fonctionnement général est illustré par la (Figure I.1). L'ensemble de la chaîne de Conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [3].

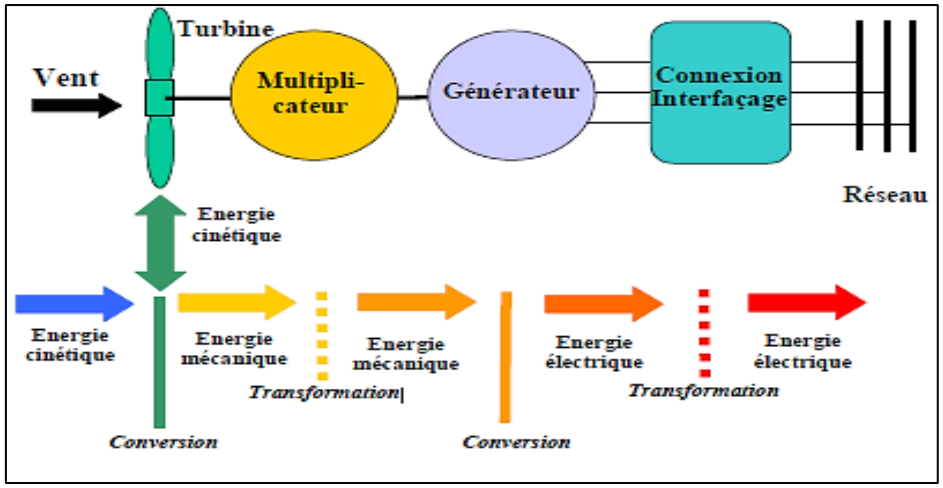

Figure I.1 Principe de la conversion d'énergie.

I.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour (Le mât). Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement (Figure I.2).

I.3.1. Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

I.3.2. Les pales

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.3.3. La nacelle

Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement

une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

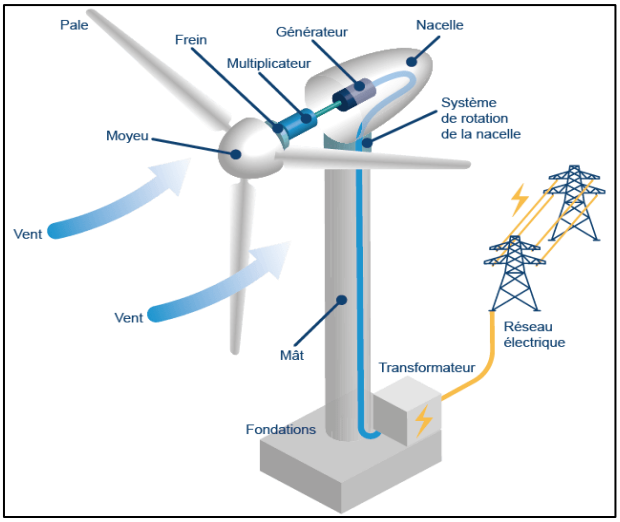

Figure I.2 Principaux composants d'une éolienne.

I.4 Les différents types d'éolienne

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.4.1. Eolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [4].

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.3) [5].

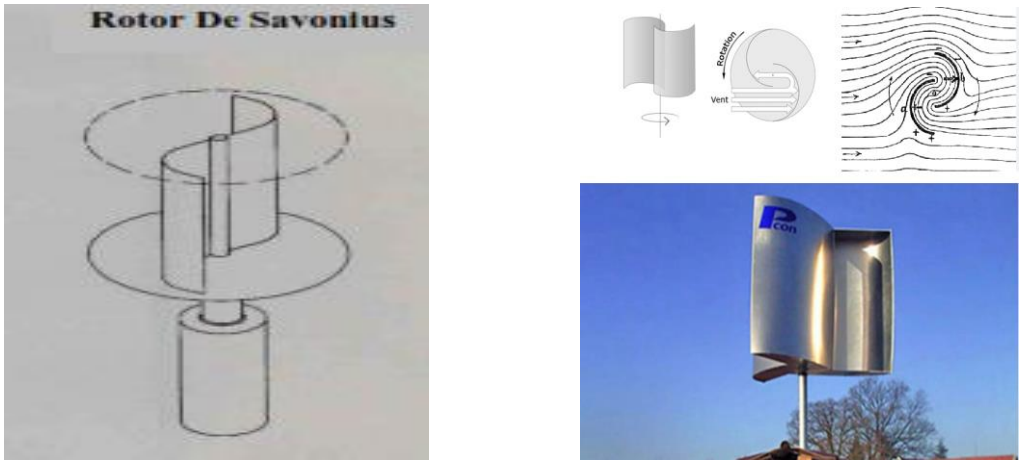

Figure I.3 éolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [6].

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause les contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace

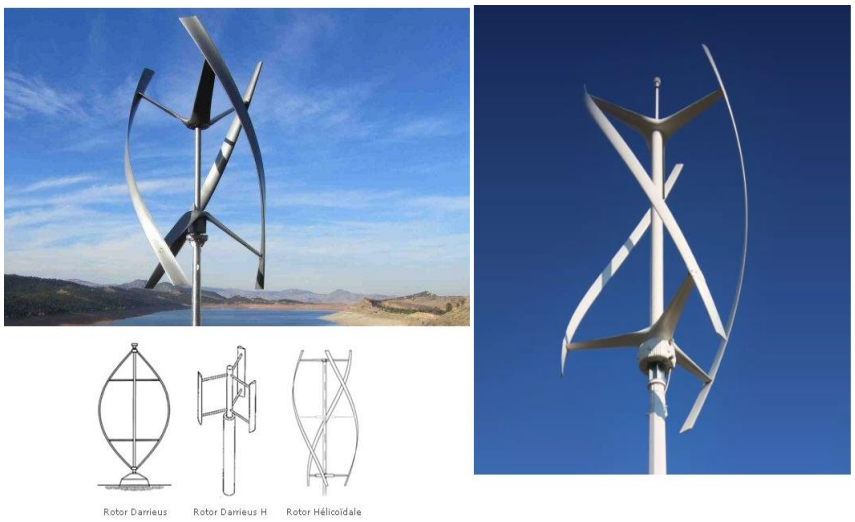

Figure I.4 Eoliennes type Darrieu.

I.4.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [5]. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [6]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [6] (Figure I.5).

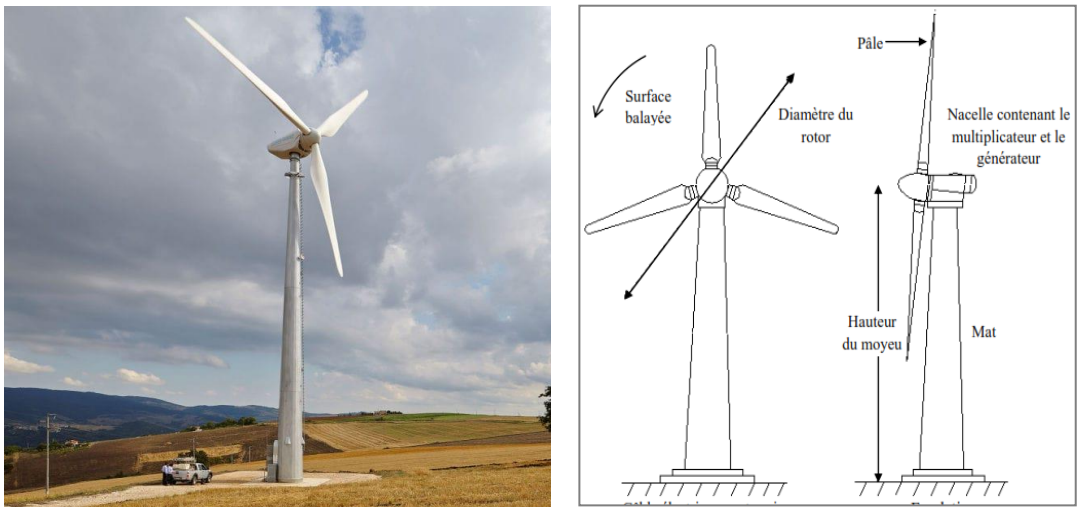

Figure I.5 Eoliennes à axe horizontal.

I.5 Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) (C_{Pmax}=0.593), de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois. Son livre "Wind-Energie" (Energie éolienne) publié en 1926 donne une bonne idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque [18]. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique que l'on peut extraire d'un flux d'air dans un domaine ouvert, indépendamment de l'éolienne utilisée [7]. Il a déterminé cette limite en considérant les hypothèses suivantes :

- On considère l'écoulement incompressible et stationnaire, et on raisonne en une dimension (ID) par tranches uniformes.

- On considère que l'air qui interagit avec le disque hélice de l'éolienne est constitué d'un cylindre à l'infini amont, et d'un cylindre à l'infini aval.
- On néglige l'interaction du vent environnant avec le sillage ainsi défini. Betz calcule que.
- La puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.
- Cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air. On peut regrouper ces résultats selon ces formules :

$$P_{extrate}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente}$$

(1.1)

Avec :

$$P_{incidente} = P_{incidente} = \frac{1}{2}\, \rho . S . V^3 \qquad (1.2)$$

Lorsque :

$$V_{aval} = \frac{1}{2}\, V_{amont} \qquad (1.3)$$

ρ : masse volumique de l'air (1 ,20 kg/m^3 pour l'air à 20°C)

S : surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m^2

V_{amont}: vitesse incidente (amont) du vent en *m/s*

Cette démonstration repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler) [8].

- Pour toutes les variables suivantes, l'indice 1 correspond à l'entrée des pales et l'indice 2 correspond à la sortie

p : Pression

V : Vitesse de l'air

Dm : Débit massique d'air

F : Force exercée par l'air sur le capteur éolien

P_f *:* Puissance développée par la force exercée.

Dans le cas examiné le débit massique est constant *Dm =ρ.S. V = este.*

Considérons quatre points sur une même ligne de courant : un point en amont (sur

S_1), Un point (juste avant» le capteur éolien proprement dit, un autre (juste après», et un dernier en aval (sur S_2) :

Aux deux points loin du capteur éolien, sur S_1et S_2, la pression est égale à la pression atmosphérique *po.*

Aux deux points proches du capteur, la section est égale à la surface S, comme le débit massique est constant la vitesse du vent est la même en ces deux points : *V.* En revanche il y a une discontinuité de pression entre ces deux points

On applique le théorème de Bernoulli deux fois, d'une part entre l'amont et le point juste avant, d'autre part le point juste après et l'aval ; on a donc [8] :

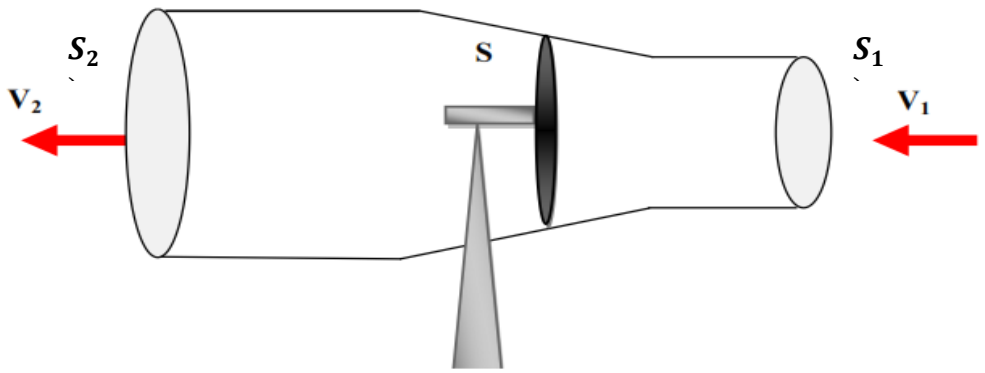

Figure I.6 Tube de courant autour d'une éolienne.

