République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et Technologies

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE

L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electriques

Thème:

Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux

Présenté par :

- **AHMIDAT Zana**
- **KOUIDRI Zahra**

Soutenu : le 04/06/2018

Devant le jury :

Président :	**Mr. CHABACHI.S**	**M.A.A**	**Univ. Adrar**
Promoteur :	**Mr. MEKHLOUFI.S**	**M.C.A**	**Univ. Adrar**
Examinateur :	**Mr. OULED ALI.O**	**M.A.A**	**Univ. Adrar**

Année Universitaire : 2017/2018

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer notre gratitude et remerciement à ALLAH qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer ce modeste travail. Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur Monsieur, ***MEKHLOUFI SALIM,*** *Docteur l'université Ahmed Draia Adrar, pour nous avoir proposé ce sujet, pour sa contribution estimable et son aide indispensable qui nous ont été donné pour atteindre la réalisation de ce travail ainsi que toutes ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques .Nous remercions amplement tous les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail*

Nos remerciements vont en particuliers à tous les enseignants et à tout ce qui a contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail Monsieur Yaaichi MOHEMMED et Monsieur ***BOUID ABD EL KADER****..*

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :
En premier lieu ma MERE pour sa tendresse profonde.
Mon oncle Cheikh Ben nanah
Mes beaux-parents,
Mes belles sœurs Fatima et Waffa , mes baux frères Hichem ,Yacine et Bekar ,
Toute ma grande famille.
Tous mes proches amis Jiji, ZAHO, Fidel , Feriola , Sousou, Zizo, Nona ,Hoho, Wafani ,Cherof ,Youcef et mon frère Nacer .
Mon binôme Zohra
Mes enseignants.
Et en fin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de prés ou de loin durant l'élaboration
De ce travail.

ZANA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chères parents pour leur
Parfaite éducation et leur dévouement
Pour mon bonheur.
Mes chers frères et ma chère soeur qui
M'ont encouragé durant toutes ces années d'études.
Mes chères amis et mes collègues d'étude

ZAHRA

Sommaire

Liste des abréviations et symbols

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction général 1

Chapitre I : *Généralité sur l'énergie éolienne*

I.1 Introduction 5

I.2 Définition de l'énergie éolienne 5

I.3 Les différents types d'une éolienne 6

I.4 Les principaux composants d'une éolienne 8

I.5 Conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique 10

I.6 Les avantages et les incontinents 15

I.7 L'énergie éolienne en Algérie 16

I.8 Classement des éoliennes 17

I.9 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) 21

I.9.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation 21

I.9.2 Les applications de la GADA 22

I.10 Conclusion 23

Chapitre II : *Etude des onduleurs*

II.1 Introduction 25

II.2 Définition d'un onduleur 25

II.3 Principe de fonctionnement 26

II.4 Classifications des onduleurs 29

II.4.1 onduleur non autonome 29

II.4.2 onduleur autonome 29

II.4.3 Les onduleurs à résonance 30

II.5 Les onduleurs multi-niveaux 30

II.5.1 L'intérêt des onduleurs multi-niveaux 31

II.5.2 Principe de l'onduleur multi-niveaux 31
II.6 Les topologies des onduleurs multi-niveaux 32
II.6.1 Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC) 33
II.6.2 Onduleur de tension à cellule imbriquée 33
II.6.3 Onduleur de tension en cascade 35
II.7 Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC 36
II.7.1 Structure 36
II.7.2 Principe de fonctionnement 37
II.8 Les différents types de commandes des onduleurs 40
II.8.1 Commande à onde rectangulaire (tension en deux niveaux) 40
II.8.2 Commande en créneaux de largeur variable (tension en 3 niveaux) 40
II.8.3 Commande à paliers (tension 5 niveaux) 41
II.9 Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux 41
II.10 Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasé 42
II.11 Conclusion 43

Chapitre III: *Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne*

III.1.Introduction 45
III.2.Modélisation de la partie mécanique 45
III.2.1.Modèle de la turbine 46
III.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse 47
III.2.3 Equation dynamique de l'arbre 48
III.2.4 Stratégie de commande d'une éolienne 48
III.2.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance 49
III.2.6.Mode de fonctionnement de MADA 50
III.3. Modélisation de la partie conversion électromécanique 53
III.3.1 Hypothèses simplificatrices 53
III.3.2.Equations mathématiques de la GADA dans le repère (abc) 53
III.3.3 Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park) 56
III.3.4.Modèle de la machine en représentation d'état 57
III.4.Modélisation de l'onduleur à deux niveaux 60
III.5 Modélisation de l'onduleur à trois-niveau 62

III.6 Conclusion 64

Chapitre 4: Commande ET simulation

IV.1 Introduction 66

IV.2 Généralité sur la commande vectorielle 66

IV.3 Principe de la commande vectorielle 66

IV.4 Modèle de la GADA en vue d'un réglage indépendant des puissances active et réactive 67

IV.5 Commande directe 70

IV.6 Calcul des régulateurs 71

IV.7 Résultats de Simulation du système avec turbine 72

IV.8. Simulation de système complète avec onduleur deux niveaux 75

IV.9 Simulation de système complète avec onduleur trois niveaux 78

IV.10 Conclusion 79

Conclusion général 81

Reference

Annexes

Liste des abréviations et symboles

MADA machine asynchrone a double alimentation

GADA génératrice asynchrone a double alimentation

MLI modulation de largeur d'impulsion

NPC Neutral Point Clamped

MCC Machine à Courant Continue

FOC Commande à Flux Orientée

Symbols	Signification
S	La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
P	Nombre de paires de pôles de la machine
v	Vitesse de vent incidente sur le rotor de la turbine
$P_{éolienne}$	La puissance aérodynamique de la turbine
ρ	Density de l'air
P_V	La puissance de vent
C_p	Coefficient de puissance (facteur de rendement).
λ	Ratio de vitesse
β	Angle de calage des pales
R	Rayon de la turbine ou la longueur d'une pale.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire mécanique de la turbine
E	Tension efficace

V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tension continues.
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	sont les tensions des phases de la charge
[T]	La matrice de transfert
Ls, Lr	Inductance cyclique statorique.et rotorique
G	Gain du multiplicateur
Ms,Mr	Inductances mutuelle entre deux phases statoriques et Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
Ωmec	Vitesse angulaire mécanique de la GADA
Rs,Rr	La résistance des phases statoriques
Φsd,Φrd	Flux statoriques et rotoriques de la GADA
J	Inertie totale des parties tournantes
f	Coefficient de frottement
Cem	Le couple éléctromécanique
Vsabc,Vrabc	les tensions statoriques et rotoriques de la GADA.
Is,Ir	Valeur efficace des courants statoriques et rotoriques de la GADA
θs,θr	Angle électrique relatif aux grandeurs électrique statorique. et rotorique
M	Inductance magnétisante
C_{aero}	Couple aérodynamique de la turbine
Cmec	Couple mécanique sur l'axe de la GADA.

Σ	Coefficient de dispersion de Bondel
Ws	Vitesse angulaire (pulsation) électrique du stator.

liste tableau

Tableau II.1…… 39

Chapitre I

Figure I.1 Schéma de principe d'une éolienne…….6

Figure I.2. Les types d'une éolienne…….7

Figure I.3 Les composantes d'une éolienne……..8

Figure I.4 Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne……10

Figure I.5 Principaux organes du système de conversion éolienne……10

Figure I.6 Tube de courant d'air autour d'une éolienne……..12

Figure I.7 Coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour différents types des turbines éoliennes…....13

Figure I.8 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné……....14

Figure I.9. Cartographique des grandes régions de vent en Algérie……..16

Figure I.10 Les éoliennes de Kabertene……..17

Figure I.11. Eolienne à vitesse fixe…….....18

Figure I.12 Eolienne fonctionnant à vitesse variable…….19

Figure I.13 Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent….....20

Figure I.14 Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent……..20

Figure I.15. Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA…….22

Chapitre II

Figure .II.1. Synoptique d'une conversion continu- alternatif……26

Figure II.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur……...27

Figure II.3 Symbole et signal d'un onduleur…….....27

Figure II.4 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demis cycle…….28

Figure II.5 Fonctionnement et de l'onduleur dans le 2^{éme} demis cycle……28

Figure II.6 Signal complet de l'onduleur……29

Figure. II.7 Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b), et à m niveaux (c)……..32

Figure II.8. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux……32

Figure II.9. Onduleur NPC à trois niveaux (la phase a)…….....33

Figure II.10 Topologie multi-niveau à cellule imbriquées (phase a)……34

Figure II.11 Onduleur en cascade à cinq niveaux (phase a)…….....35

Figure .II.12 Schéma d'un onduleur NPC à 3niveaux……...36

Figure II.13. Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux……37

Figure .II.14 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux…….38

Figure II.15 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux….39

Figure II.16 Onde d'un onduleur 2 niveaux……...40

Figure II.17 Onde d'un onduleur 3 niveaux……...41

Figure II.18 Onde d'un onduleur à tension de sortie en marche d'escalier……41

Figure II.19 Principe de la modulation……..42

Chapitre III

Figure III.1 Schéma de la turbine éolienne ……. 45

Figure III.2 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine……...47

Figure III.3 Caractéristiques puissance, vitesse de vent…….....48

Figure III.4 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation…..... 49

Figure III.5 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone……. 50

Figure III.5. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone…….. 51

Figure III.6. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone…… 52

Figure III.7 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone……... 52

Figure III.9 Représentation de la GADA dans le repère (dq)…….56

Figure III.10 Schéma de la MADA en modèle SIMULINK……. ..60

Figure III.11 Schéma bloc de l'onduleur à 2 niveaux……..62

Figure III.12 Onduleur à trois niveaux à structure NPC…… . 63

Chapitre IV

Figure IV.1 Principe de la commande vectorielle…….. ..67

Figure IV.2 Schéma bloc de la GADA……. 70

Figure IV.3. Schéma bloc de régulateur PI…… 71

Figure IV.4. Schéma bloc de système sans onduleur……. 72

Figure IV.5. La puissance Active …….. 73

Figure IV.6. La puissance réactive……...73

Figure IV.7.Couple électromagnétique…… .74

Figure IV.8. Couple de la turbine……74

Figure .IV.9. Puissance active…… 75

Figure .IV.10. Puissance réactive……76

Figure .IV.11. Couple électromagnétique……76

Figure .IV.12. Couple de la turbine……..77

Figure .IV.13. Puissance active…… .78

Figure. IV.14. Puissance réactive……....78

Figure .IV.15. Couple électromagnétique……. 79

Figure IV.16. Couple de la turbine……..79

Introduction générale

Introduction générale

Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre poussent les chercheurs à trouver des moyens de production d'énergie moins polluants.

Depuis l'éclatement du sujet de l'échauffement terrestre et de la préoccupation mondiale pour la protection de l'environnement. Le développement durable est devenu une notion qui accompagne avec consistance toutes les filières industrielles et économiques et marque tous les nouveaux projets. Dans le secteur de l'énergie électrique, le monde entier cherche à réduire considérablement sa dépendance aux énergies de source fossile, se caractérisant à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables. Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique s'acharnent à diversifier leur bouquet énergétique plus spécialement par une énergie propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne.

La production de l'énergie électrique à partir de l'utilisation de l'énergie éolienne intéresse dans le monde afin de donne une énergie propre et durable, les recherches dans le domaine éolien montrent un développement important sur un capteur de puissance au mieux disponible dans le vent. Dans ce moment il ya beaucoup des recherches sur les stratégies des différentes chaines de conversion utilisé pour produire l'électricité.

Les éoliennes sont équipées d'une génératrice asynchrone a double alimentation (GADA) permet de produire l'électricité à vitesse variable. Pour l'amélioration les performances de ce système on raccordé avec un onduleur multi-niveaux, le but est d'amélioré la qualité d'énergie qui produit par l'éolienne vers le réseau.

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux de structure NPC. Alors, on a choisi d'utilise la commande vectorielle direct des puissances active et réactive.

Ce mémoire est consacré aux quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les énergies éoliennes. On a présenté les principaux composants d'une éolienne et ses différents types, après on a exprimée le principe de conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique. Ensuite, la machine asynchrone à double alimentation qui utilise pour la conversion de l'énergie éolienne.

Le second chapitre est consacré à l'étude des onduleurs. On présentera les topologies des onduleurs multi-niveaux, ensuite, les différents types de commandes des onduleurs.

Le troisième chapitre présente la modélisation du système de conversion d'énergie éolienne (modèle aérodynamique, mécanique et électrique). Nous exprimons les modèles mathématiques des éléments essentiels de la chaine éolienne. Elle est constituée de la turbine, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), et l'onduleur multi-niveaux.

Le quatrième chapitre sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive rotorique de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) qui est entrainée par une source triphasé et le rotor est connecté à un onduleur multi-niveaux triphasé MLI. L'alimentation continue de l'onduleur connectée aux niveaux du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. La production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. [18]

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre 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. [20]

Mais la motivation principale derrière l'intérêt croissant envers cette source d'énergie renouvelable est son caractère écologique, surtout dans le contexte actuel ou la terre entière subit les conséquences du réchauffement climatique qui épuise les réserves mondiales en eau, principale source de l'énergie électrique. S'ajout à cela l'impacte de la crise économique mondiale actuelle sur la capacité des pays industrialisés à faire face à la demande croissante en énergie électrique, vu le cout de sa production pour les pays producteurs, et le prix de l'importation pour les pays non producteurs. [19]

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice .figure (I.1)

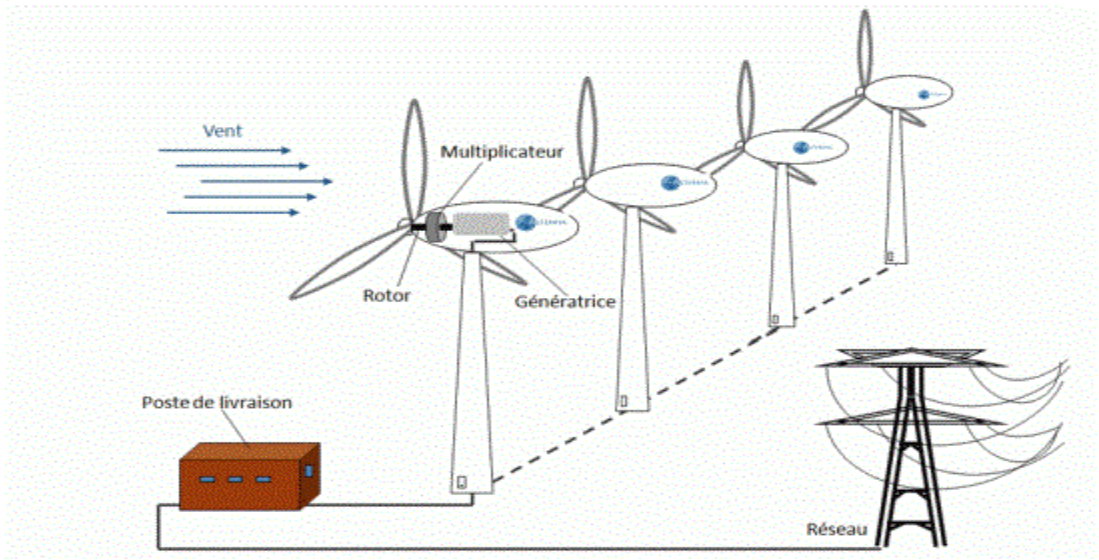

Figure I.1: Schéma de principe d'une éolienne [1]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée, 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 dimension (jusqu'à 60 m pour des éolienne de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées éviter les phénomènes de turbulences. [1]

I.3 Les différents types d'une éolienne

Les éoliennes se rangent en deux grandes familles, selon qu'elles tournent autour d'un axe horizontal ou vertical Figure (I.2).

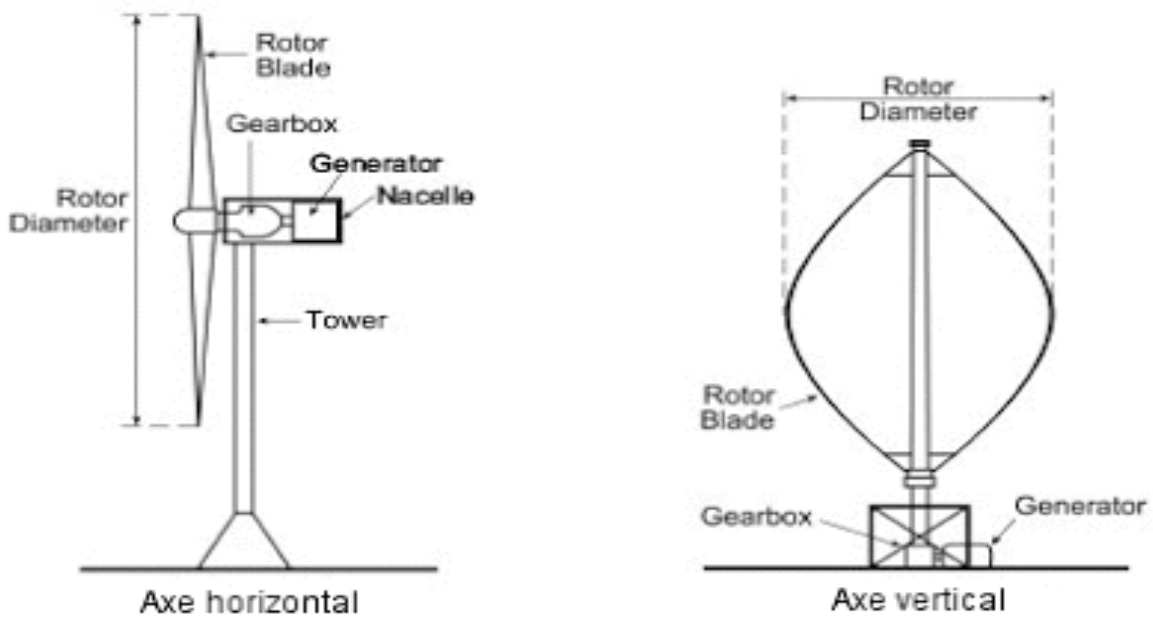

Figure I.2: Les types d'une éolienne [15]

I.3.1 Les éoliennes à axes horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique ment à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entrainant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le cout 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 cout moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position de récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du roto vertical en réalisant des études multicritères. [7]

I.3.2 Les éoliennes à axes vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation. [7]

I.4 Les principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux figure (I.3) :

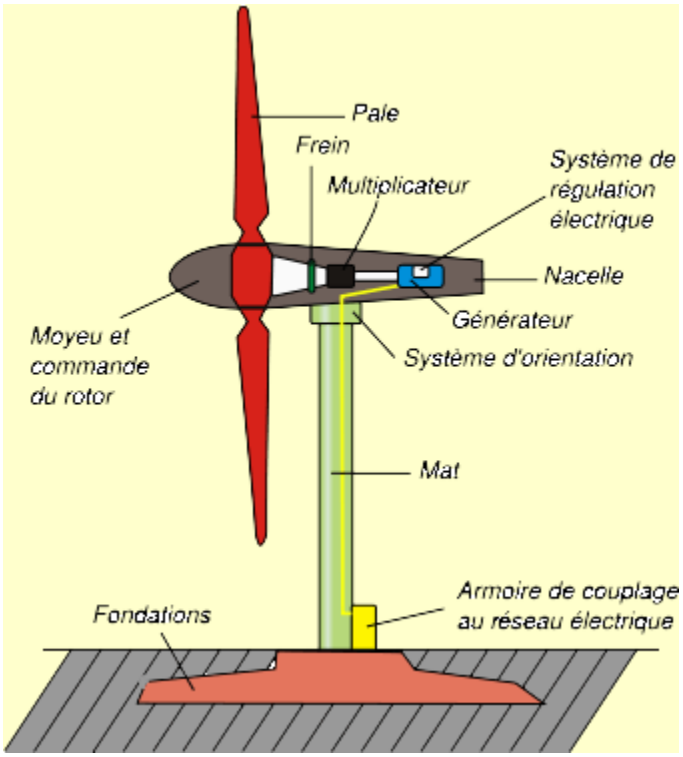

Figure I.3 : Les composantes d'une éolienne [15]

1) **Le mât**

Généralement un tube d'acier, ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations prés du sol. Toutefois, la qualité de matière mise en œuvre présente un cout non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur. [21]

2) Le rotor (moyeu et pales)

Formé par les pales assemblées avec leur moyeu. 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 cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible cout.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins couteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont elles dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [21]

a) Moyeu en générale

C'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. [4]

b) les pales

C'est une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grande. [23]

3) 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, frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydraulique ou électrique 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). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne Figure (I.4). [4]

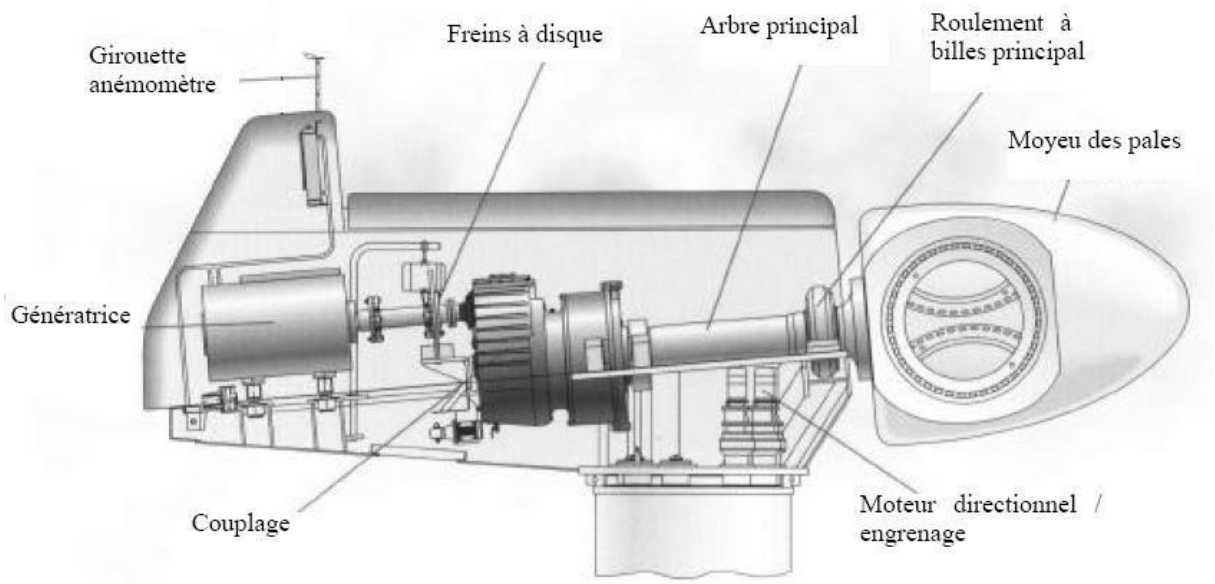

Figure I.4: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne [4]

I.5 Conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique

La conversion de l'énergie du vent à une énergie mécanique se fait au niveau de la turbine, ainsi que la partie de la conversion de l'énergie mécanique à une énergie électrique est faite par le générateur figure (I.5).

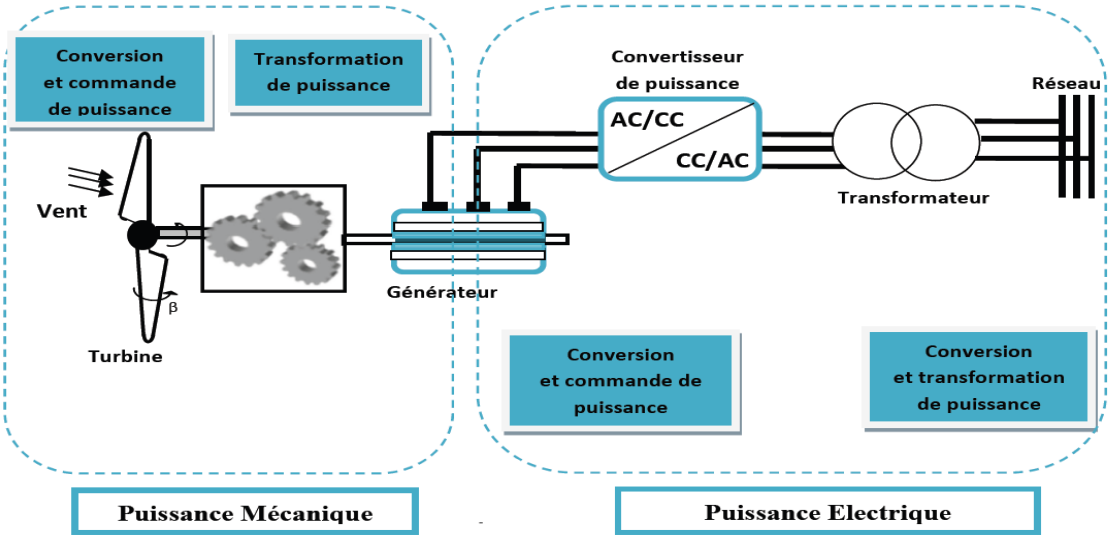

Figure I.5 : Principaux organes du système de conversion éolienne [2]

I.5.1 Principe de conversion d'énergie éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui reçoit 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 énergie électrique qui transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine ce fonctionnement général est illustré par la figure (I.6) [2]

I.5.2.a) Loi de Betz

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une aval d'une vitesse V2 ».

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.7) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V1 en amont de l'aérogénérateur 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 est :

$$m=\frac{\rho S.(V1+V2)}{2} \qquad (I.1)$$

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

$$P_{aér}=\frac{m\,(V1^2-V2^2)}{2} \qquad (I.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.1) :

$$P_{aér}=\frac{\rho S(V1+V2)(V1^2-V2^2)}{4} \qquad (I.3)$$

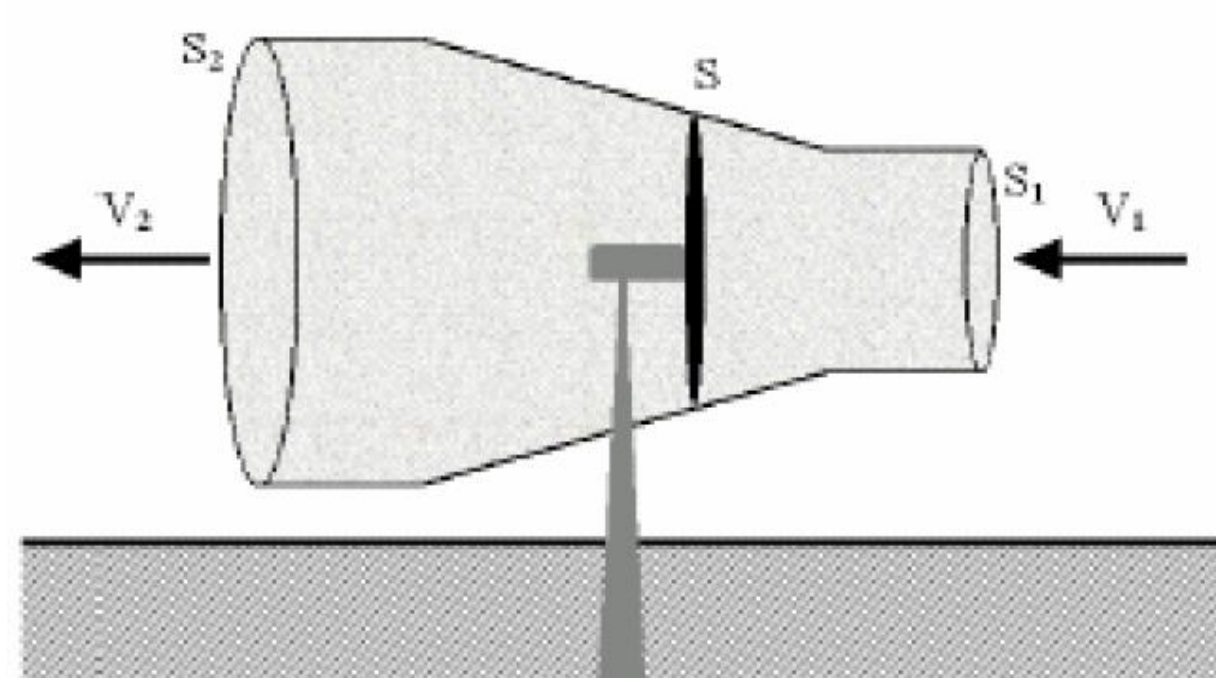

Figure I.6 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [2]

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette méme surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V1, la puissance Pv correspondante serait alors :

$$Pv = \frac{\rho S.V1^3}{2} \qquad (I.4)$$

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

$$\frac{Paér}{Pv} = \frac{1}{2}(1+(\frac{V1}{V2}))(1-(\frac{V1}{V2})^2) = C_p \qquad (I.5)$$

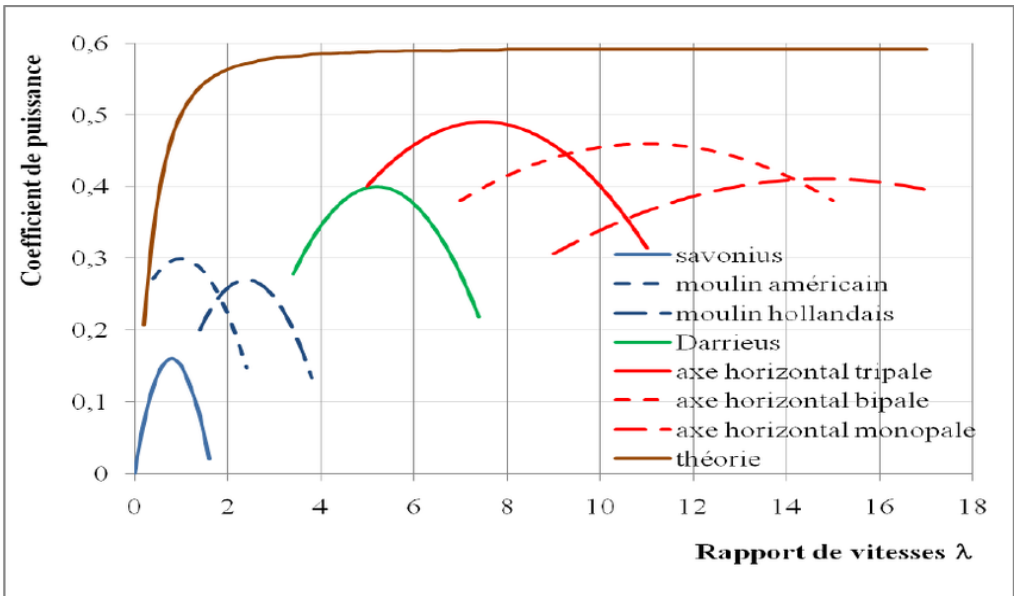

Figure I.7 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour différents types des turbines éoliennes [7]