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{{V_1}^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \qquad \text{(I.4)}$$

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{{V_2}^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V^2}{2} \qquad \text{(I.5)}$$

La soustraction (I.4) - (I.5) donne

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) \quad \text{(I.6)}$$

La force exercée par le vent sur le capteur est :

$$F = (P_1 - P_2).S = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2).S = \rho.S.\frac{(V_1+V_2)}{2}.(V_1 - V_2) \quad \text{(I.7)}$$

Mais cette force peut aussi s'exprimer par application de la loi de Newton :

$$F = m.\frac{dv}{dt} = Dm.\Delta v = \rho.S.V.(V_1 - V_2) \quad \text{(I.8)}$$

L'égalité des deux expressions (I.7) et (I.8) implique que $V = \frac{(V_1+V_2)}{2}$ et la puissance développée par cette force est:

$$P_f = F.V = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2).S.V \quad \text{(I.9)}$$

Si on exprime cette puissance en fonction de $x = \frac{V_2}{V_1}$ (ratio de vitesse), du rendement C_p(coefficient de puissance) et de P_0 (la puissance incidente du vent non perturbé $P_0 = \frac{1}{2}\rho.S.{V_1}^3$) on obtient :

$$V = V_1\frac{1+x}{2} \quad \text{(I.10)}$$

Et

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}(1 - x^2)(1 + x)$$

(I.11)

On peut alors tracer le coefficient de puissance C_p de l'éolienne en fonction du ratio de vitesse x

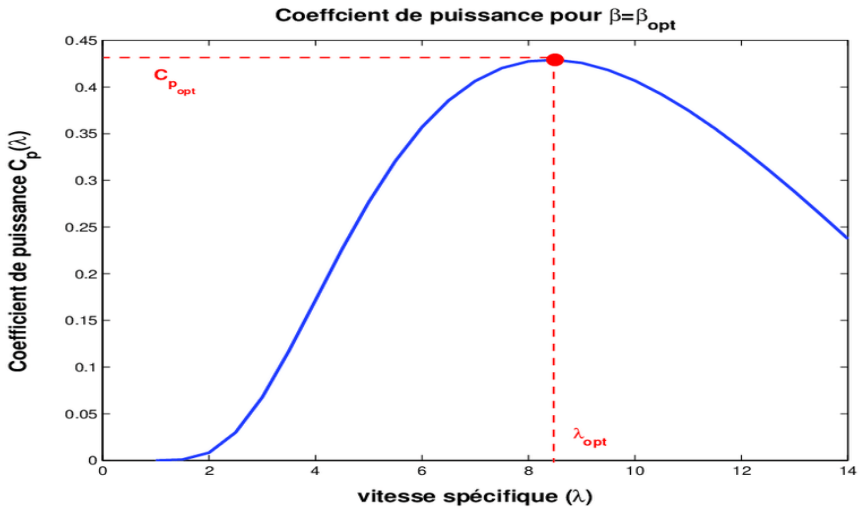

Figure I.7 Coefficient de puissance.

Le maximum est atteint pour $x = \frac{1}{3}$ et alors$C_p = \frac{16}{27}$. D'où la limite de Betz :

$$P_{extrate}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente}$$

Le calcul fait un certain nombre d'hypothèses qui font de ce maximum un majorant, et non un maximum atteignable. Des calculs modernes plus élaborés [9], [10] montrent que le maximum est plus bas. A la limite de Betz, le vent voit sa vitesse divisée par trois ; pour maintenir le même débit, la surface de sortie doit donc être multipliée par trois. On voit que la courbe du rendement est assez plate, ce qui signifie que le rendement reste assez bon même quand on s'éloigne significativement de l'optimum.

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.

On définit alors un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_{extrate}^{max}}{P_{incidente}}$$

(I.12)

On peut écrire donc :

$$P_{extrate}^{max} = C_p(\lambda).P_{incidente} = \frac{1}{2}.C_p(\lambda).\rho.S.V_1^3 \quad (I.13)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R_p \Omega_{tl}}{V_1} \quad (I.14)$$

Ω_{tl} : est la vitesse de rotation avant multiplicateur (axe lent) et R_p: est le rayon de Pale de l'éolienne.

On note que ce coefficient de puissance *Cp* peut évoluer pour le même type de turbine en fonction du nombre des pales 1, 2, 3 et 4, mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0.59). Et pour la même turbine ce coefficient peut varier aussi en fonction de l'angle de calage qui indique le degré d'inclinaison des pales.

I.6 Fonctionnement optimal d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement (Figure I.8).

- La vitesse de démarrage V_{min} qui représente la vitesse de début de fonctionnement .

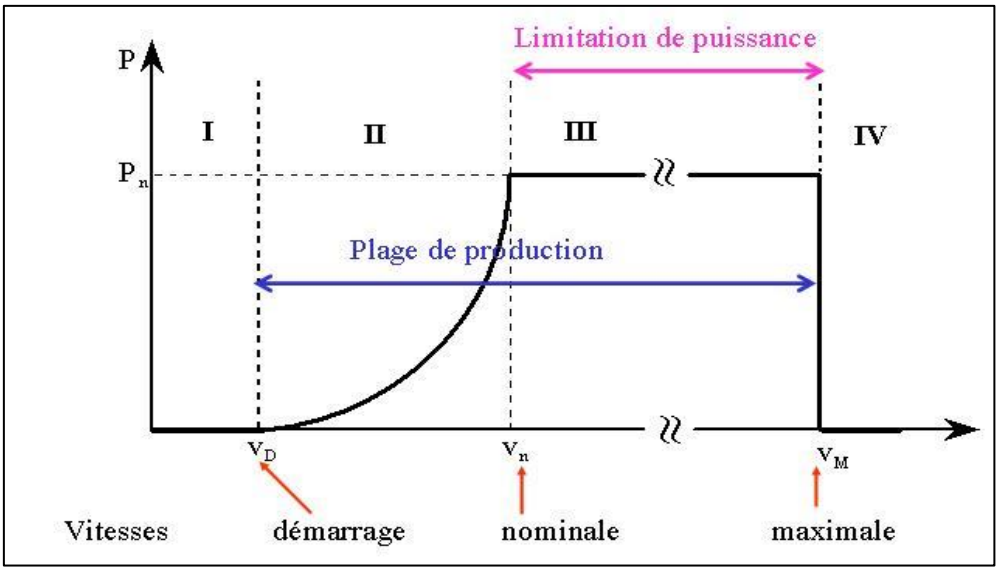

Figure I.8 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Zone I : $V < \boldsymbol{V_{min}}$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $\boldsymbol{V_{min}} < V < \boldsymbol{V_n}$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $\boldsymbol{V_n} < V < \boldsymbol{V_{max}}$:La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $\boldsymbol{V_{max}} < V$: la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux (β =90°)

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines sous les noms de "Pitch Control" et "Stall Control".

I.6.1 Système d'orientation des pales ou "Pitch Control"

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire

En agissant par le Pitch Control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ comme précédemment mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone III à sa valeur maximale [11].

On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le Pitch Control dans un système de régulation automatique de vitesse de rotation on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique avec des servomoteurs, ce qui va permettre :

Le démarrage à une vitesse du vent V_{min} réduite ;

La régulation de la vitesse angulaire de la turbine Ω_t pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale V_n ;

L'optimisation du régime de conversion de l'énergie quand la vitesse du vent évolue entre V_{min} et V_n ;

La protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ($> V_{max}$) par la mise en drapeau des pales sans nécessité d'un système puissant de freinage pour les arrêts d'urgence.

I.6.2 Système à décrochage aérodynamique ou "Stail Control"

C'est un régulateur par décrochage aérodynamique, autrement dit le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d'une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinageen bout. Cette technique du "Stall Control" a aussi quelques avantages [12] :

- Pas de système de contrôle d'angle de calage ;
- Construction plus simple et moins couteuse du rotor ;
- Maintenance plus aisée et fiabilité meilleure.

Cependant, ce système de contrôle manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté [5]. Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stail Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control.

I.7 Etat de l'art sur la conversion électromécanique

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [13]. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement

utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

I.7.1 Système utilisant les machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses [14]. Dans cette structure, le rotor de la machine est couplé à l'arbre de la turbine et ses enroulements sont court-circuités, tandis que le stator est directement connecté au réseau par l'intermédiaire d'un banc de condensateur assurant sa magnétisation (Figure I.9).

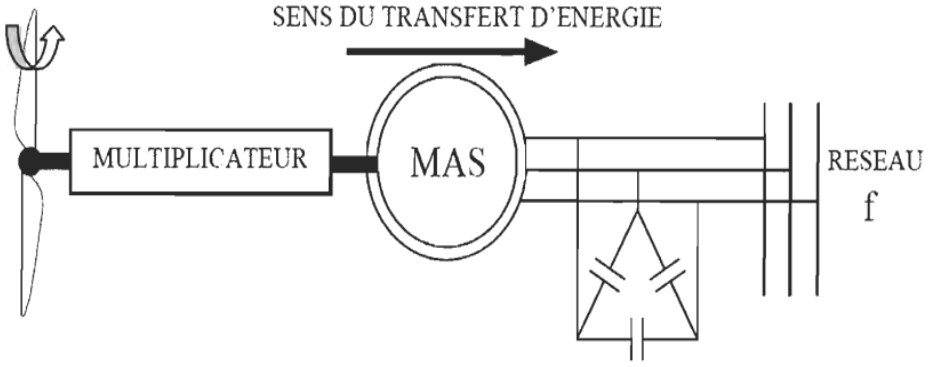

Figure I.9 Éolienne directement connectée au réseau.

La machine fonctionne sur une plage de vitesse très limitée à cause de son nombre de paires de pôles qui fixe. La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs [15]. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau) permet de limiter la maintenance sur la machine.

L'avantage de cette structure est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance extraite du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/ décrochage au réseau [15]. En plus, ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'ajout d'un banc condensateur représentées sur la (Figure I.9) qui devient la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [15].