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, On s'aperçoit que le ratio $\frac{Paér}{Pv}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximal 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 atteint et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Les éoliennes tripales sont les plus rependues car elles représentent un compromis entre les variations causées par la rotation et le cout de l'aérogénérateur de plus, leur coefficient de puissance attient des valeurs élevées et décroit lentement lorsque la vitesse augmente. [8]

b) Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprimé ainsi :

$$P_{aér} = C_p . P_v = \frac{1}{2} . C_p(\lambda) . \rho . \pi . R^2 . V_1^3 \qquad (I.6)$$

Avec : $\lambda = \frac{\Omega 1.R}{V1}$ (I.7)

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur

R : rayon de l'aérogénérateur

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse k, la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{1}{2}.C_p.\left(\frac{R.\Omega 2}{K.V1}\right).\rho.\pi.R^2.V_1^3 \quad (I.8)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

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 I.9). [1]

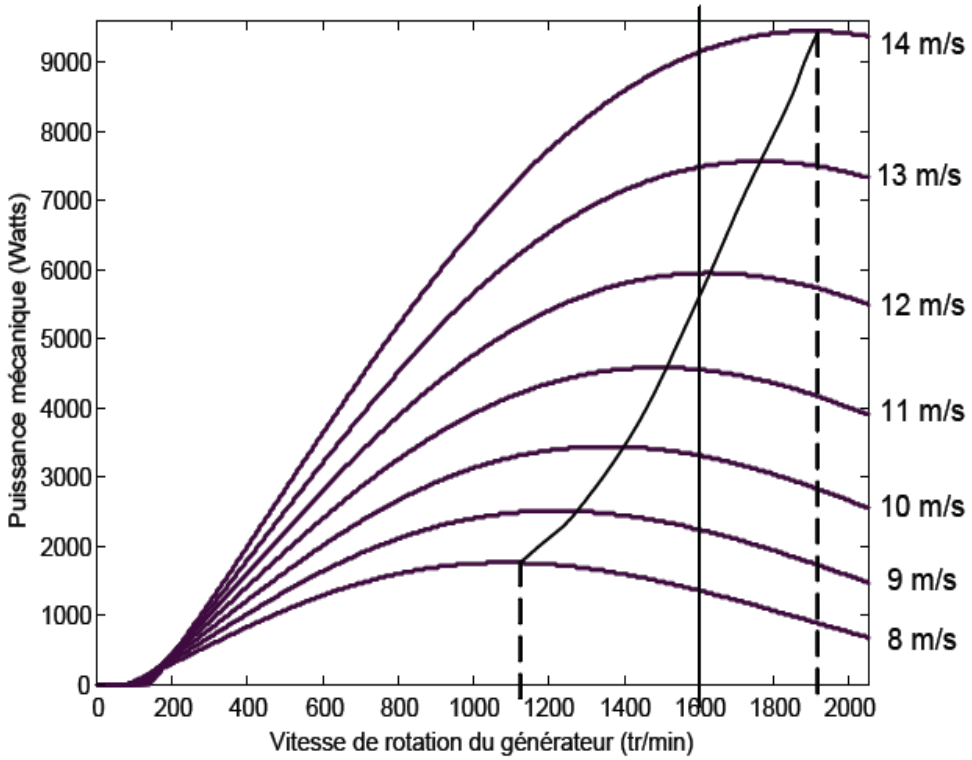

Figure I.8 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [1]

I.6 Les avantages et les incontinents

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

I.6.1 Les avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable ;
- Les éoliennes ne nécessitent aucun carburant ;
- Les éoliennes ne créent pas de déchets toxiques ou radioactif ;
- Les éoliennes produisent de l'électricité sans dégrader l'environnement (sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres) ;
- Les éoliennes n'utilisent que 2% du sol, donc la surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle ou la demande d'électricité est la plus forte. [5]

I.6.2 Les inconvénients

- L'énergie éolienne est une énergie irrégulière et très insuffisante pour le moment.
- L'éolienne à des effets sur le paysage (au niveau de l'esthétique) ;
- L'énergie éolienne est dépendante du milieu ou elle est implantée, de la météo et de l'environnement ;
- L'éolienne produit du bruit (à 500 mètres de distance, le volume sonore d'une éolienne est d'environ 35 décibels, soit l'équivalent d'une conversation chuchotée) ;
- L'entretient d'une éolienne est très couteux, surtout si elle est en pleine mer ;

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles la nuit ou par mauvais temps. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci ;
- Les éoliennes produisent des interférences électromagnétiques. [24]

I.7 L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et an ventées de l'Algérie. Cette présentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers les pays. [2]

L'Algérie présent un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud ou les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar figure (I.10)

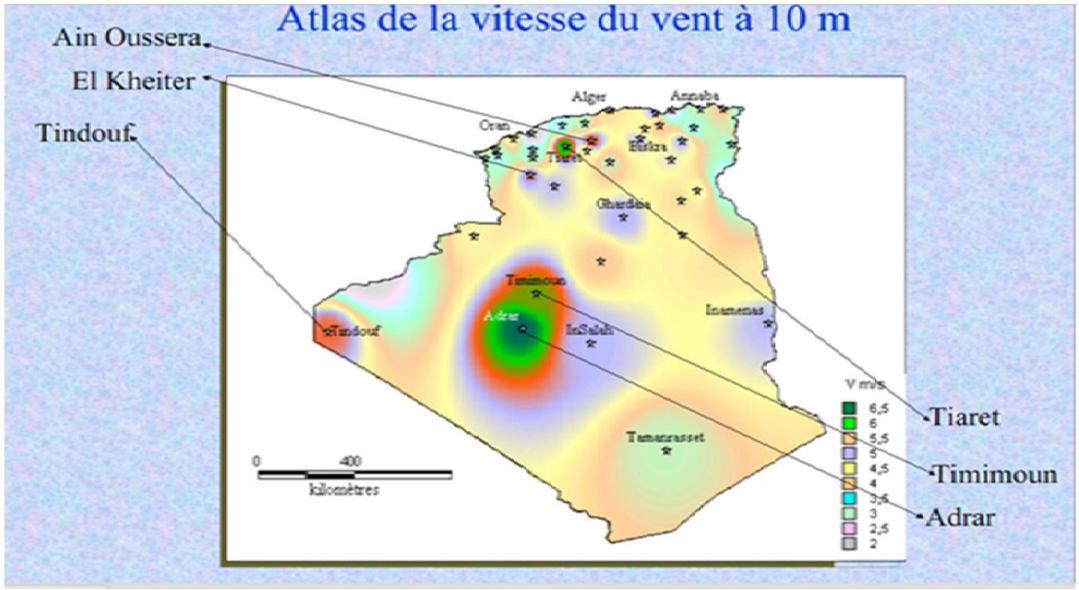

Figure I.9 : Cartographique des grandes régions de vent en Algérie [15]

Cette carte est présente les zones les plus ventées pour installer des parcs éoliens qui permet d'alimenter des régions isoles.

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale
du groupe SONELGAZ. [8]

I.7.1 Ferme expérimentale de l'énergie éolienne Kabartene (Adrar)

Le parc éolien est situé dans ksar Kabertene, à seulement 73 kilomètres au nord de la ville d'Adrar. Contient à 12 turbine d'air, la puissance totale 10 MW sur une superficie totale de 30 hectares, se caractérise par des vitesses de vent de 6 m / s à 11 m /s. figure (I.11)

Figure I.10 : Les éoliennes de Kabertene

I.8 Classement des éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies des éoliennes, celle dont la vitesse est constante et celle dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés.

I.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de KW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éolienne dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puis, séance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure suivant. La chaine de conversion de l'énergie éolienne est de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice. Figure (I.12) [2]

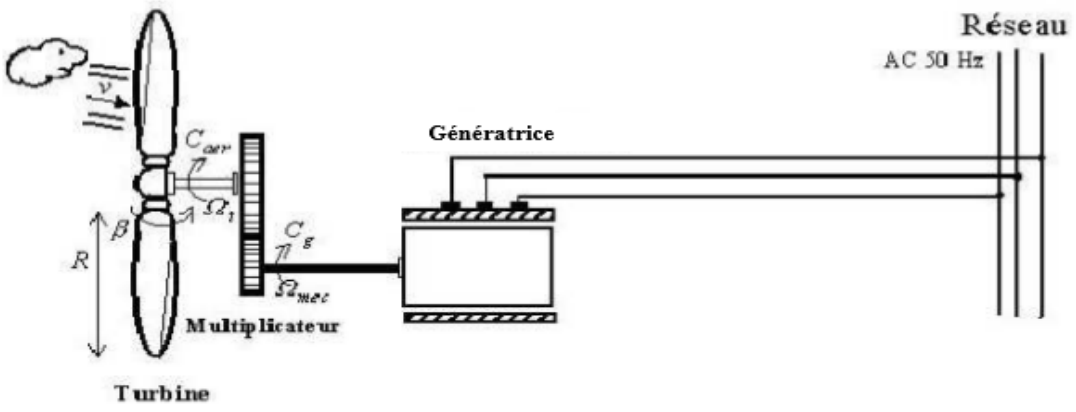

Figure I.11 : Eolienne à vitesse fixe [2]

I.8.2 Les éoliennes à vitesse variable

I.8.2. a) Le principe

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure ci-dessus la configuration de la figure (a) est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable par des convertisseurs statique. La configuration de figure (b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à

rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique. Figure (I.13)[2]

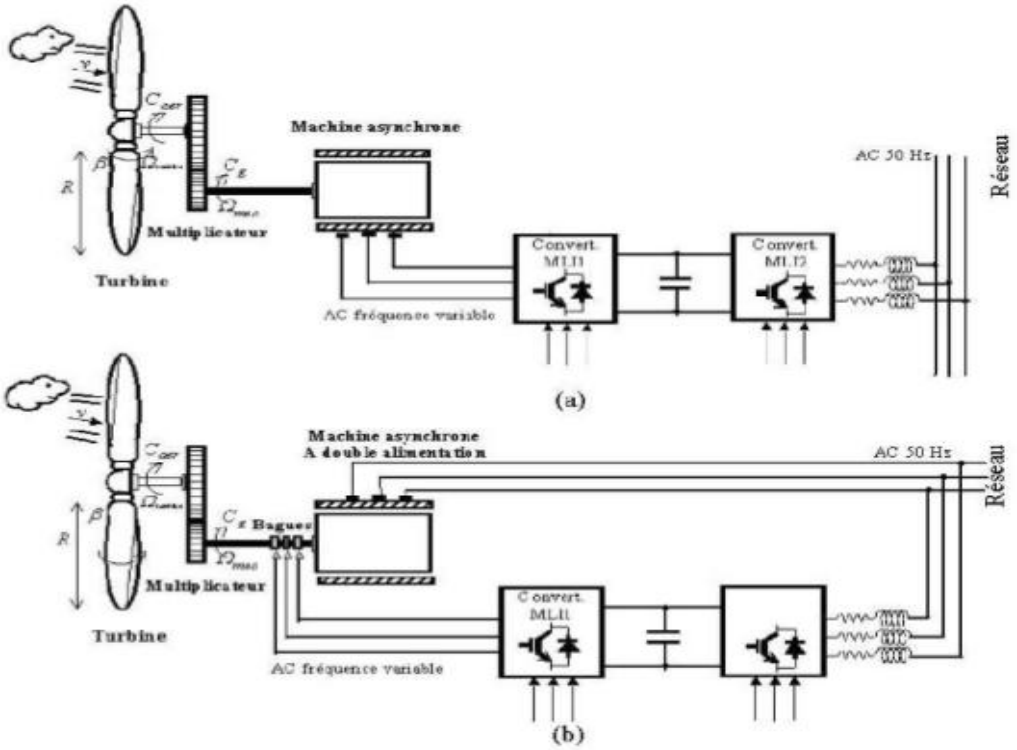

Figure I.12 : Eolienne fonctionnant à vitesse variable [2]

Nous présentons sur la figure suivante, la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5 MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas. Figure (I.14) [11]

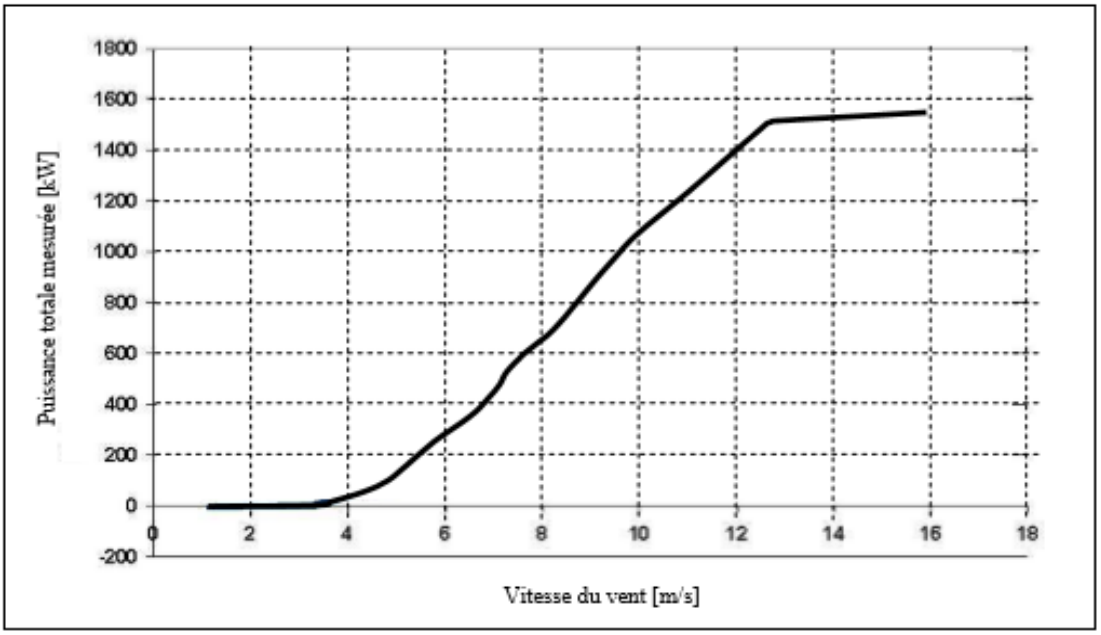

Figure I.13 : Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.[11]

I.8.2.b) L'intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure suivante figure (I.15) :

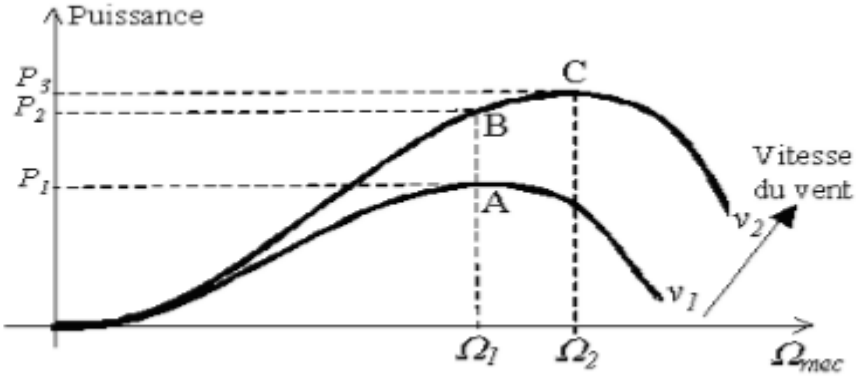

Figure I.14 : Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent. [6]

Pour une vitesse de vent v1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω1 ; on obtient une puissance nominale P1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v1 àv2, et que la vitesse de génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe),

la puissance P2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C).

Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω2. Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ($\Omega_{réf}$) calculée pour maximiser la puissance extraire. [6]

I.8.2.c) Applications des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides
- Systèmes reliés au réseau

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage.[4]

I.9 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

I.9.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétique empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalées de 120° dans l'espace. Son rotor n'est pas contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. [22]

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être

contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur techno-économique de construction .figure (I.16) [25]

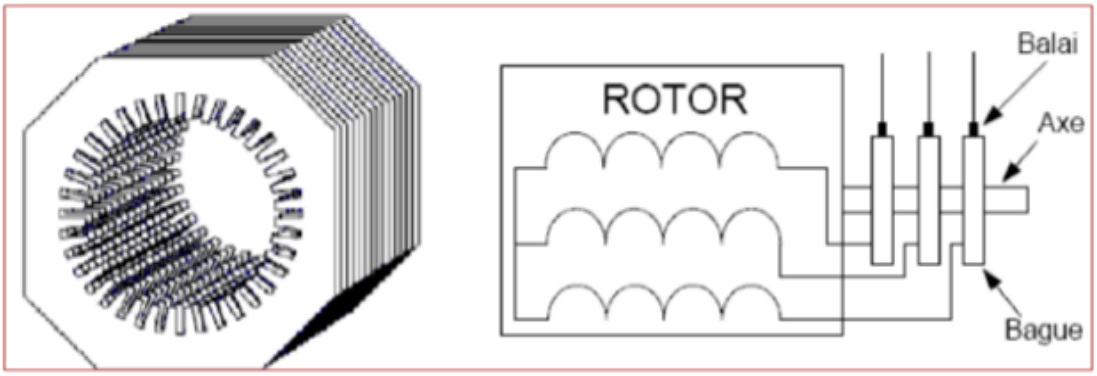

Figure I.15 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA[25]

I.9.2 Les applications de la GADA

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 statique (convertisseur côté GADA et convertisseurs coté réseau).[1]

I.10 Conclusion

Ce chapitre représente une généralité sur les éoliennes d'une façon générale, nous avons commencé par définir les éoliennes, ensuite nous avons représenté les types des éoliennes (éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal), et puis nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne les plus importants.

Nous avons d'exprimé la conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique par des systèmes éoliennes on utilise le développement de théorie de Betz qui donne les performances d'un système éolienne avec un coefficient théorique de 0,59 maximum.

Finalement, ce chapitre inclus une représentation sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et ses applications pour utilisé dans les aérogénérateurs d'un rôle de convertie l'énergie mécanique de la turbine à une énergie électrique.

Chapitre II

Etude des onduleurs

II.1 Introduction

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, commandables, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion, ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique. [31]

La forme d'onde de la tension de sortie des onduleurs multi-niveaux compose d'un certain nombre de niveaux intermédiaires. Ils sont obtenus à partir de tension aux bornes de condensateurs. La topologie la plus utilisée est basée sur la connexion en série des onduleurs monophasés à deux niveaux. Mais, d'un point de vue économique, il est intéressant de ne pas utiliser des alimentations de tension stabilisées pour contrôler les tensions aux bornes des condensateurs et d'employer un nombre minimal de composants semi-conducteurs.

La structure NPC (Neutral point clamped) permet d'utiliser un seul redresseur pour l'ensemble des condensateurs du bus continu. Pour cette structure de puissance, l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs du bus continu demeure l'obstacle principal. Ainsi plusieurs techniques de commande ont été développées et peuvent être classées en deux familles : la commande traditionnelle en boucle fermée des tensions aux bornes des condensateurs et la modulation symétrique générant autant de configurations pour la charge que la décharge des tensions des condensateurs. Malheureusement, en cas de variations de charge, la première famille conduit à une déformation de la forme d'onde de la tension multi-niveaux, la seconde famille conduit à un déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lorsque les courants dans la charge présentant un déséquilibre.[26]

II.2 Définition d'un onduleur

Un onduleur qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. figure(II.1) [28]

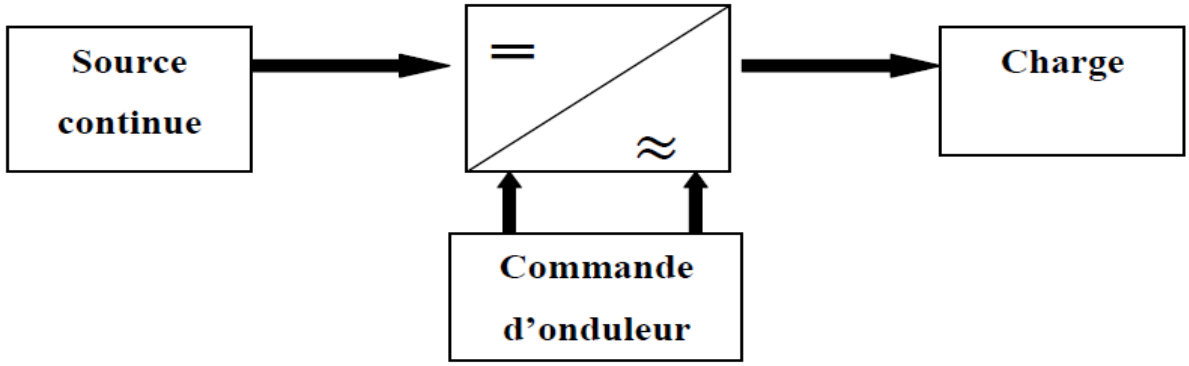

Figure .II.1 : Synoptique d'une conversion continu- alternatif.[28]

II.3 Principe de fonctionnement

Afin d'arriver à la topologie multi niveaux de l'onduleur et avant d'en observer l'évolution de sa structure de base, il est judicieux de bien comprendre les séquences de fonctionnement du montage simple d'un onduleur à deux niveaux.

Les onduleurs peuvent être classifiés en deux types : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme : BJT, MOSFET, MCT, SIT, GTO ou commande forcée des thyristors en fonction des applications. Généralement, ces onduleurs utilisent la commande MLI pour produire une tension de sortie alternative. Un onduleur est appelé un « current-fed inverter », (CFI) s'il est alimenté par une source de courant continu (le courant d'entrée est maintenu constant), un « voltage-fed inverter », (VFI) s'il est alimenté par une source de tension continu (la tension d'entrée est maintenu constante), et un « variable dc linked inverter », si la tension d'entrée est contrôlable. Figure (II.2) [29]

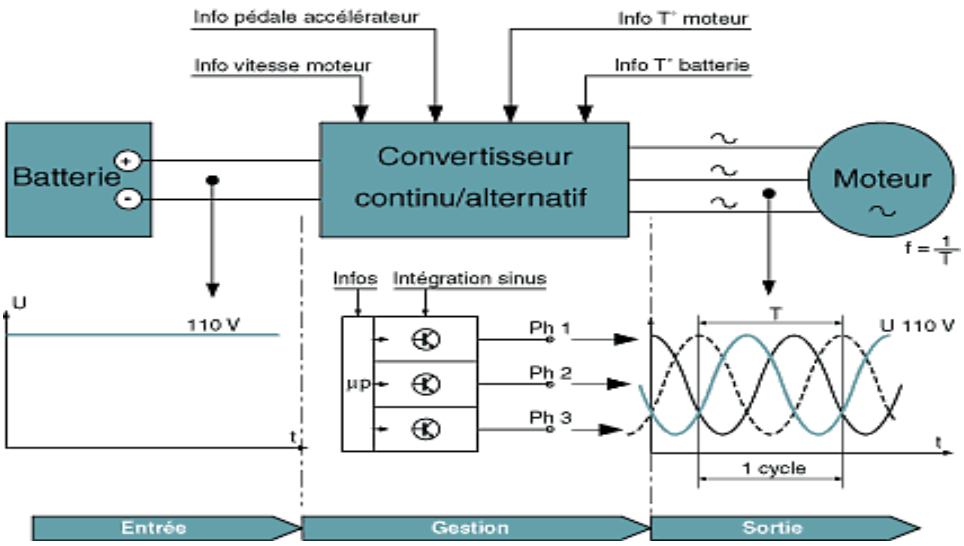

Figure II.2 : Principe de fonctionnement de l'onduleur [29]

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative a partir d'une tension continu comme le montre la figure (II.3), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion. figure (II.3)

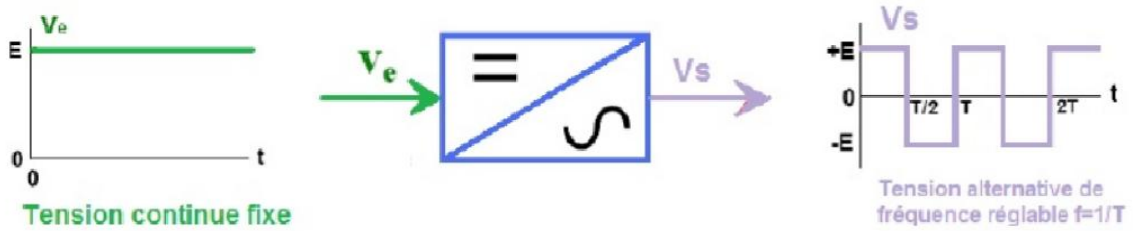

Figure II.3 : Symbole et signal d'un onduleur[29]

1 – L'utilisation directe d'une paire d'interrupteur de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

2-Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources .[30]

Quand S1-S2 sont fermé (On) et S3-S4 sont ouvert (Off) pour $t_1 < t < t_2$ on obtient une alternance positif $U(t) = V_{dc}$ comme la montre la figure (II.4) ci-dessous [30]:

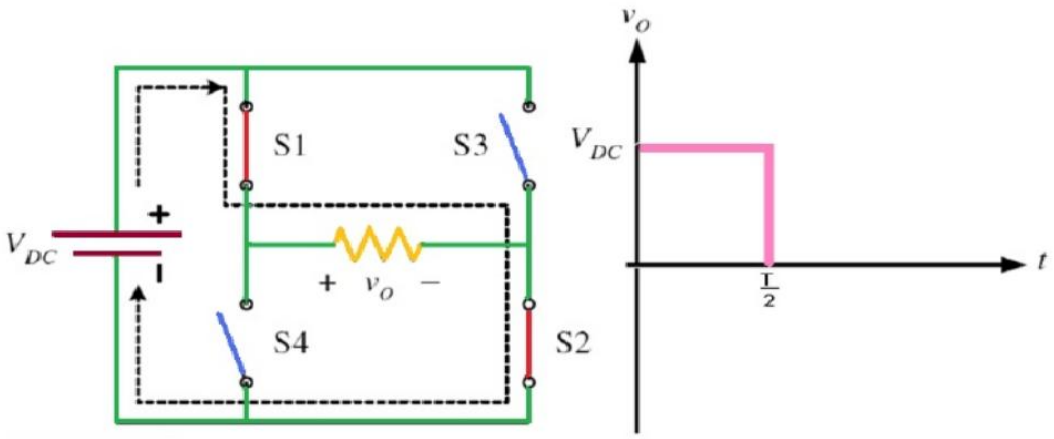

Figure II.4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demis cycle [29]

Quand S1-S2 sont ouvert (Off) et S3-S4 sont fermé (On) pour $t_2 < t < t_3$ on obtient une alternance négatif $U(t) = -V_{dc}$ comme la montre la figure (II.5)[34]

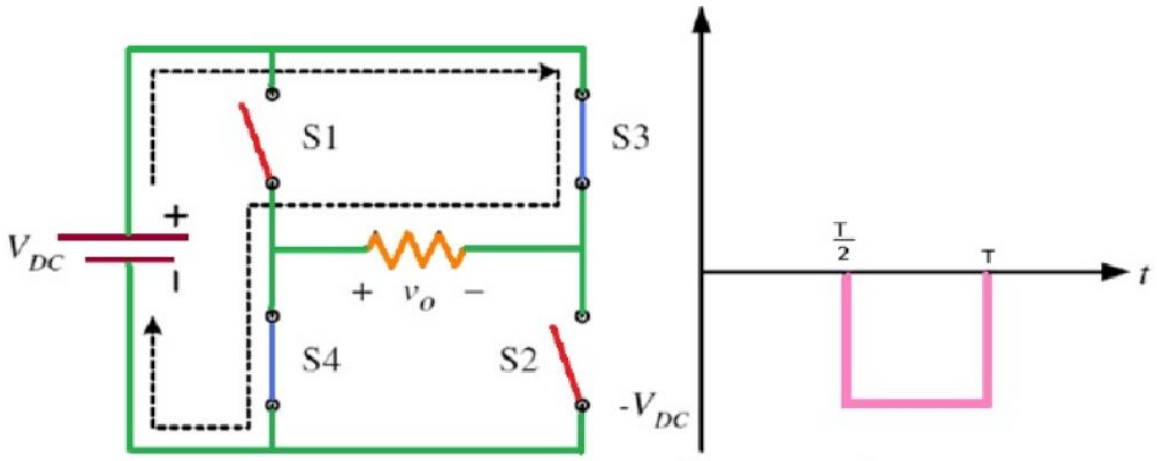

Figure II.5: Fonctionnement et de l'onduleur dans le 2éme demis cycle [29]

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la figure (II.6) [30]

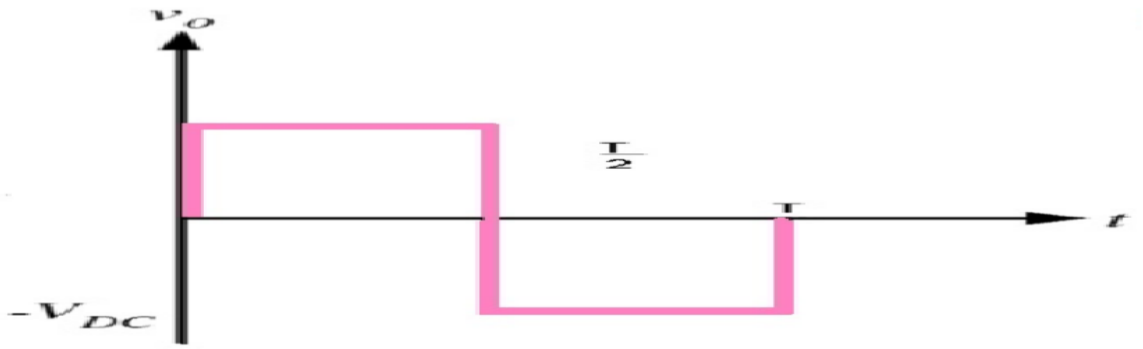

Figure II.6: Signal complet de l'onduleur [29]

II.4 Classifications des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Une première classification peut être faite en distinguant: Onduleur non autonome et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance ». [32]

II.4.1 Onduleur non autonome

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

II.4.2 Onduleur autonome

- Les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et de récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.[33]

II.4.3 Les onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome. [31]

II.5 Les onduleurs multi-niveaux

Les structures de conversion multi niveaux permettent de convertir en moyenne tension et forte puissance. Celles-ci sont construites à partir de cellules de commutations et permettent d'augmenter le courant et la tension en entrée ou en sortie. Ces structures sont appelées multi niveaux car les formes d'ondes des tensions en sortie permettent d'avoir plus de deux niveaux de tension différente. Les avantages les plus importants de la topologie multi niveaux par rapport à la topologie bi-niveaux conventionnelle sont les suivants :

- La tension de sortie est échelonnée avec au moins trois niveaux de tension et donc, elle présente un meilleur spectre fréquentiel. En conséquence, les éléments de filtrage nécessaires sont plus réduits et moins coûteux.
- L'utilisation des tensions de sortie plus élevées permet d'augmenter la puissance du convertisseur sans augmenter le courant.
- L'augmentation de la fréquence apparente de sortie permet une dynamique du système plus élevée

.

Cependant, ces convertisseurs présentent aussi quelques inconvénients :

- Au fur et à mesure que les niveaux de tension augmentent, la structure de contrôle devient plus complexe.
- Des problèmes de déséquilibres de tension des condensateurs apparaissent.