L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau permet un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [16]. Comme l'indique-la (Figure I.10), ceci entraîne une amélioration du rendement et de la qualité d'énergie du système éolien de la (Figure I.9). En plus, permet la machine de fonctionner à vitesse variable. Cependant, l'interface de l'électronique de puissance est dimensionnée pour la totalité de la puissance nominale ce qui engendre d'énorme perte. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Mais, on peut résoudre ce problème en utilisant un convertisseur bidirectionnel qui nous permettra de prendre l'énergie du réseau pour la magnétisation du rotor si nécessaire. Toutefois, cette solution alourdit le système éolien en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure [17].

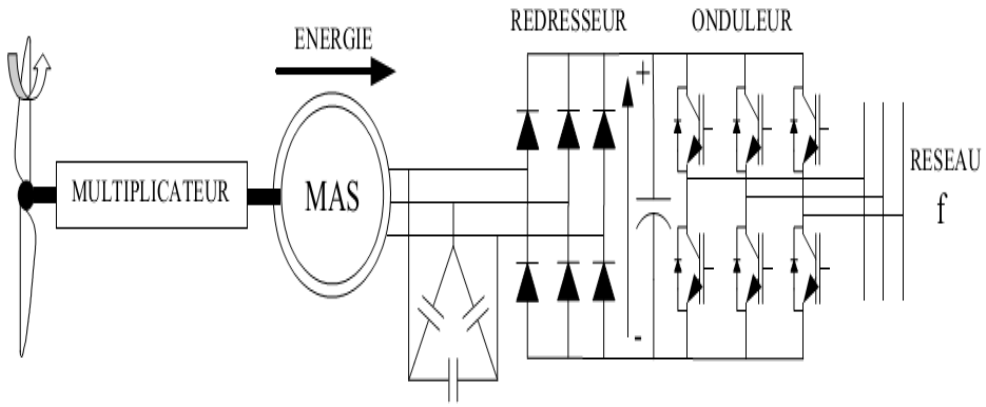

Figure I.10 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.

I.7.2 Système utilisant les machines Synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur l'IG est l'absence de courant réactif de magnétisation. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte

un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite. (Figure I.11), la régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles.

Le générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) est plus simple est moins coûteux avec la caractéristique d'auto excitation qui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne

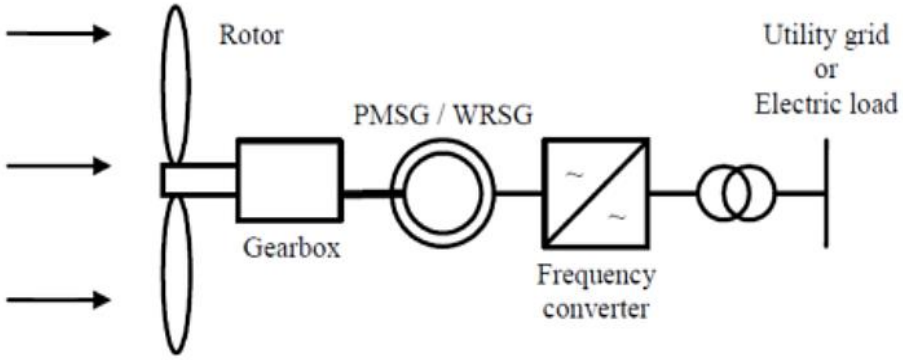

Figure I.11 Système avec GS pour un fonctionnement à vitesse variable.

I.7.3 Système utilisant les machines double alimentation stator-rotor

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne, [6]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.12). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor,

Actuellement, c'est la structure la plus utilisée vu les avantages qu'elle apporte. En effet, en plus de la vitesse variable, cette structure offre une gestion de puissance très

efficace en utilisant une interface d'électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de sa puissance nominale [18].

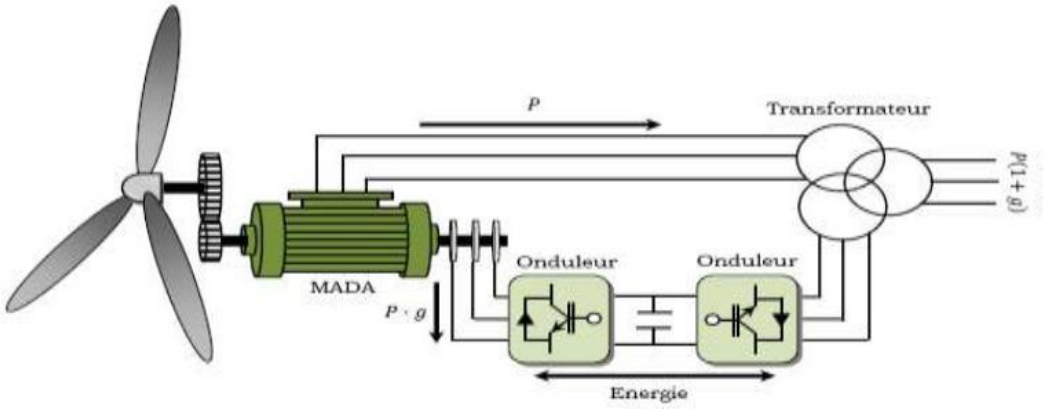

Figure I.12 Système à vitesse variable par double alimentation.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne. Après un rappel des notions de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les principaux composants d'une éolienne ont été décrits. Dans ce chapitre nous avons également parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. On a présenté aussi la loi aérodynamique de Betz. On donné le principe des deux techniques de réglage de puissance « Pitch Control » et « Stail Control ». Enfin, on a présenté l'état de l'art sur la conversion électromécanique à travers différentes structures de génératrice éolienne parmi lesquelles on a choisi le système éolien à base de machine double alimentation.

Chapitre II - Modélisation d'une turbine éolienne associée à un générateur asynchrone double alimentation

II.1 Introduction

Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché. La machine asynchrone à double alimentation, a connu ces dernières années, grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et la maîtrise des techniques de commande (vectorielle, directe du couple, par mode glissant ...) une croissance considérable ; et elle est devenue la machine la plus utilisée surtout dans le domaine d'entraînement à vitesse variable car cette dernière présente l'avantage d'être plus robuste et moins coûteuse que les autres machines.

La configuration proposée dans ce travail est constitué d'une turbine éolienne reliée au générateur asynchrone à double alimentation à travers un multiplicateur. La tension alternative délivrée est convertie en tension continue par l'intermédiaire d'un redresseur à MLI. La sortie continue de ce dernier sera emmagasinée dans un condensateur dans le but de pouvoir l'exploiter ultérieurement. Ainsi la chaine de conversion éolienne permet un fonctionnement au réseau du générateur.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la modélisation de la turbine, le multiplicateur et la génératrice asynchrone à double alimentation. La deuxième partie sera consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en introduisant la commande vectorielle.

II.2 Schéma global de modélisation de l'ensemble turbine éolienne, générateur asynchrone à double alimentation, lors d'un fonctionnement réseau

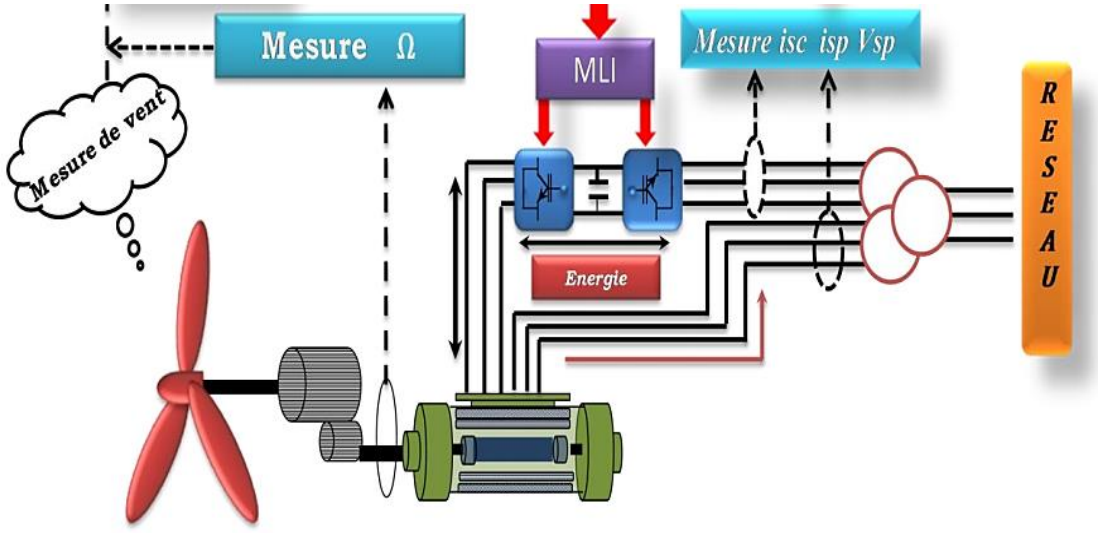

Figure II.1 Schéma global de l'ensemble turbine éolienne, GADA.

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1 Couple aérodynamique de la turbine

La puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine P_Ts'écrit sous la forme suivante :

$$\boldsymbol{P_T = \frac{1}{2} S.\rho.C_p(\lambda,\beta).V} \quad \textbf{(II.1)}$$

Avec *S*la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air et V la vitesse du vent.

$$\boldsymbol{S = \pi R_p{}^2} \quad \textbf{(II.2)}$$

R_p: Rayon de la turbine (longueur de pale).

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins la modélisation utilisée dans ce travail apparait dans d'autres références [18]. Elle a l'avantage de se présenter sous la forme d'une seule équation, valable quel que soit l'angle de calage β et quel que soit le rapport de vitesse λ.

Le coefficient de puissance $C_p$dans notre étude est en fonction du rapport de vitesse λ, et de l'angle de calage des pales β donné par l'expression suivante, [19], [2] :

$$\boldsymbol{C_p(\lambda,\beta) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda} \quad \textbf{(II.3)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}\right)} \quad \textbf{(II.4)}$$

Où :

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{R_p\Omega_T}{V}} \quad \textbf{(II.5)}$$

Ω_T: Vitesse de la turbine.

c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 : Coefficientsqui dépendent de la turbine considérée. Leurs valeurs [5] sont données dans le (Tableau 2.1).

Coefficient	Valeur
c_1	**0.5176**
c_2	**116**
c_3	**0.4**
c_4	**5**
c_5	**21**
c_6	**0.0068**

Tableau II.1 *Coefficients définissant l'évolution de* C_p .

Sur la Figure II.2, plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal (λ_{opt}=8.1; C_{pmax} =0.475; β=0°). Ce point correspondant au maximum du coefficient de puissance $C_p$et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

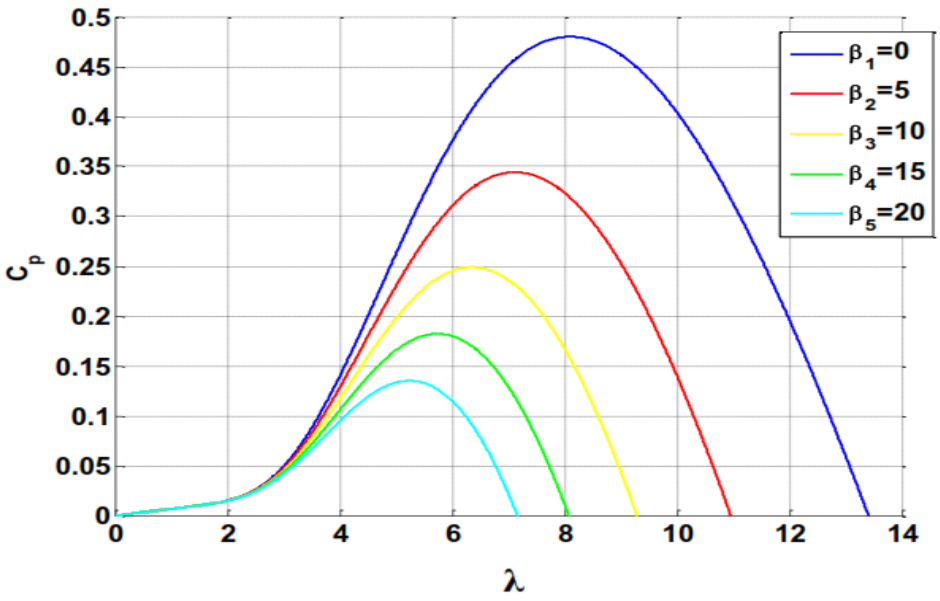

Figure II.2 Courbe de coefficient$c_p(\lambda,\beta)$.

La puissance aérodynamique de l'éolienne peut être aussi exprimée comme suite :

$$P_{T=}\Omega_{T.}T_T \quad (II.6)$$

L'expression du couple aérodynamique $T_T$est alors donnée par :

$$T_{T=}\frac{1}{2}\rho.\pi.R_P^2.\frac{c_p(\lambda,\beta)}{\Omega_T}.V^3 \quad (II.7)$$

II.3.2 Modèle à une masse du multiplicateur (Gear box)

Le modèle dynamique de la turbine éolienne est le modèle à une masse et est illustré par la Figure II.3. Les hypothèses posées sont :

On néglige l'inertie de l'axe lent et du multiplicateur par rapport à l'inertie des pales.

Les frottements sont négligés.

L'inertie de la génératrice peut être négligée devant celle de la turbine.

Le multiplicateur a pour objectif l'adaptation entre la vitesse de rotation de la turbine et celle de la génératrice. Dans le cas d'un multiplicateur idéal, le rapport de transmission peut être donné par :

$$M=\frac{T_{Tl}}{T_{Tr}}=\frac{\Omega_{Tr}}{\Omega_{Tl}} \quad (II.8)$$

Où :

T_{Tl}, T_{Tr}Couples de la turbine sur l'axe lent et l'axe rapide.

Ω_{Tr},Ω_{Tl}vitesses de rotation de la turbine sur l'axe lent et rapide.

Alors, l'équation dynamique de la turbine éolienne est donnée par :

$$J_{Tr}\frac{d_{\Omega Tr}}{dt}=T_{Tr}-T_g \quad (II.9)$$

Avec :

$$J_{Tr}=\frac{J_p}{M^2} \quad (II.10)$$

Où :J_pInertie des pales.

J_{Tr}Inertie totale déplacée sur l'axe rapide de la génératrice.

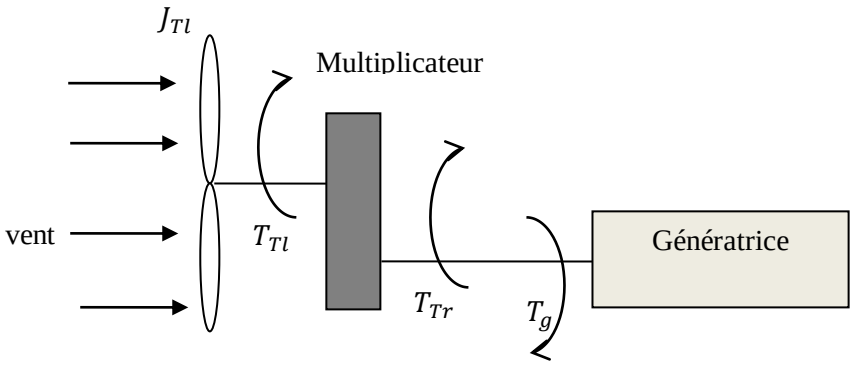

Figure II.3 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide.

On détermine la consigne de vitesse à envoyer au régulateur en utilisant le couple de la turbine sur l'axe rapide T_{Tr}et le couple électromécanique de la génératriceT_g. Ainsi, l'équation (II.9) devient alors :

$$\Omega_{Tr} = \int \frac{T_{Tr} - T_g}{J_{Tr}} . dt \quad \textbf{(II.11)}$$

L'expression (II.11) est représentée sous forme d'un schéma bloc comme suit :

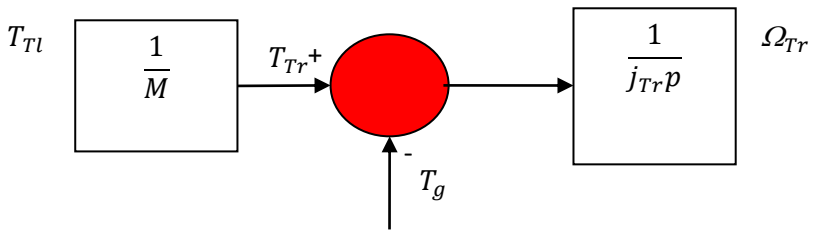

Figure II.4 Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne.

La Figure II.5 montre le synoptique global du modèle de l'éolienne.

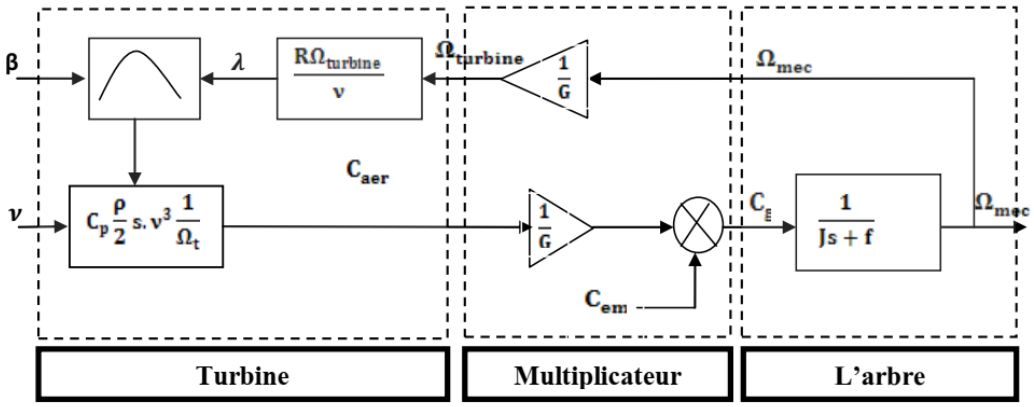

Figure II.5 Modèle de l'éolienne.

II.4 Modélisation de la Machine Asynchrone

II.4.1 Modèle de la Machine asynchrone dans le Repère (ab c)

Dans le repère classique il y a trois axes (a_s, b_s, c_s) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe *as* est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Comme les stators des machines asynchrones et synchrones sont pareils, les repères statoriques pour les deux types de machine sont identiques. Quant aux rotors, on a toujours trois axes (a_r, b_r, c_r)correspondant aux trois enroulements rotoriques) pour la machine asynchrone (MAS).

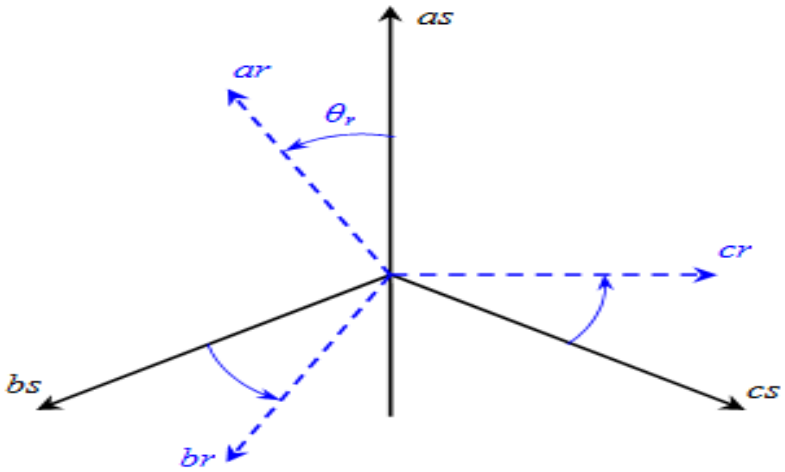

Figure II.6 Axes de repères (abc) machine asynchrone.

En adoptant le fonctionnement moteur de la machine, les tensions aux bornes des enroulements statoriques et rotoriques sont exprimées en fonction des courants et des variations des flux totaux qui les traversent selon les lois fondamentales de Kirchhoff et Faraday comme suit :

$$[\boldsymbol{V_{abcs}}] = [\boldsymbol{R_s}].[\boldsymbol{i_{abcs}}] + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}[\boldsymbol{\varphi_{abcs}}] \textbf{(II.12)}$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{V_{as}} \\ \boldsymbol{V_{bs}} \\ \boldsymbol{V_{cs}} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{R_s}]. \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{as}} \\ \boldsymbol{i_{bs}} \\ \boldsymbol{i_{cs}} \end{bmatrix} + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi_{as}} \\ \boldsymbol{\varphi_{bs}} \\ \boldsymbol{\varphi_{cs}} \end{bmatrix} \textbf{(II.13)}$$

Et pour le rotor (à cage) en court-circuit, donc tensions rotoriques nulles :

$$[\boldsymbol{V_{abcr}}] = [\boldsymbol{R_r}].[\boldsymbol{i_{abcr}}] + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}[\boldsymbol{\varphi_{abcr}}] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \textbf{(II.14)}$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{V_{ar}} \\ \boldsymbol{V_{br}} \\ \boldsymbol{V_{cr}} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{R_r}]. \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{ar}} \\ \boldsymbol{i_{br}} \\ \boldsymbol{i_{cr}} \end{bmatrix} + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi_{ar}} \\ \boldsymbol{\varphi_{br}} \\ \boldsymbol{\varphi_{cr}} \end{bmatrix} \textbf{(II.15)}$$

Les flux totaux traversant chaque enroulement sont exprimés en fonction des différents courants par :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi_{as}} \\ \boldsymbol{\varphi_{bs}} \\ \boldsymbol{\varphi_{cs}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{L_s} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{as}} \\ \boldsymbol{i_{bs}} \\ \boldsymbol{i_{cs}} \end{bmatrix} + \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{ar}} \\ \boldsymbol{i_{br}} \\ \boldsymbol{i_{cr}} \end{bmatrix} \textbf{(II.16)}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi_{ar}} \\ \boldsymbol{\varphi_{br}} \\ \boldsymbol{\varphi_{cr}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{L_r} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{ar}} \\ \boldsymbol{i_{br}} \\ \boldsymbol{i_{cr}} \end{bmatrix} + \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{as}} \\ \boldsymbol{i_{bs}} \\ \boldsymbol{i_{cs}} \end{bmatrix} \textbf{(II.17)}$$

Avec :

V_{as} , $V_{bs} et V_{cs}$: Les tensions statoriques dans le repère *abc*,

V_{ar} , $V_{br} et V_{cr}$: Les tensions rotoriques dans le repère *abc*,

i_{as} , $i_{bs} et i_{cs}$: Les courants statoriques dans le repère *abc*,

i_{ar} , $i_{br} et i_{cr}$: Les courants rotoriques dans le repère *abc*,

φ_{as} , $\varphi_{bs} et \varphi_{cs}$:Lesfluxstatoriques dans le repère *abc*,

φ_{ar} , $\varphi_{br} et \varphi_{cr}$: Lesfluxrotoriques dans le repère *abc*,

$R_s \; et \; R_r$: Les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique,

$L_s et L_r$: Les inductances cycliques respectives des bobinages statorique et rotorique.