En général, l'utilisation des onduleurs multi niveaux a la possibilité de produire une bonne qualité de tension avec une baisse fréquence de commutation ainsi réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques. [28]

II.5.1 L'intérêt des onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveau présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande de judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques. [27]

II.5.2 Principe de l'onduleur multi-niveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi-niveaux. La figure(II.7) aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multi-niveaux.

Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (II.7.a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou Vdc1. Sur la figure (II.7.b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, Vdc1 ou Vdc1 + Vdc2. Dans la figure (II.7.c) le cas général de m niveaux est présenté [17]. Figure (II.7)

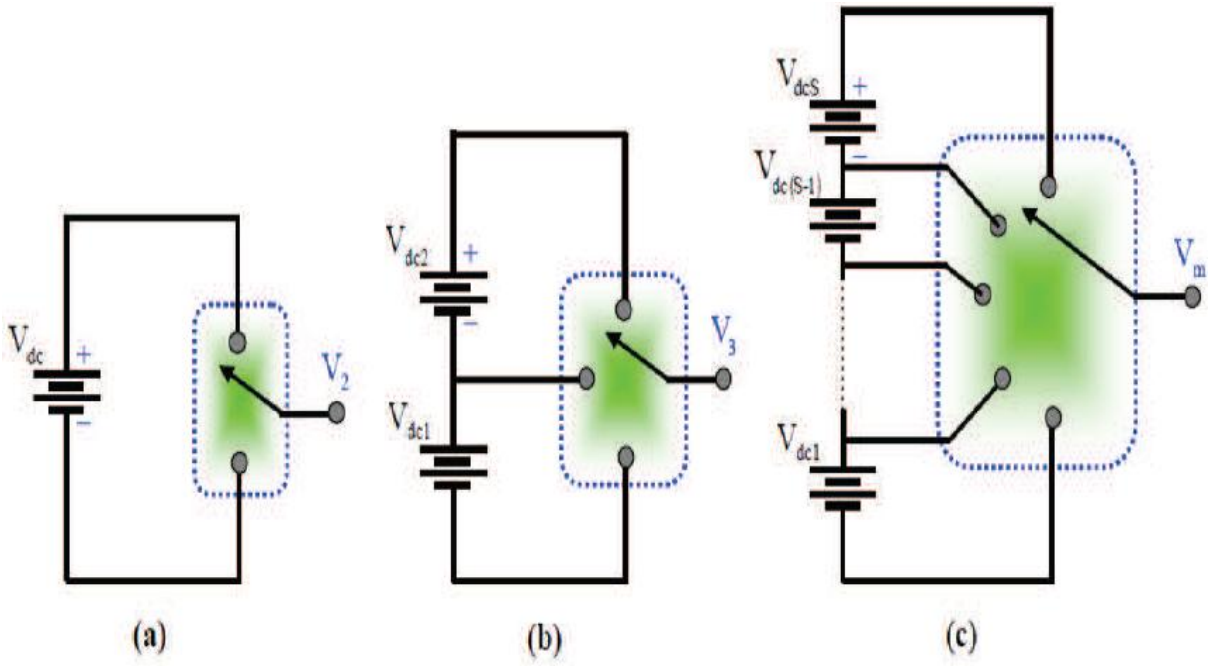

Figure. II.7 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b), et à m niveaux (c) [17]

II.6 Les topologies des onduleurs multi-niveaux

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie est de donner une vue générale des quatre topologies de base des onduleurs multi-niveaux [27] :

- La topologie à diode de bouclage (NPC),
- La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- La topologie en cascade

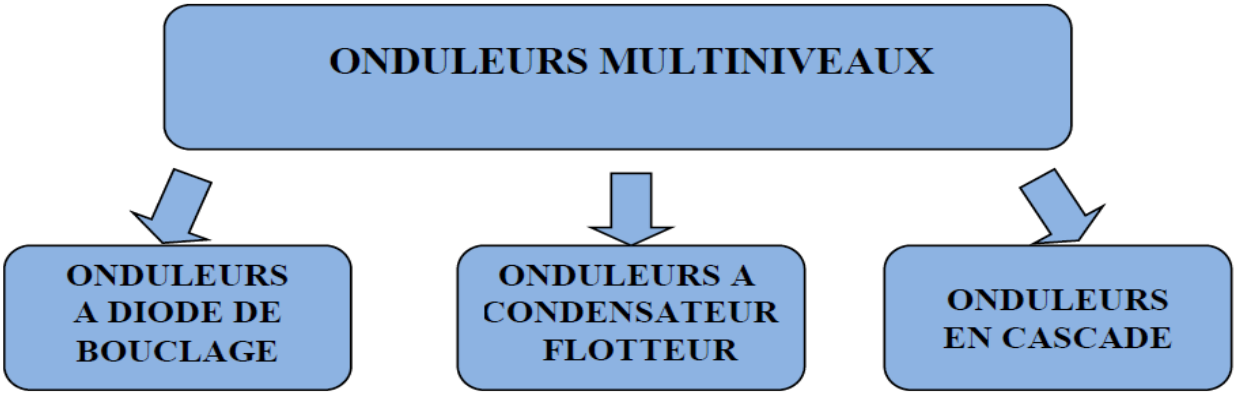

Figure II.8 : Les différents topologies des onduleurs multi-niveaux[27]

II.6.1 Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC)

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois en 1980, par Nabae et Al. L'onduleur NPC à trois niveaux est donné par la figure (II.9). [26]

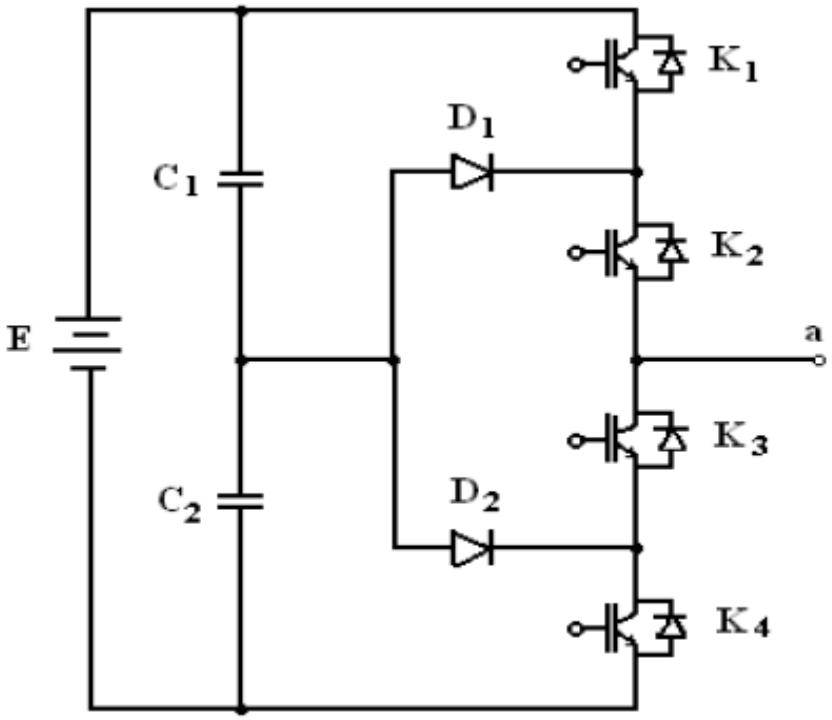

Figure II.9: Onduleur NPC à trois niveaux (la phase a)[26]

II.6.2 Onduleur de tension à cellule imbriquée

Dans un convertisseur à deux niveaux de tension, chaque phase est constituée d'une paire d'interrupteurs de puissance montée en parallèle aux bornes d'un condensateur. Ils sont souvent commandés de façon complémentaire, si bien que la tension de sortie de la branche est reliée soit à la borne positive, soit à la borne négative de ce condensateur. [26]

Dans la topologie multi-niveau proposée en 1992 par T.Meynard et H.Foch, elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multi level inverter » dans la littérature anglo-saxonne.

Plusieurs cellules « condensateur et pair d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la figure (II.10) [26]

($V_{C2} = 2V_{C1}$, $Vc_3 = 3Vc_1$, $Vc_4 = 4Vc_1$, $Vc_n = nVc_1$).

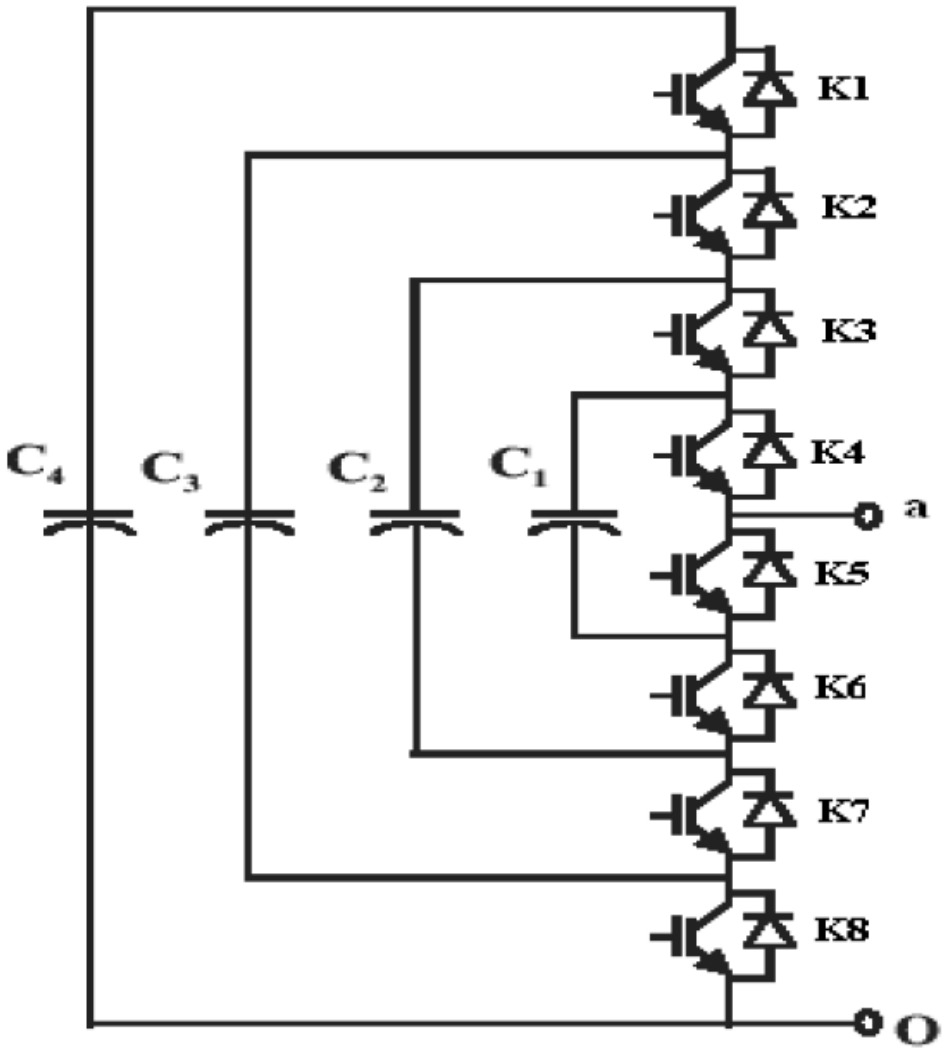

Figure II.10: Topologie multi-niveau à cellule imbriquées (phase a)[26]

II.6.3 Onduleur de tension en cascade

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988. Cette approche modulaire a été étendue pour inclure aussi les systèmes triphasés.

Sans conteste, les compilations et le cout des sources isolées pour chaque pont n est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire.

L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. La figure (II.11) représente un onduleur monophasé en cascade à cinq niveaux. [26]

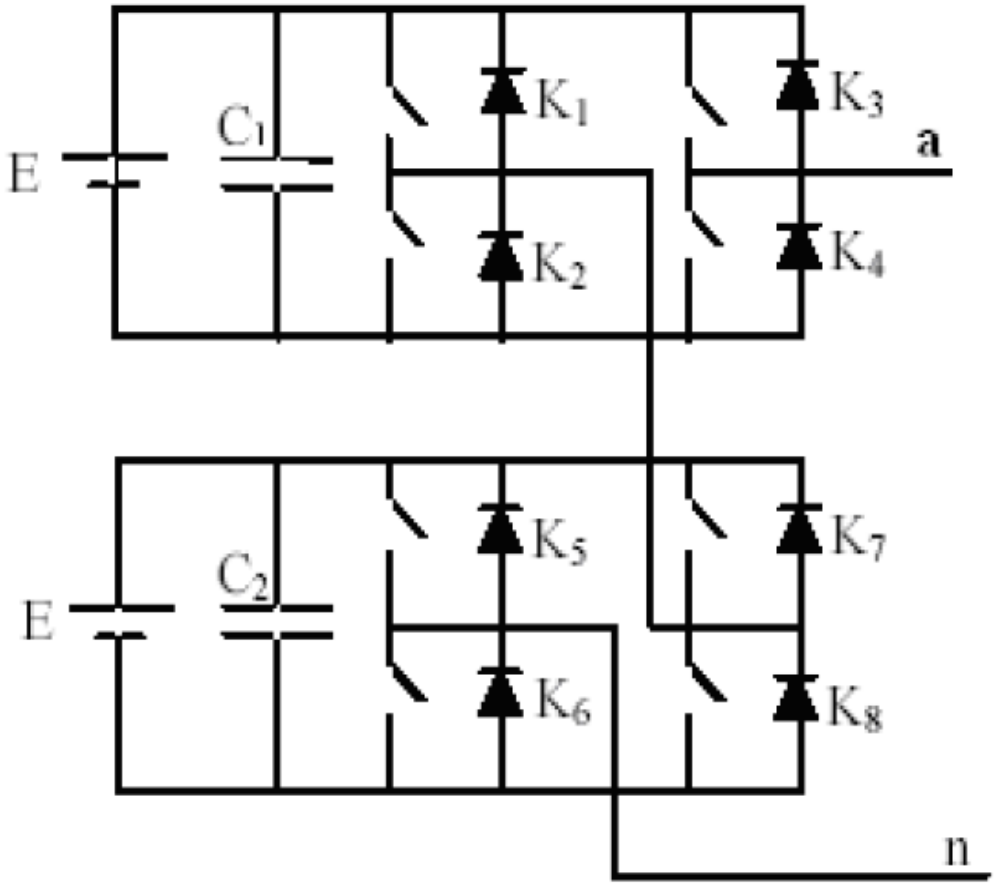

Figure II.11 : Onduleur en cascade à cinq niveaux (phase a)[26]

II.7 Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC

II.7.1 Structure

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure (II.12). Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (Cl et C2), formant un point milieu noté (0) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux [11]. La tension totale du bus continu vaut E; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $\frac{E}{2}$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (KI , K2, K3 et K.. pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au*1* point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Figure (II.12)[34]

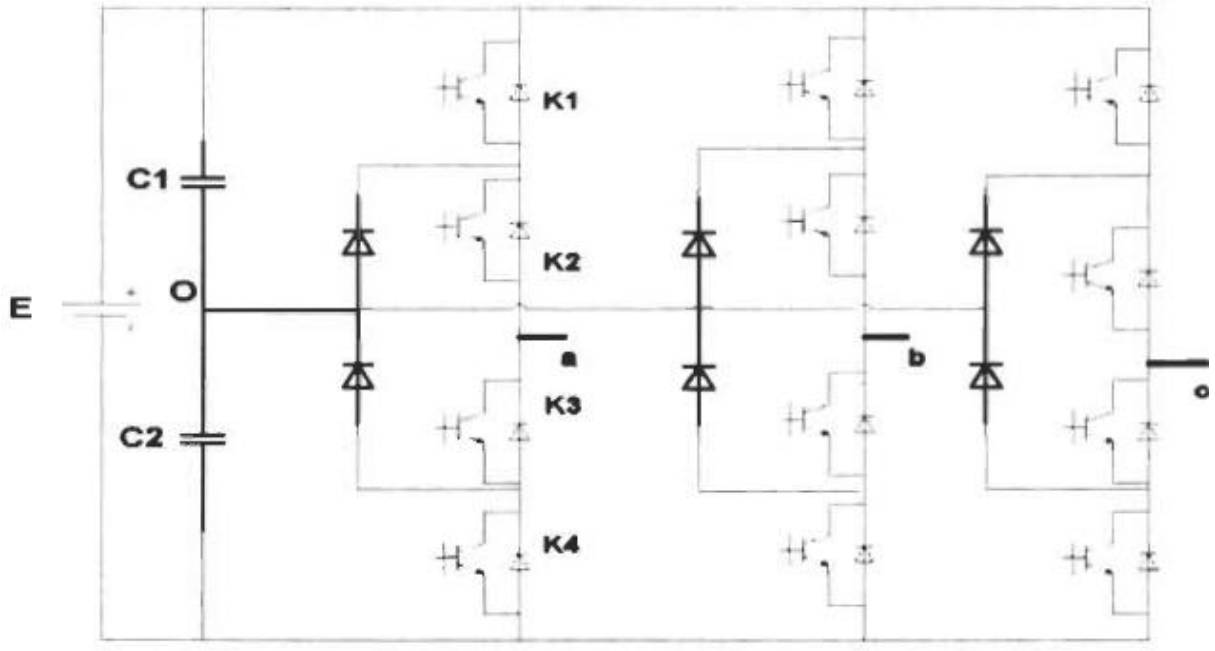

Figure .II.12: Schéma d'un onduleur NPC à 3niveaux[34]

II.7.2 Principe de fonctionnement

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension Vao pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants I_{do}, I_{d1} et I_{d2}. Fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant (figure II.13). [34]

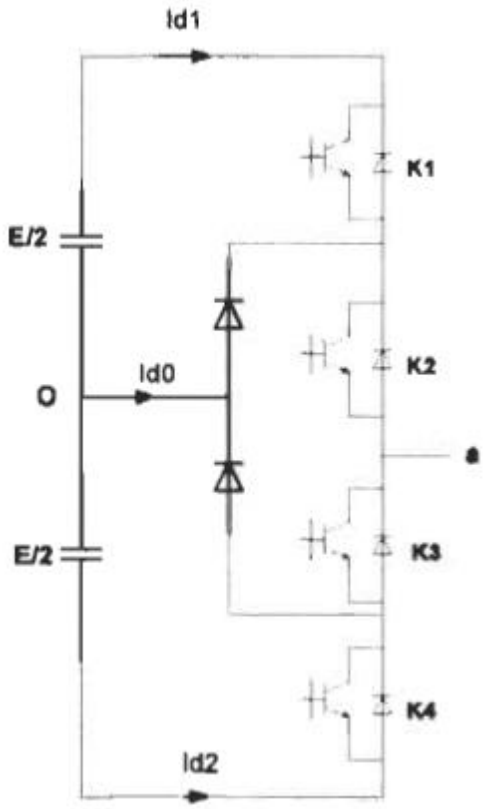

Figure II.13 : Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux [34]

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnent:

• Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs KI, K2 sont passants et K3, K. Sont bloqués comme le montre la figure (II.14.a). Et la tension de sortie Vao est: $Vao = +\frac{E}{2}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_3, K_4 vaut : $V_{K3} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$.

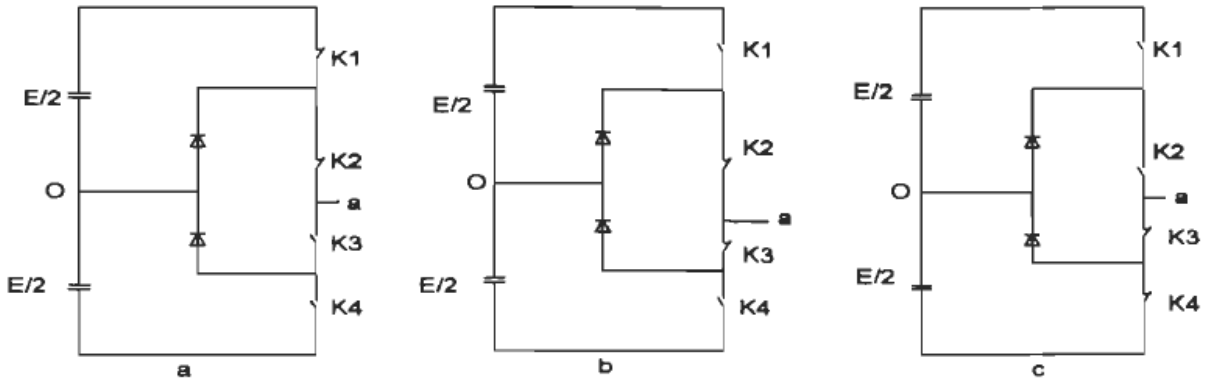

Figure .II.14: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux [34]

• Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs K_2, K_3 sont passants et K_1, K_4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point o à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (II.14.b) Et la tension de sortie Vao est donc nulle, $Vao = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut : $V_{K1} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$.

• Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la figure(II.14.c). Et la tension de sortie Vao est: Vao = $-\frac{E}{2}$.

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (II.1) [34]

Tableau .II.1 : Etats possible d'onduleur NPC à 3 Niveaux [34]

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{ao}
1	1	0	0	E/2
0	0	1	1	0
0	1	1	0	-E/2

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure (II.15)

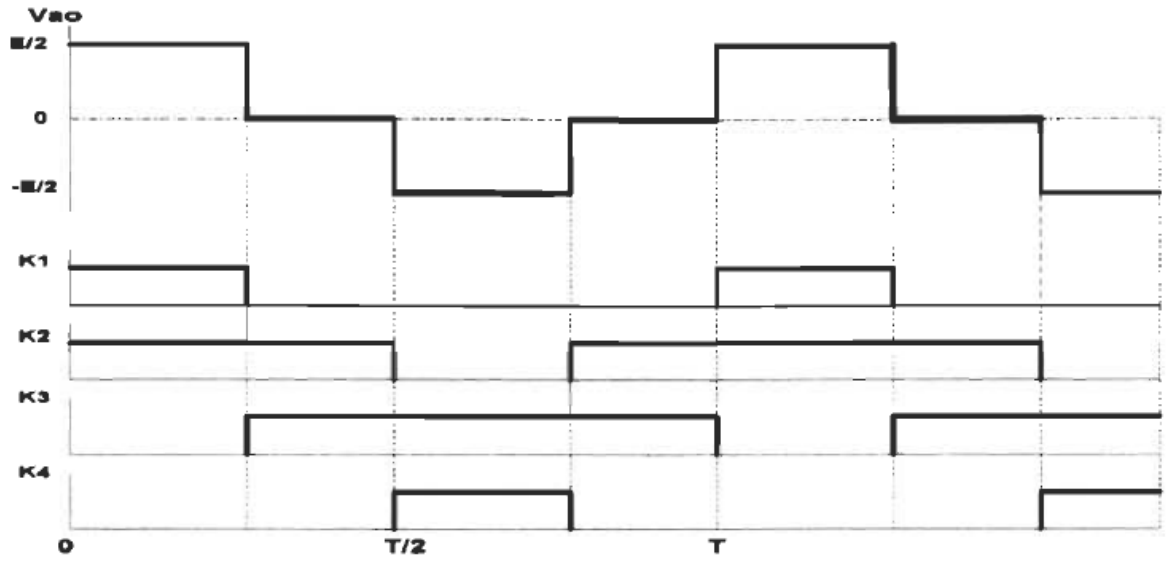

Figure II.15 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux [34]

II.8 Les différents types de commandes des onduleurs

Pour découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir à la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur. Cette dernière a une très grande importance, car c'est elle qui détermine le type de la tension de sortie. On classe les onduleurs en plusieurs catégories.

II.8.1 Commande à onde rectangulaire (tension en deux niveaux)

Pour la forme d'onde de cette commande, nous avons deux états de sortie (+E, -E) positifs puis négatif successivement comme schématisé par figure (II.16). Avec la valeur efficace de la tension de sortie de l'onduleur n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée. Figure(II.16) [35]

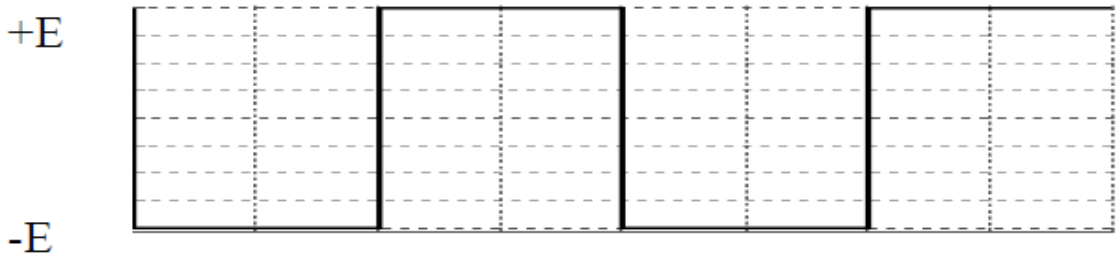

Figure II.16 : Onde d'un onduleur 2 niveaux [35]

II.8.2 Commande en créneaux de largeur variable (tension en 3 niveaux)

Cette commande est obtenue par l'association des ondes rectangulaires déphasées l'une par rapport à l'autre avec un angle variable d'où une commande à trois états de sortie (-E, 0, +E) figure (II.17). Avec la valeur efficace de la tension de sortie de l'onduleur est réglable en agissant sur la durée du créneau. [35]

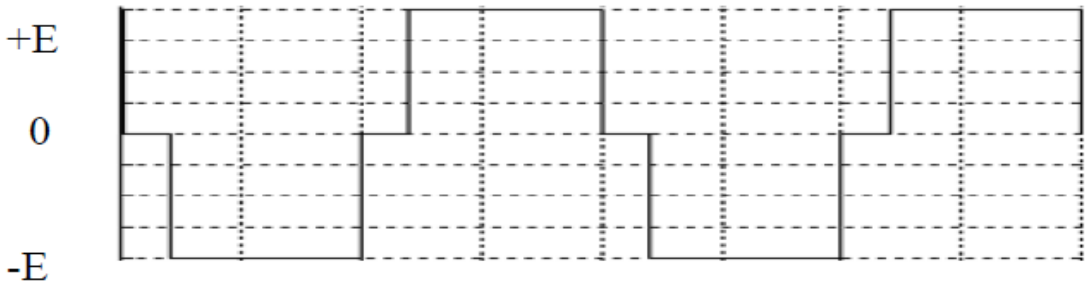

Figure II.17: Onde d'un onduleur 3 niveaux [35]

II.8.3 Commande à paliers (tension 5 niveaux)

Cette commande est constituée par la somme d'ondes rectangulaires déphasées l'une par rapport à l'autre avec deux angles prédéterminées pour obtenir les cinq niveaux (un exemple : +2E, +E, 0, -E, -2E), et dit aussi (commande en marche d'escalier) figure (II.18). Elle se rapproche mieux à la sinusoïde. L'un des problèmes de ce système est le nombre important d'éléments.[35]

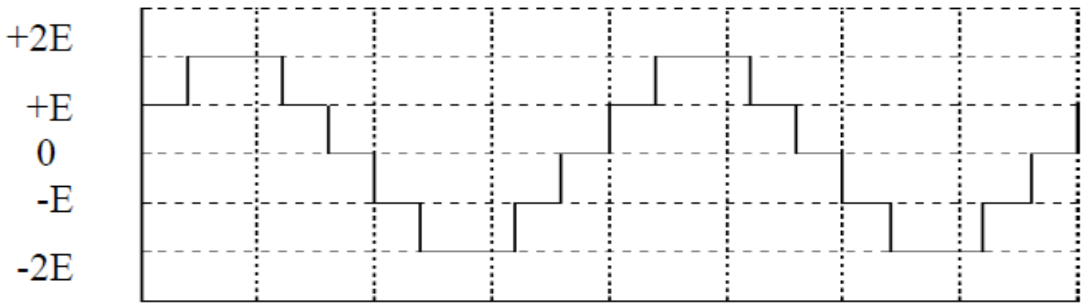

Figure II.18: Onde d'un onduleur à tension de sortie en marche d'escalier [35]

II.9 Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux

Les convertisseurs multi-niveaux étaient destinés à la base à résoudre certains problèmes posés par l'utilisation des convertisseurs à deux niveaux de tension, ou triphasés. Ils sont donc utilisés afin de régler la fréquence et l'amplitude de la tension, mais aussi pour le transfert d'énergie entre une ou plusieurs sources d'alimentation à courant continu ou alternatif et une charge à courant alternatif monophasé. Cette utilisation ouvre plusieurs opportunités d'application,

dont quelques-unes sont [31] :

- Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine;
- Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes ;
- Application dans le domaine des réseaux électriques ;
- Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques.

II.10 Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasé

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable.

Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse.

La conversion continue alternative est assuré par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bonnes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeur d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs(MLI), cette technique est basé sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude Ar et de fréquence f, avec un signal appelé porteuse d'amplitude Ap et de fréquence fp très élevée. (Figure II.19) [35]

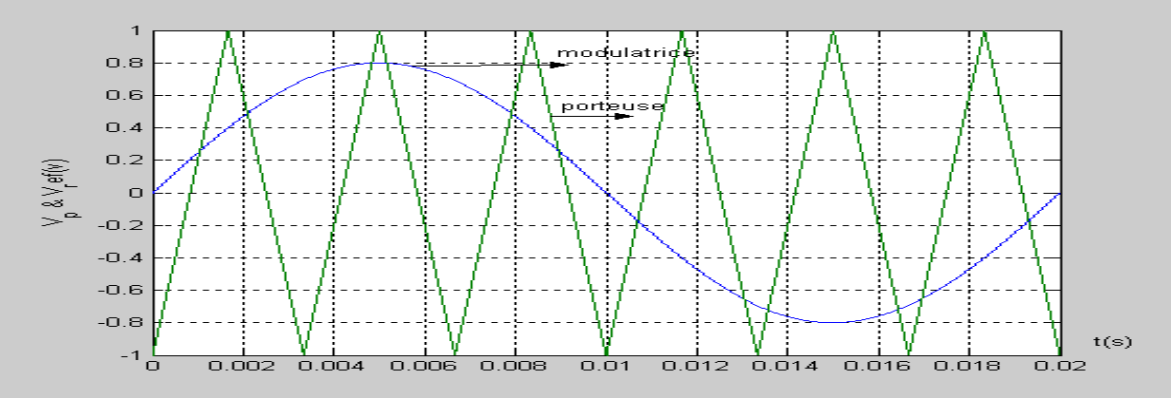

Figure II.19 : Principe de la modulation sinus triangle [35]

II.11 Conclusion

On représente dans ce chapitre une étude sur les onduleurs et leurs principes de fonctionnement, ensuite on a classé les onduleurs en trois catégories :

- Non autonome
- Autonome
- A résonance

Après on présente l'intérêt des onduleurs multi-niveaux, et on cite les différentes structures de base des onduleurs de tension multi-niveaux.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les structures permettant une conversion directe (NPC et Cellules imbriquées) sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active.

A la fin de ce chapitre on parle sur les types de commande des onduleurs multi-niveaux, ensuite nous avons exprimé le principe de la commande MLI pour les onduleurs triphasés.