M : L'inductance mutuelle

II.4.2 Modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park (d, q)

II.4.2.1 Transformation de Park

La transformation de Park permet d'obtenir une représentation biphasée équivalente de la machine. Le système de coordonnées abc est transformé en système de coordonnées orthogonales tournant *(d, q)* ; voir figure II.7.

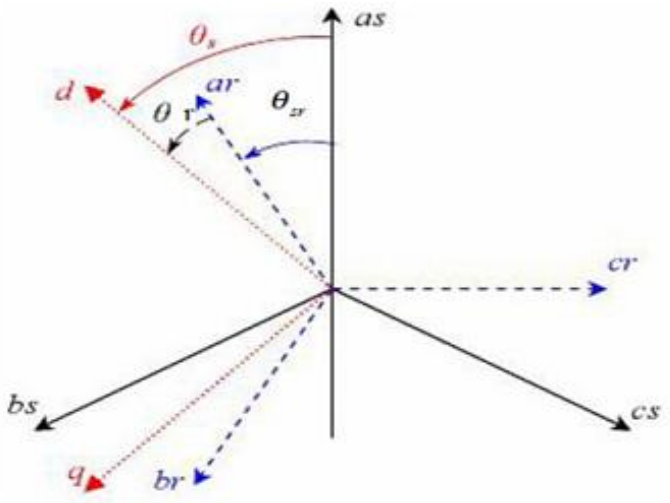

Figure II.7 Axes de repères (d, q).

Dans l'espace et alimentés par des courants à π/2 dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes *d* et *q*.

Les trois enroulements rotoriques peuvent aussi être remplacés par deux enroulements fictifs disposés sur le même repère (*d*, *q*). Ayant toujours l'axe as comme référence, on définit les angles $(\theta_s, \theta_r et \theta_{sr})$comme dans la figure II.7.

(θ) : L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (θ_s pour les grandeurs statorique et θ_r pour les grandeurs rotorique).

L'angle θ_{sr}donne la position du rotor par rapport au stator.

Pour passer du système triphasé abc au système biphasé *(d, q)* et réciproquement, il faut utiliserles transformations de Park.

Alors :

Le passage du repère fixe abc vers le repère tournant dq se fait par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \textbf{(II.18)}$$

Et le passage du repère tournant *dq* vers le repère fixe abc se fait par :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P^{-1}] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \textbf{(II.19)}$$

Où :

X_a, X_b, X_c : sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées

X_d, X_q : sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées ;

X_0 : La composante homopolaire ;

$[P]$: est la matrice directe de Park ;

$[P^{-1}]$: est la matrice inverse de Park.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} cos\theta & cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -sin\theta & -sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \textbf{(II.20)}$$

$$[P^{-1}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \textbf{(II.21)}$$

Le système (d, q) sera utilisé dans la commande vectorielle des machines électriques. Dans le système (d, q), les grandeurs électriques sont de types continus, ce qui donne la possibilité de faire une commande similaire à la commande des machines à courant continu [7], [8] .

Au stator :

$$[\boldsymbol{V_{dqos}}] = [\boldsymbol{R_s}][\boldsymbol{i_{dqos}}] + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}[\boldsymbol{\varphi_{dqos}}] + [\boldsymbol{\lambda}][\boldsymbol{\varphi_{dqos}}]\boldsymbol{\theta_s}\textbf{(II.22)}$$

Au rotor :

$$[\boldsymbol{V_{dqor}}] = [\boldsymbol{R_r}][\boldsymbol{i_{dqor}}] + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}[\boldsymbol{\varphi_{dqor}}] + [\boldsymbol{\lambda}][\boldsymbol{\varphi_{dqor}}]\boldsymbol{\theta_r}\textbf{(II.23)}$$

Avec : $[\boldsymbol{\lambda}] = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}$ ***(II.24)***

$[V_{dqos}]$: La vectrice tension statorique dans le repère de Park.

$[i_{dqos}]$: Le vecteur courant statorique dans le repère de Park.

$[\varphi_{dqos}]$: Le vecteur flux statorique dans le repère de Park.

$[V_{dqor}]$: La vectrice tension rotorique dans le repère de Park.

$[i_{dqor}]$: Le vecteur courant rotorique dans le repère de Park.

$[\varphi_{dqor}]$: Le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

II.4.2.2 Équation de tension dans le référentiel de Park

D'après les équations (II.22) et (II.23) et en négligeant la composante homopolaire (cas d'un système de tensions équilibrées) les équations de tensions deviennent :

Au stator :

$$\boldsymbol{V_{ds} = R_s.\, i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs}.\frac{d\theta_s}{dt}}\textbf{(II.25)}$$

$$\boldsymbol{V_{qs} = R_s.\, i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds}.\frac{d\theta_s}{dt}}\textbf{(II.26)}$$

Au rotor :

$$V_{dr} = 0 = R_r . i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} . \frac{d\theta_r}{dt} \text{(II.27)}$$

$$V_{qr} = 0 = R_r . i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} . \frac{d\theta_r}{dt} \text{(II.28)}$$

II.4.2.3 Équations de flux en coordonnées de Park

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

Au stator :

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \text{(II.29)}$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \text{(II.30)}$$

Au rotor :

$$\varphi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \text{(II.31)}$$

$$\varphi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \text{(II.32)}$$

Avec :

$L_s = L_m + l_s$: L'inductance propre d'une phase statorique.

$L_r = L_m + l_r$: L'inductance propre d'une phase rotorique.

l_s, l_r : L'inductance cyclique des fuites.

L_m : L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor sur l'axe d.

II.4.2.4 Équations des puissances dans le référentiel de Park

La puissance actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

Au stator :

$$P_s = V_{ds} * i_{ds} + V_{qs} * i_{qs} \text{(II.33)}$$

$$Q_s = V_{qs} * i_{ds} - V_{ds} * i_{qs} \text{(II.34)}$$

Au rotor :

$$P_r = V_{dr} * i_{dr} + V_{qr} * i_{qr} \text{(II.35)}$$

$$Q_r = V_{qr} * i_{dr} - V_{dr} * i_{qr} \text{(II.36)}$$

II.4.2.5 Équations du couple électromagnétique dans le référentiel de Park

L'expression du couple électromagnétique développé par la machine sera :

$$C_e = p\frac{M}{L_r}(\varphi_{dr}.i_{qs} + \varphi_{qr}.i_{ds}) \text{(II.37)}$$

II.4.3 Choix du référentiel (d, q)

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d, q) qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique $\theta_r$avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre.

II.4.3.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est souvent nécessaire lors des études de variation de la vitesse de rotation. Dans ces conditions, nous avons [19] :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{(II.38)}$$

II.4.3.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes de régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \text{(II.39)}$$

II.4.3.3 Référentiel lié au champ tournant

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine. Il est utilisé lorsque la fréquence d'alimentation est constante et à fréquence variable lors des petites perturbations autour d'un régime donné, [11], [12]. Ce type de référentiel est caractérisé par les relations :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{(II.40)}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \text{(II.41)}$$

II.5 Commande vectorielle de la machine asynchrone

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, [14], [17] que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).

Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

II.5.1 Commande vectorielle directe et indirecte

- DFOC (contrôle orienté par champ direct) -Dans cette stratégie, le rotor vecteur de flux est mesurée soit au moyen d'un capteur de flux monté dans l'entrefer, soit en utilisant les équations de tension à partir des paramètres de la machine électrique
- IFOC (contrôle orienté par champ indirect) -Dans ce flux de rotor de stratégie le vecteur est estimé utilisant le contrôle orienté par champ équations (modèle actuel) exigeant une mesure de vitesse de rotor.
- La terminologie habituelle « Sensorless » signifie qu'aucun dispositif de rétroaction de position/vitesse n'est utilisé.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation du système éolien, basé sur la machine asynchrone double alimentée et son convertisseur mécanique.la modélisation de

turbine et l'étude va traiter la commande vectorielle de la machine et les différents convertisseurs électroniques assurant la commande rotorique de la GADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent en cherchant le point de fonctionnement à puissance maximale.

Chapitre III - Modélisation des Convertisseurs statiques

III.1 Introduction

Avant d'entamer la commande commande dircte decouple DTC de la generatrice asynchrone double alimentéede type DFIG, nous modélisant avant les deux convertisseurs reverssibles de puissances , le redresseur faisant la liaison avec le réseau, et le convertisseur de liaison avec le rotor de la machine l'onduleur.

Ensuite on va modeliser la machine dans le système d'axe alpha beta lie au stator et ceci dans le but de simplifier le schema de commande DTC qui est base sur les travaux de MADA utilisant une table a six secteurs pour pouvoir introduire au mieux cette commnde dans les systemes utisant la MADA contrôle par le rotor.

III.2 Modélisation des Convertisseurs statiques.

La commande de la GADA nécessite un onduleur qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions alimentant le rotor de la machine. Cet onduleur CCM est à son tour raccordé à une alimentation continue régulée d'un bus DC grâce à un redresseur CCR raccordé au réseau. Les deux convertisseurs onduleur –redresseur sont réversibles et sont à contrôle de modulation de largeur d'impulsion MLI en général Figure III.1.