Chapitre III

Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne

III.1.Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'´energie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple /vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. [36].

Après avoir présenté les éoliennes et la théorie de la production d'énergie, on passe à la modélisation de ses composants tout en présentant au passage la machine asynchrone à double alimentation.

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.

Dans ce travail nous choisissons d'utiliser la génératrice synchrone à double alimentation (GADA) qui promet à un très bel avenir pour l'éolien.

III.2.Modélisation de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entrainement, tournant à une vitesse Ω, relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraine une génératrice électrique Figure(III.1) [3].

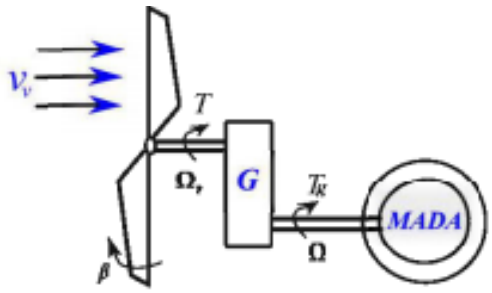

Figure.III.1: Schéma de la turbine éolienne[3]

III.2.1.Modèle de la turbine

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [2]

$$P\nu = \frac{1}{2}\rho S v \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

$$S = R^2\pi \qquad \text{(III.2)}$$

Où:

ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m³à la pression atmosphérique à l5°C).

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

v : est la vitesse du vent.

La puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peut s'exprimer en fonction du coefficient de puissance Cp :

$$P_{éolienne} = Cp\,(\lambda, \beta) * P\nu \qquad \text{(III.4)}$$

Cp (λ, β) est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ, qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β. A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [2], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [9] :

$$Cp = f(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167.(\beta - 2)).\mathrm{Sin}\left[\frac{\pi.(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184.(\lambda-3).(\beta-2) \qquad \text{(III.5)}$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales.

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \qquad \text{(III.6)}$$

Ω : est la vitesse de la turbine.

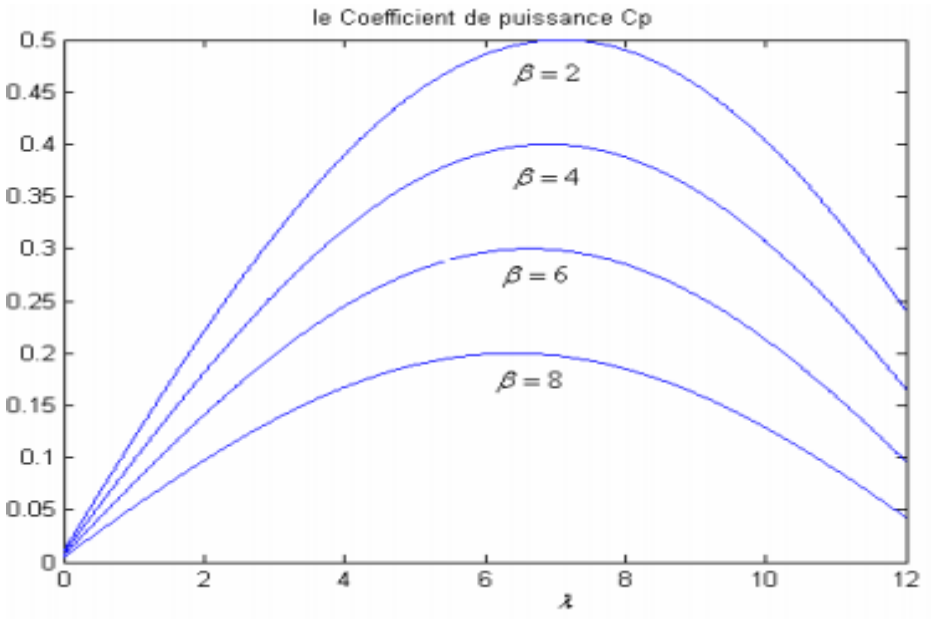

Figure.III.2 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine [1]

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer}=\frac{P_{éolienne}}{\Omega} \qquad \text{(III.7)}$$

III.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne (vitesse lente) à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice (vitesse rapide Ω) avec un rapport de vitesse G. Cela se traduit mathématiquement par les équations : [14]

$$\Omega_{mec} = G\Omega \qquad \text{(III.8)}$$

$$C_{mec}=\frac{C_{aer}}{G}$$

III.2.3. Equation dynamique de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit **:**

$$J\frac{d\Omega mec}{dt} = C_{aer} - f\Omega_{mec} \qquad \text{(III.9)}$$

f : coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

Couple totale d'une éolienne:

$$C_{aer} = C_{mec} + C_{em} \qquad \text{(III.10)}$$

J : Inertie en (kg.m²).

III.2.4. Stratégie de commande d'une éolienne

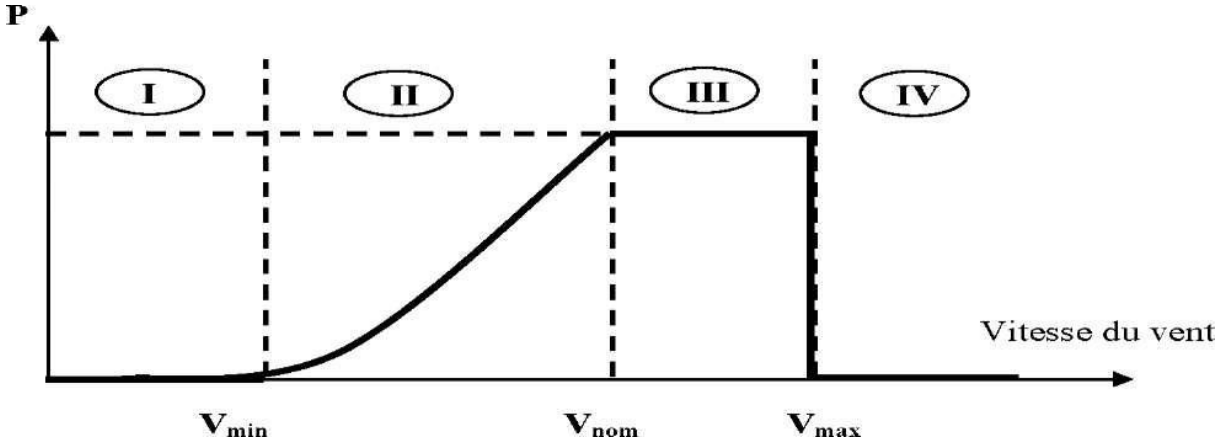

Figure .III.3 : Caractéristiques puissance, vitesse de vent [16].

Zone 1: C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω out-in (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle éolienne a démarré).

Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale (B=0) afin d'obtenir un Cp maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.

Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice 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 : Le Pitch contrôle. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante [36].

III.2.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » [21]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de puissance la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure (3.4) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent *Vv* donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale [36]

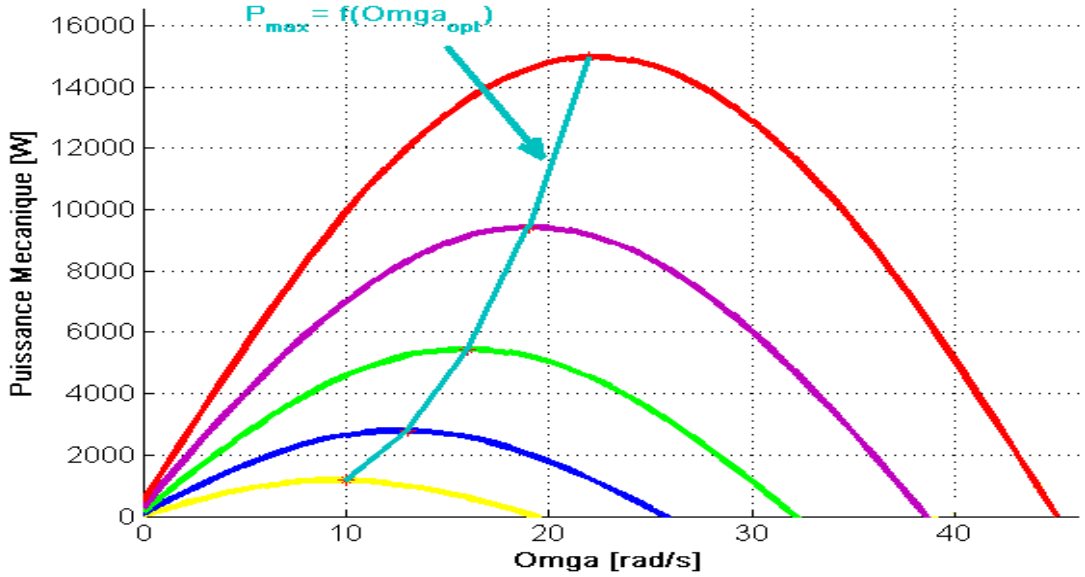

Figure .III.4 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [36]

III.2.6.Mode de fonctionnement de MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur.

Par contre dans le cas de la 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 fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. [8]

a. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure (III.5) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator .On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement figure (III.5) [37].

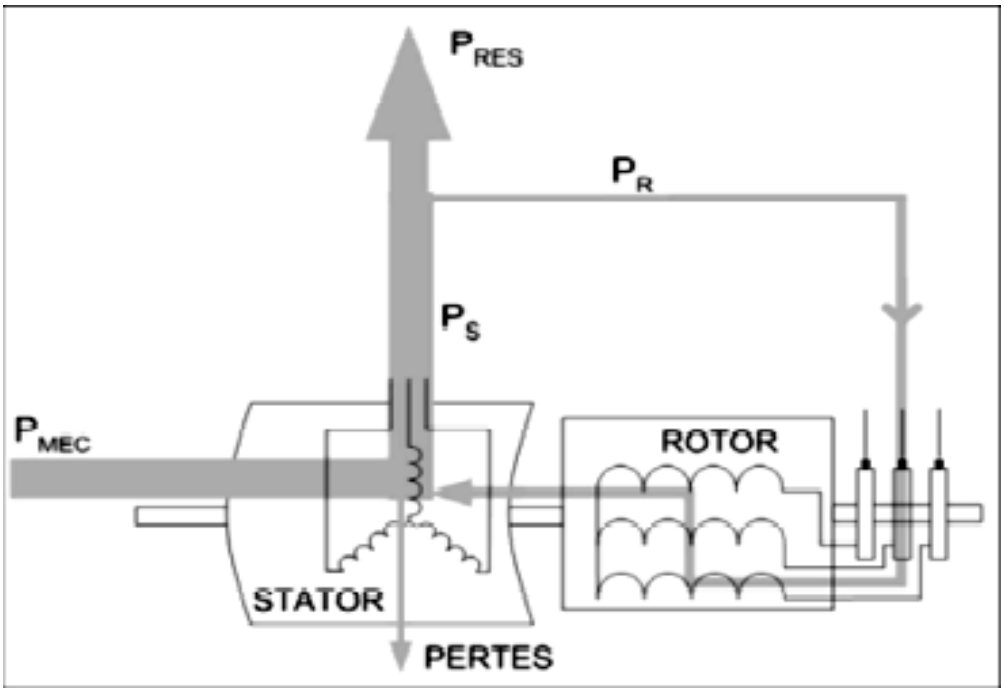

Figure.III.5 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone [37]

b. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (III.6) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissements est dissipée en pertes joule dans le rotor figure(III.6) [37].

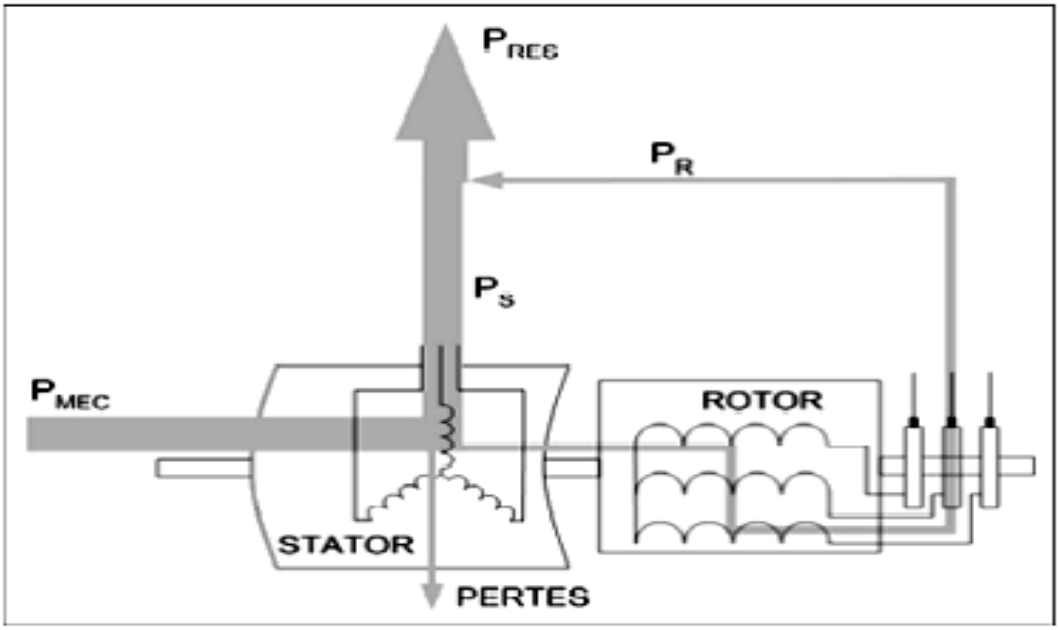

Figure .III.6: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone [37]

c. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure (III.7) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor figure (III.7). [37]

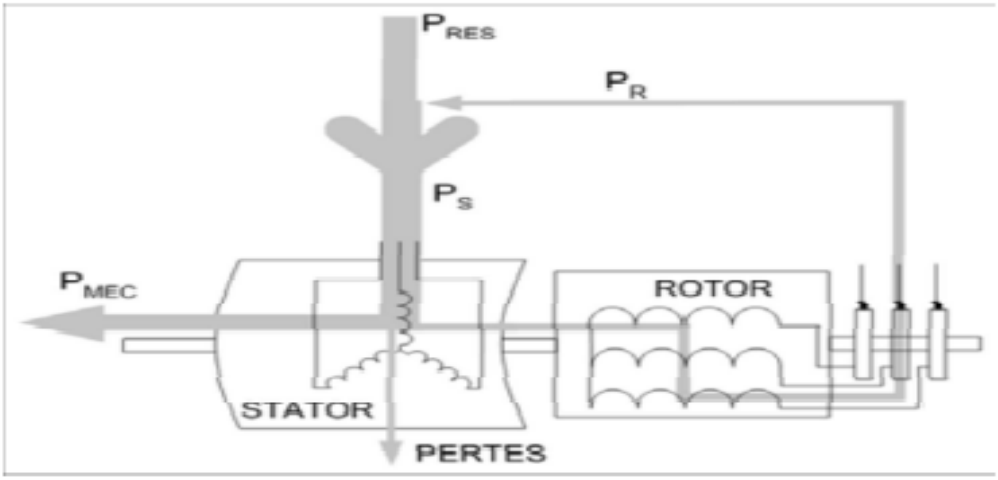

Figure.III.7 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone [37]

d. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure (III.8) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement figure(III.8) [37].