Cette partie vise à modéliser ces convertisseurs de liaison pour le rotor. [20]

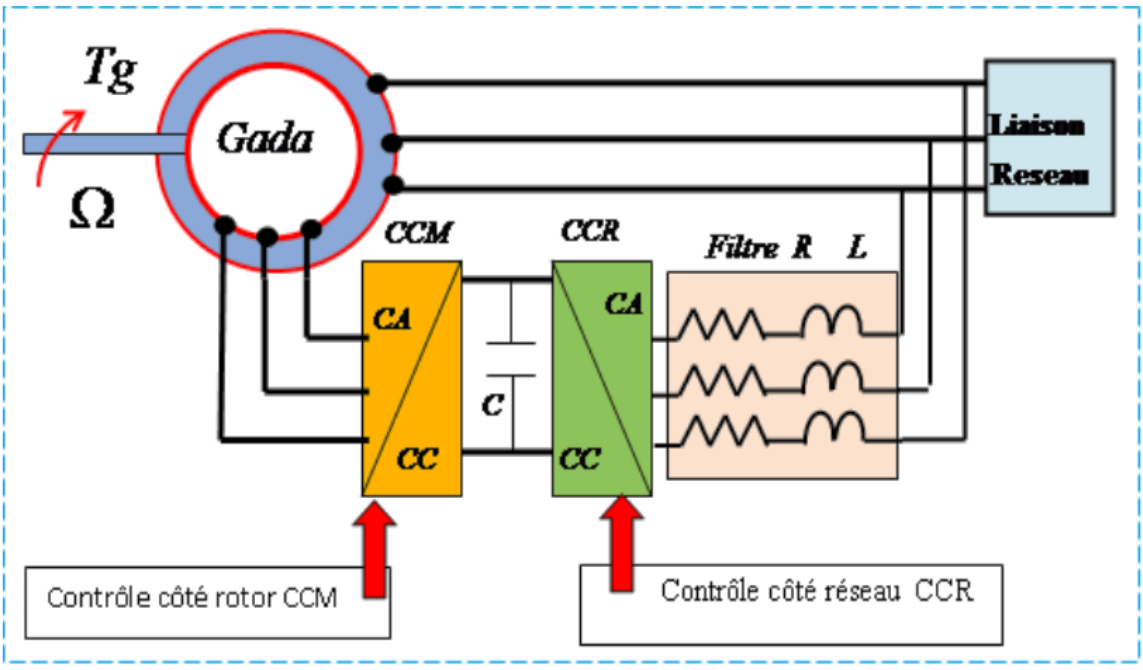

Figure III.1 Convertisseur monté au rotor de la GADA.

III.3 Modélisation Onduleur de tension

L'onduleur utilisé est un onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs) les interrupteurs peuvent être des transistors IGBT ou thyristors de puissances bidirectionnels.

En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur *F*nm, où k représente le numéro du bras (n=1,2ou3) et s le numéro de l'interrupteur considéré (m=1 pour l'interrupteur du haut et m=0 pour l'interrupteur du bas).

Pour E une source de courant continu on a Figure III.2

Les interrupteurs de haut sont T1, T2 et T3

Les interrupteurs de bas T1', T2' et T3'

Les interrupteurs s'un même bras sont complémentaires par exemple. T1 et T1'.

Et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

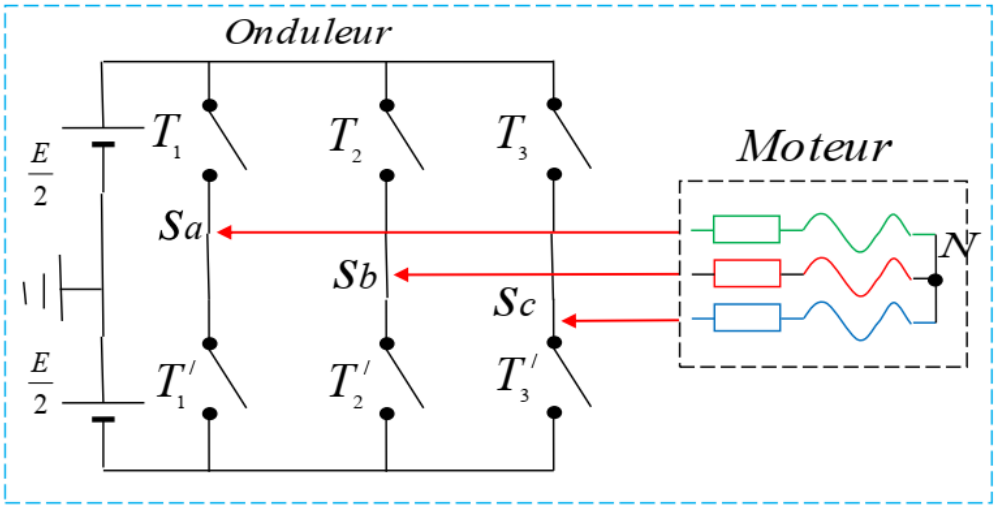

Figure III.2 Onduleur.

Pour simplifier l'étude de l'onduleur de tension, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.

- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

- Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \textbf{(III.1)}$$

Avec

$$V_A + V_B + V_c = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$$

Sachant que le système des tensions triphasées statorique est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \qquad V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \textbf{(III.2)}$$

En remplaçant on aura le système suivant :

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

On peut écrire le système (III.3) sous la forme matrice :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \textbf{(III.4)}$$

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \textbf{(III.5)}$$

Tel que:

$V_{AO} = \frac{E}{2}S_1$ $\quad S_1 = 1$ si K_1 fermé (vr1≥ vp) si non $S_1 = -1$

$V_{BO} = \frac{E}{2}S_2$ ou $S_2 = 1$ si K_2 fermé (vr2≥ vp) si non $S_2 = -1$

$V_{CO} = \frac{E}{2}S_3$ $\quad S_3 = 1$ si K_3 fermé (vr2≥ vp) si non $S_3 = -1$

On remplace (III.5) dans (III.4).

Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de connexion comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \textbf{(III.6)}$$

Le système (III.6) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI réversible.

Pour E = Vdc est la tension du bus continu ; on obtient le schéma bloc suivant pour le donc on peut alors modéliser l'onduleur suivant la Figure III.3.

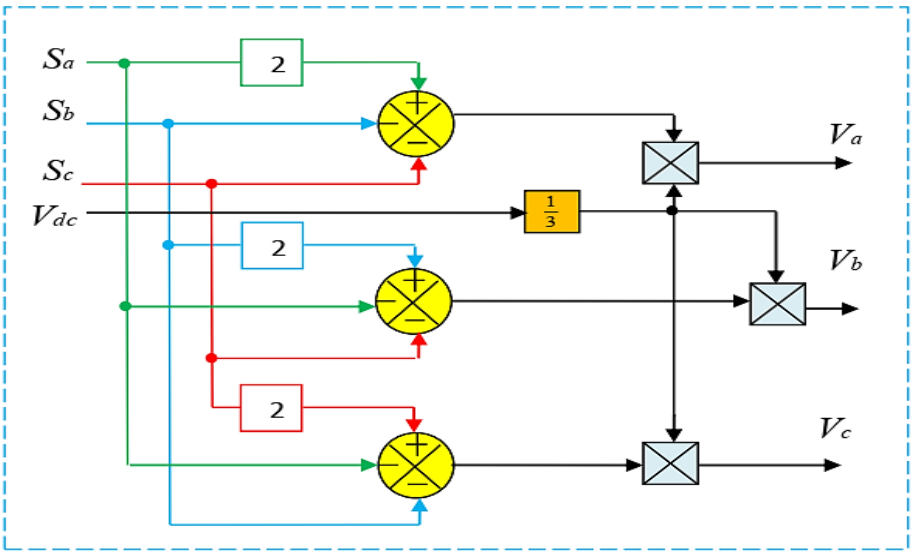

Figure III.3 Schéma s bloc de l'onduleur.

III.4 Modélisation du redresseur

Les redresseurs à MLI sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu pour avoir une source continue stable, contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Figure III.4.

La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle les

interrupteur

sont comme ceux d'un onduleur à deux niveaux voir structure onduleur.

Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.[21]

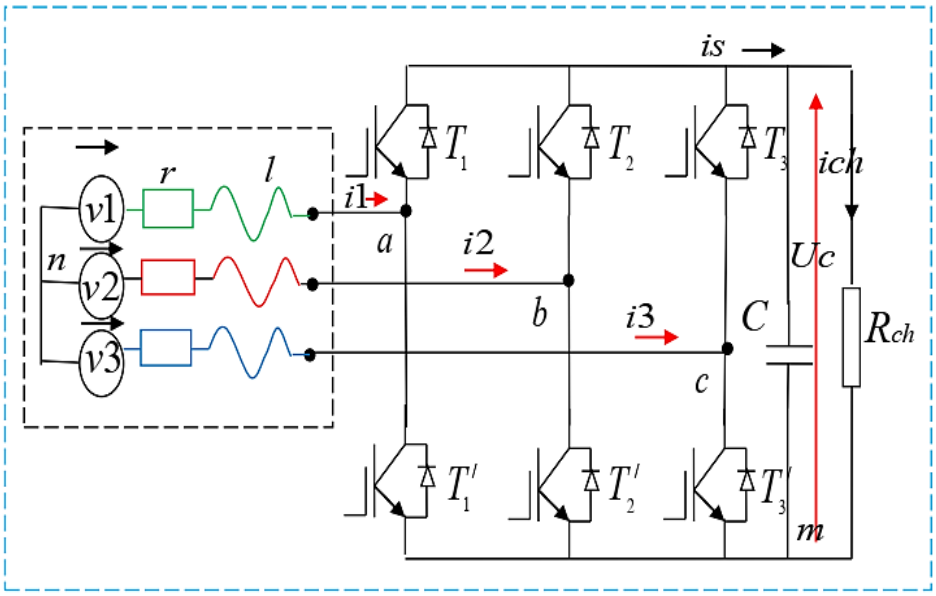

Figure III.4 Structure du redresseur à MLI.

III.4.1 Le réseau

La source est modélisée par une source triphasée sinusoïdale en série avec une inductance

l et une résistance r qui représentent l'impédance totale de la ligne.

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases,

Les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} V_{res1} = R_{ires1} + L\,\frac{d_{ires1}}{dt} + v_{an} \\ V_{res2} = R_{ires2} + L\,\frac{d_{ires2}}{dt} + v_{bn} \\ V_{res3} = R_{ires3} + L\,\frac{d_{ires3}}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad \textbf{(III.7)}$$

Où Van, Vbn et Vcn : sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur.

Et les courants de chaque phase du réseau sont alors donnés par le système d'équations

différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & 0 \\ 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{res1} - v_{an} \\ i_{res2} - v_{bn} \\ i_{res3} - v_{cn} \end{bmatrix} \textbf{(III.8)}$$

III.4.2 L'étage Convertisseur

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation (III.6).Les tensions simples Vc1, Vc2 et Vc3 :

$$\begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \textbf{(III.9)}$$

Le courant redressé est:

$$i_{dc} = [S_a \quad S_b \quad S_c]\begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \textbf{(III.10)}$$

III.4.3 La charge

Cet étage est constitué d'une capacité $\boldsymbol{C}$ en parallèle avec une résistance $\boldsymbol{R}$ch modélisant la charge continue, il est régi par les deux équations :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}(i_s - i_L) \\ U_c = R_{ch}.i_L \end{cases} \textbf{(III.11)}$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{di_L} = \frac{R_{ch}}{R_{ch}.C.s} \end{cases} \textbf{(III.12)}$$

Alors le schéma bloc du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs et comme sortie la tension redressée Vc. Figure III.5.

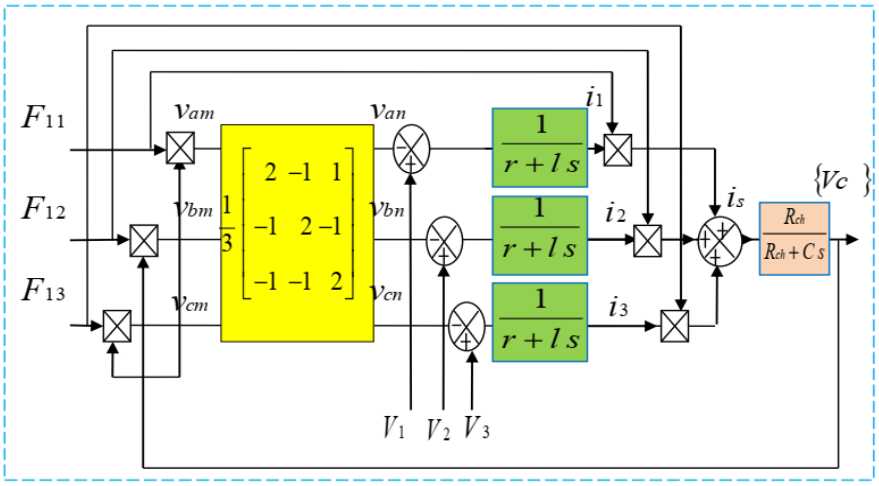

Figure III.5 Schéma bloc du redresseur à MLI.

III.5 Conclusion

Ce chapitre, a été consacré d'une part à des définitions et des généralités qui expliquent le principe de fonctionnement des redresseurs à commande MLI et Onduleur de tension, et d'autre part nous avons présenté la modélisation de ces redresseurs nécessaire pour la suite de l'étude.

Chapitre IV - Association et simulation de la chaine éolienne

IV.1 Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire.

La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel MatlabSimulink. A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

IV.2 Performances de la chaine complete

Nous allons maintenant pouvoir assemblé les différents modèles développés précédemment afin d'obtenir le système de conversion d'énergie éolienne présenté à la Figure IV.1 Notre but est de modéliser puis simuler une éolienne avec une machine asynchrone à double alimentation et commande indépendante des puissances actives et réactives, avec une hélice à commande de pas et contrôle optimal pour un rendement maximum de la conversion du vent en électricité .

Cette partie consiste à placer la GADA dans des conditions de fonctionnement les plus proches possible d'un système éolien. Le schéma synoptique global de la simulation réalisée est présenté sur la Figure IV.1 D'où la puissance débitée par le générateur éolien est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

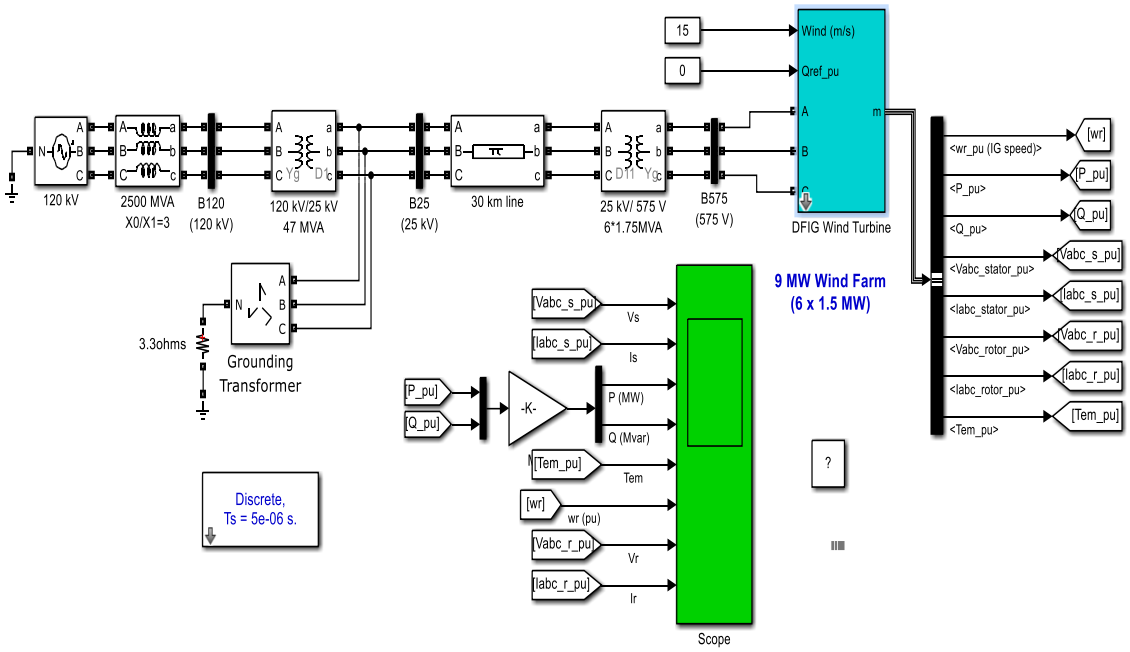

Figure VI.1 schéma structurel du système éolien global.

VI.3 La turbine éolienne

La turbine est entraînée par une MAC, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la figure IV.2

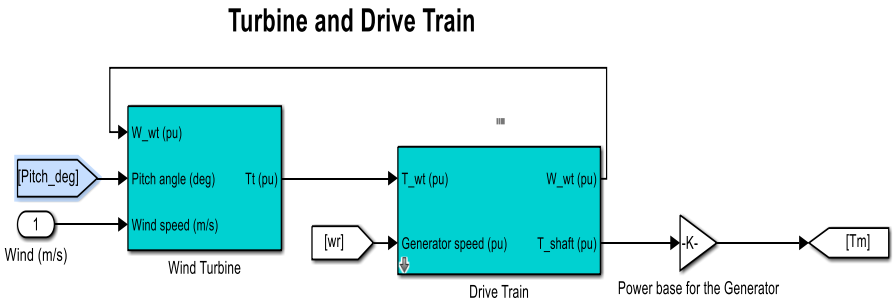

Figure VI.2 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

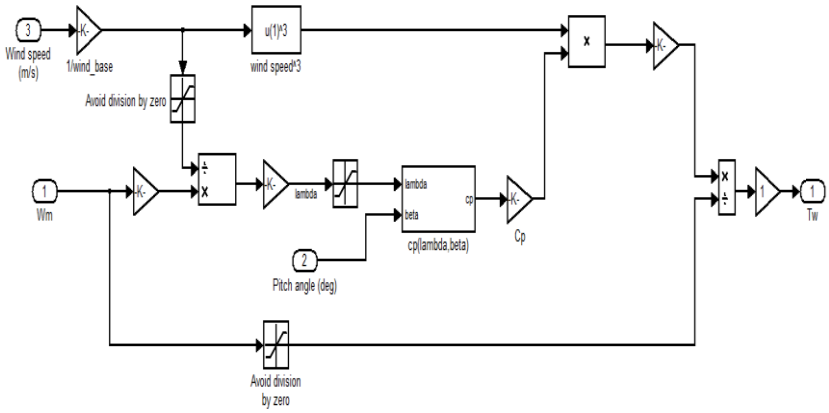

Figure VI. 3 la turbine éolienne.

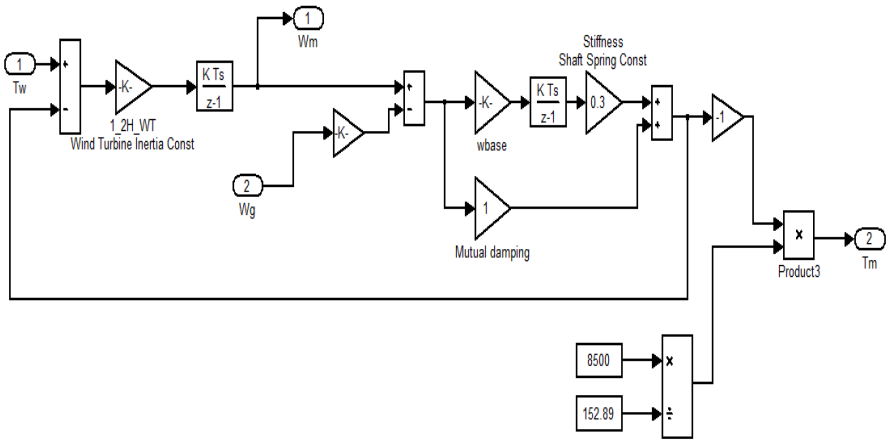

Figure VI.4 Multiplicateur.

VI.4 Modèle de GADA

Le générateur asynchrone à double alimentation est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. On utilise une MAC pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de 3.73 KW. Son schéma bloc est représenté dans la figure IV.4.

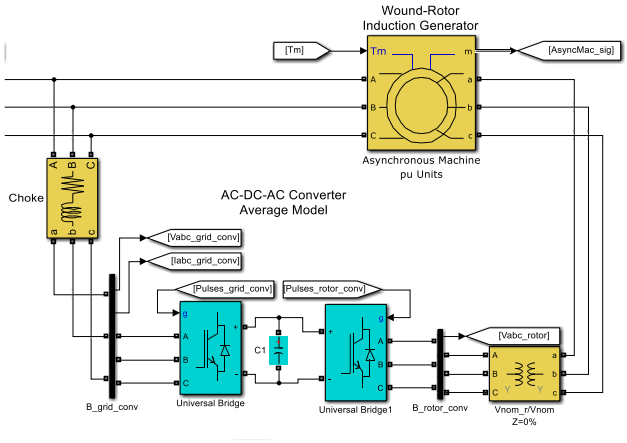

Figure VI.5 Modèle de GADA.

VI.5 Les résultats de simulation

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne reposant sur la machine asynchrone obtenus sous Matlab/Simulink sont présentés :

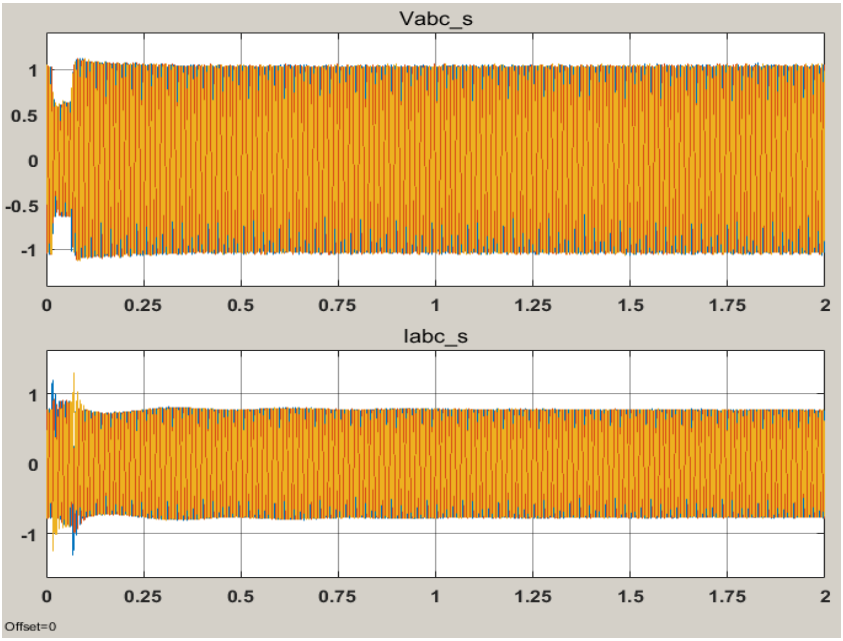

Figure VI.6 La tension et le courant statorique.

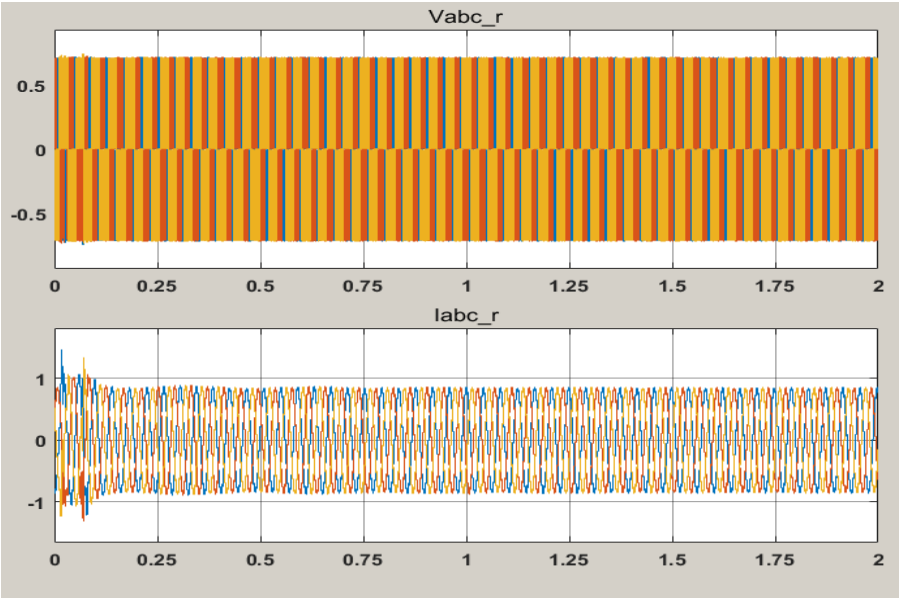

Figure VI.7 La tension et le courant rotorique.

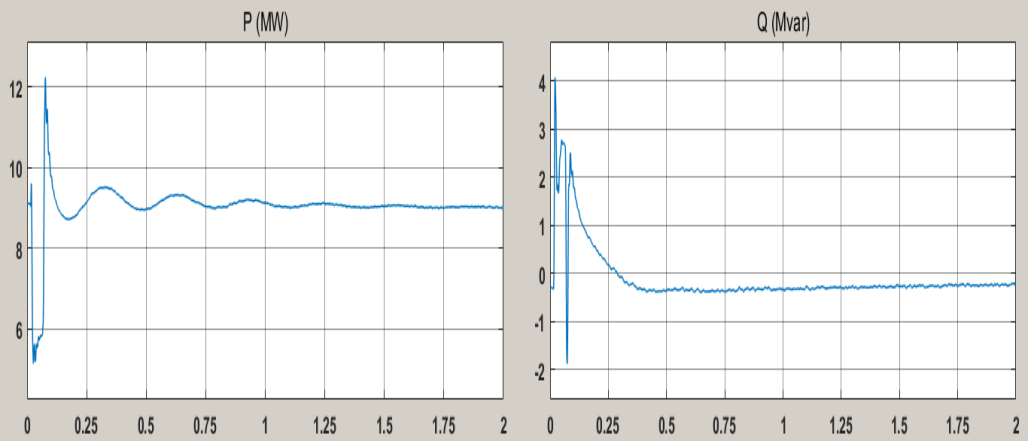

Figure VI.8 La puissance Active et reactive.

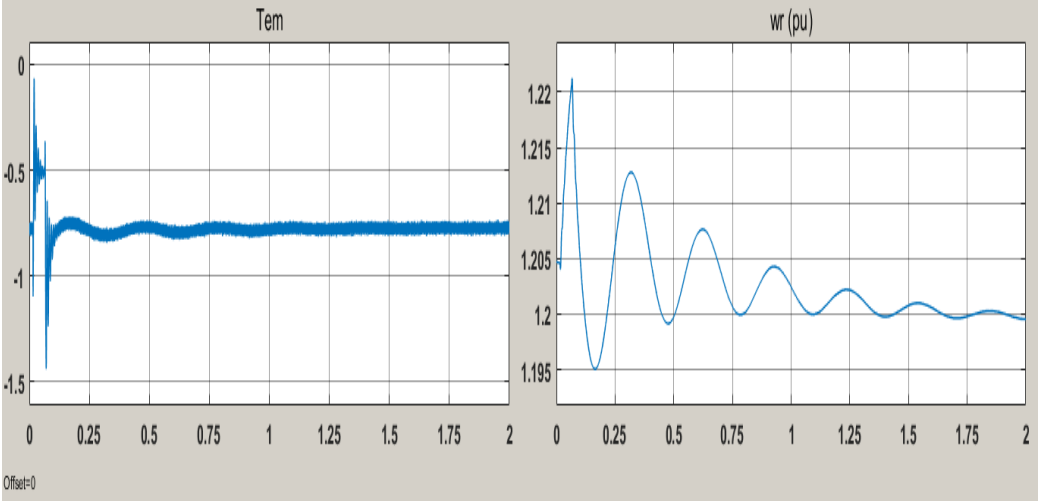

Figure VI.9 la vitesse et couple.

VI.5.1 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par la simulation de l'ensemble Turbine GADA Convertisseurs confirment le bon fonctionnement de la chaine et de son système de commande dans les trois zones de fonctionnement. En effet, pour les faibles vents, d'une vitesse inferieure à 10m/s, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale. Pour les vents moyens et forts, le système de commande intervient pour maintenir la vitesse de rotation à sa valeur maximale. Si la puissance renvoyée au réseau par la GADA atteint sa valeur nominale le système d'orientation des pales agit pour protéger l'éolienne des surcharges en limitant la puissance convertie.

VI.6 Conclusion

Dans ce chapitre on détailler la modélisation de chaque bloc constituant la configuration proposée de l'association turbine éolienne, générateur asynchrone à double alimentation. Le contrôle vectoriel est introduit afin de pouvoir commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique. Il repose sur un modèle en régime transitoire. Il un réglage précis du couple de la machine et même d'assurer du couple à vitesse nulle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir: génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant d'étudier le mode de fonctionnement réseau. L'éolien de proximité où les machines sont très souvent réseau et de grandes puissances présente une solution intéressante du point de vue du coût relativement faible et de sa robustesse.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques.

Le modèle de turbine utilisé étant simple et basé sur les équations décrites au Chapitre 2.Dans ce chapitre on détailler la modélisation de chaque bloc constituant la configuration proposée de l'association turbine éolienne, de la GADA e. Le contrôle vectoriel est introduit afin de pouvoir commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique.

Dans le troisième chapitre, on a présenté la modélisation les deux convertisseurs reverssibles de puissances , le redresseur faisant la liaison avec le réseau, et le convertisseur de liaison avec le rotor de la machine l'onduleur.

Enfin, bien sûr j'ai développé mes talents dans le logiciel Simulink dans toutes ces librairies et familles de composantes. A la fin de ce travail, je souhaite que les résultats ainsi trouvés permettent l'amélioration des performances du système, permettent le fonctionnement autonome et qu'elles constituent une base pour une étude expérimentale plus profonde en Algérie

Bibliographie

Bibliographie

[01] BELAID. A and SAHRAOUI. B, "Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception ", Université Biskra, 2010.

[02] F. POITIERS, Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse n^0 ED 0366-125 (2003), École Polytechnique de l'Université de Nantes, France.

[03] Frank Kreith and D. Yogi Goswami, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Pages 22-1-22-30, Ltd, 2007.

[04] Hartwanger, D., Horvat, A., "3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD," NAFEMS UK Conference 2008, Engineering Simulation : Effective Use and Best Practice, Cheltenham, UK, June 10- 11, 2008, Proceedings.

[05] Gorban' A.N., Gorlov A.M., Silantyev V.M., "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow," Journal of Energy Resources Technology - December 2001 - Volume 123, Issue 4, pp. 311-317.

[06] P. Bauer, S.W.H. De Haan, C.R. Meyl, JTG. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Wind farms ", CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.

[07] D.Seyoum C. Grantham, and M.F. Rahman, "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a '' Wind Turbine'' IEEE Transactions on industry and Control of Doubly-Fed Induction Generators.

[08]A. Abdelli "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive"Thèse préparée au Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Unité Mixte CNRS-INPT-UPS N°5213, Octobre 2007.

[9] J.Caron, J. Hautier "Modélisation et Commande de la MACHINE Asynchrone", Technique et Documentation, Paris, 1995.

[10] H.Camblong. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la Génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, Thèse de doctorat ENSAMBORRDEAUX

[11] R. Pena, J.C. Clare, G.M. Asher. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application taux variable-speed wind-energy generation. IEE Proc.-Electr. Power appl., Vol. 143, No. 3, May 1996

Bibliographie

[12] B. Boukhezzar, Les stratégies de commande pour l 'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable, Thèse N°8212 (2006), Université Paris XI, France.

[13] Lahouel Dalila,' Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine synchrone à aimants permanents. Thèse de Magister Université de BATNA

[14] Fadli Ouahiba ''Modélisation commande non linéaire de l'association machine synchroneà aimant permanent – Onduleur de tension à trois niveaux'', Thèse de Magister. Université de BATNA

[15] F.Bonnet 'Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur' Thèse doctorat d'Université de Toulouse 2008

[16] Boumarraf et AL ' la double DTC d'une machine asynchrone à double alimentation'. Université de Batna -Article 2014

[17] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, "Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna 1997.

[18]:[J. Chatelian."Machine Electrique" Traité d'électricité vol 10, édition géométrie 1983.

[19] M. Kassa Idjdarene 'Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes' Thèse un Université de Lille 2010.

[20] Lotfi Baghli 'Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone' IUFM de Lorraine – UHP 2004.

[21] Tarak.Ghennam ' Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique. Apports des convertisseurs Multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation.'