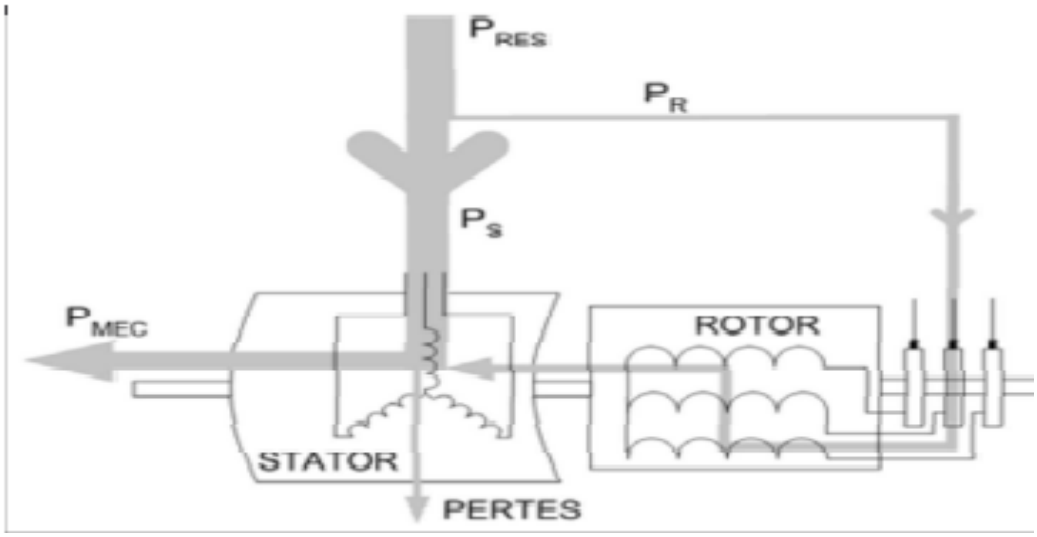

Figure .III.8 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone [37]

III.3. Modélisation de la partie conversion électromécanique

La modélisation d'une génératrice asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette génératrice à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. [30]

III.3.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MADA, est établie sous les hypothèses simplificatrices
On suivantes [8] :

- suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- La f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures d'où résulte du fait que l'entrefer est constant.
- L'effet d'encochage est négligé et les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor donc seuls les enroulements sont parcourus par des courants.

III.3.2.Equations mathématiques de la GADA dans le repère (abc)

Le modèle de la GADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. A cet effet, lors de la modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que les enroulements de la GADA ne sont pas en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après, ne sont pas nulles [9].

a-Equation électrique de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statorique et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$[VSabc] = [Rs]\,[Is] + \frac{d[\Phi s]}{dt}. \qquad \text{(III.11)}$$

$$[Vrabc] = [Rr]\,[Ir] + \frac{d[\Phi r]}{dt}. \qquad \text{(III.12)}$$

$$[Vrabc] \neq 0.$$

Les flux sont donnés par :

$$[\Phi s] = [Lss]\,[Is] + [Msr]\,[Ir] \qquad \text{(III.13)}$$

$$[\Phi r] = [Lrr]\,[Is] + [Mrs]\,[Ir] \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :

$$[Is] = \begin{matrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{matrix} \quad [Ir] = \begin{matrix} Ira \\ Irb \\ Irc \end{matrix} \quad [\Phi s] = \begin{matrix} \Phi sa \\ \Phi sb \\ \Phi sc \end{matrix} \quad [\Phi r] = \begin{matrix} \Phi sa \\ \Phi sb \\ \Phi sc \end{matrix} \qquad \text{(III.15)}$$

Et :

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \qquad \text{(III.16)}$$

Rs, Rr : résistances des enroulements rotorique et statoriques.

$$[Lss] = \begin{bmatrix} ls & Ms & Ms \\ Ms & ls & Ms \\ Ms & Ms & ls \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [Lrr] = \begin{bmatrix} ls & Mr & Mr \\ Mr & ls & Mr \\ Mr & Mr & ls \end{bmatrix} \qquad \text{(III.17)}$$

ls, lr : Inductances de fuites statorique et rotorique.

Ms, Mr : Inductances mutuelle.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[Msr]=\begin{bmatrix} Msr\ \cos(\theta) & Msr\cos(\theta+2\frac{\pi}{3}) & Msr\ \cos(\theta-2\frac{\pi}{3}) \\ Msr\ \cos(\theta-2\frac{\pi}{3}) & Msr\ \cos(\theta) & Msr\cos(\theta+2\frac{\pi}{3}) \\ Msr\cos(\theta+2\frac{\pi}{3}) & Msr\ \cos(\theta-2\frac{\pi}{3}) & Msr\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(III.18)}$$

Avec :

$[Msr] = [Msr]^t$

En remplaçant (3.13) dans (3.11) et (3.12) dans (3.14), on obtient le système suivant :

$$[V_{Sabc}] = [Rs]\,[Is] + \frac{d([Lss][Is])}{dt} + \frac{d([Msr]\,[Ir])}{dt} \quad \text{(III.19)}$$

$$[V_{Rabc}] = [Rr]\,[Ir] + \frac{d([Lrr]\,[Is])}{dt} + \frac{d([Mrs]\,[Ir])}{dt} \quad \text{(III.20)}$$

b-Equations mécanique de la machine

L'équation mécanique d'une machine asynchrone à double alimentation est :

$$\frac{j}{P}\frac{d(Wr)}{dt} = Cmec - Cr - fr\,\Omega \quad \text{(III.21)}$$

Où :

j : moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge)

Cr : couple résistant

f : Coefficient de frottement visqueux

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$j\frac{d\Omega}{dt} = \frac{j}{P}\frac{d(Wr)}{dt} = -\frac{3}{2}\,p\,\frac{M}{Ls}(\Phi rdIsq - \Phi rqIsd) - Cr - fr \quad \text{(III.22)}$$

III.3.3 Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park)

Pour passer du système triphasé abc, au système biphasé (dq), (et réciproquement) il faut utiliser la transformation de Park.

La transformation de Park constitue d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (ab), puis vers le repère (dq).

Le repère(ab) est fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile il forme avec le repère fixe(ab) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park figure (III.9) **[13].**

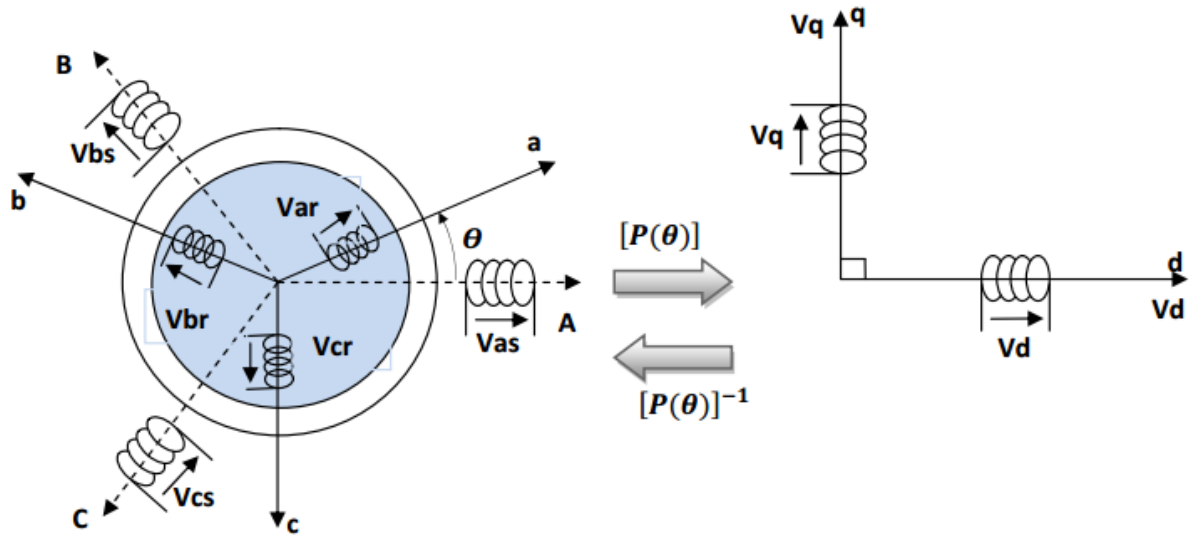

Figure III.9 : Représentation de la GADA dans le repère (dq) [8]

L'angle θr donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad \text{(III.23)}$$

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad \text{(III.24)}$$

Où

Xa, Xb, Xc : Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

Xd, Xq : Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

X0 : La composante homopolaire.

[P (θ)] : La matrice de Park.

$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice inverse de Park

Les matrices de Park sont données ensuite :

$$[P(\theta)] = \frac{\sqrt{2}}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.25)}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.26)}$$

Où :

θest l'angle entre l'axe d etl'axe de référence dans le système triphasé (θs pour les grandeurs statorique et θr pour les grandeurs rotorique).

III.3.4.Modèle de la machine en représentation d'état

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d,q) car c'est la solution la plus générale.

Le choix des variables d'état, dépend des objectifssoit pour la commande soit pour l'observation, pour le modèle complet Ce est un variable d'état, pour les quatre variables électriques, notre choix pour la modélisation est le vecteur d'état suivant : [Isd ,Isq, Φrd ,Φrq][11]

Les équations des courants et de tension dans le repère (dq) :

$$\begin{cases} Isd = \frac{1}{Lr}\Phi rd - \frac{M}{Lr}Isd \\ Isq = \frac{1}{Ls}\Phi rq - \frac{M}{Lr}Isq \\ \Phi sd = Ls\sigma Isd + \frac{M}{Lr}\Phi rd \\ \Phi sq = Ls\sigma Isq + \frac{M}{Lr}\Phi \end{cases} \quad \text{(III.27)}$$

Avec : $\sigma = 1-\frac{M^2}{LsLr}$ (III.28)

En remplaçant Φsd et Φsq en fonction de Φrdet Φrq dans l'équation de tension, on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} Vsd = Rs\ Isd + Ls\ \sigma \frac{dIsd}{dt} + \frac{M}{Lr}\frac{d\Phi rd}{dt} - ws\ \left[Ls\sigma\ Isq + \frac{M}{Lr}\Phi rq\right] \\ Vsq = Rs\ Isq + Ls\ \sigma \frac{dIsq}{dt} + \frac{M}{Lr}\frac{d\Phi rq}{dt} + ws\ \left[Ls\sigma\ Isd + \frac{M}{Lr}\Phi rd\right] \end{cases} \quad \text{(III.29)}$$

$$\begin{cases} \frac{d\Phi rd}{dt} = -Rr\ Ird + (ws - wr)\Phi rq + Vrd \\ \frac{d\Phi rq}{dt} = -Rr\ Irq - (ws - wr)\Phi rd + Vrq \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\frac{dX}{dt} = Ax + BU \quad \text{(III.31)}$$

$$Y = Cx \quad \text{(III.32)}$$

Avec :

X : vecteur d'état du système [Isd, Isq, Φrd, Φrq]^T

A: matrice d'état du système.

B : matrice de commande.

U : vecteur de commande [Vsd, Vsq, Vrd, Vrq] ^{T}

Y : vecteur de sortie.

C : matrice d'observation

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & ws & \frac{K}{Tr} & wrK \\ -ws & -\lambda & -wrK & \frac{K}{Tr} \\ \frac{M}{Tr} & 0 & -\frac{1}{Tr} & wsl \\ 0 & \frac{M}{Tr} & -wsl & -\frac{1}{Tr} \end{bmatrix} \quad \text{(III.33)}$$

Avec : Tr $=\frac{Lr}{Rr}$, Ts$=\frac{Ls}{Rs}$, λ $=\frac{1}{\sigma.Tr}$, $K=\frac{M}{\sigma.Ls.Lr}$

$$B=\begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma Ls} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma Ls} & K & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(III.34)}$$

La décomposition des équations d'état nous donne :

$$\begin{cases} \frac{dIsd}{dt} = -\lambda.Isd + ws.Isq + \frac{K}{Tr}\Phi rd + wr.K.\Phi rq + \frac{1}{\sigma Ls}Vsd + K.Vrd \\ \frac{dIsd}{dt} = -ws.Isd - \lambda.Isq - wr.K.\Phi rd + \frac{K}{Tr}\Phi rq + \frac{1}{\sigma Ls}Vsq + K.Vrq \end{cases} \qquad \text{(III.35)}$$

$$\begin{cases} \frac{d\Phi rd}{dt} = \frac{M}{Tr}.Isd - \frac{1}{Tr}.\Phi rd + wsl.\Phi rq + Vrd \\ \frac{d\Phi r\,d}{dt} = \frac{M}{Tr}.Isq - wsl.\Phi rd - \frac{1}{Tr}.\Phi rq + Vrq \end{cases} \qquad \text{(III.36)}$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{-3}{2}P\frac{M}{J.Ls}(\Phi rd.Isq - \Phi rq.Isd) - \frac{Cr}{J} - \frac{fr}{J}\Omega \qquad \text{(III.37)}$$

$$\text{Ce} = \frac{-3}{2}P\frac{M}{Ls}(\Phi rd.Isq - \Phi rq.Isd) \qquad \text{(III.38)}$$

Les équations (III.35), (III.36), (III.37) et (III.38) peuvent être mises sous un schéma fonctionnel SIMULINK représenté dans la figure (III.10)

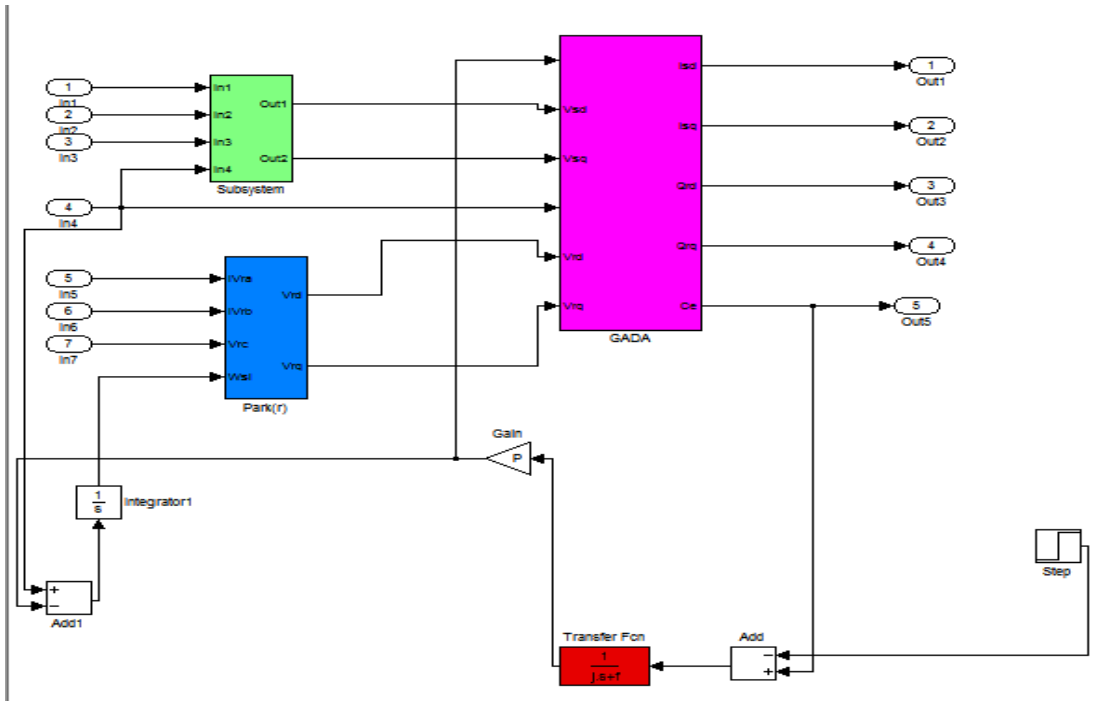

Figure.III.10 : Schéma de la MADA en modèle SIMULINK

III.4.Modélisation de l'onduleur deux niveaux

Les tension composées Vab,Vbc,Vca, sont obtenues à partir de ces relations

$$\begin{cases} \mathrm{Vab} = \mathrm{Vao} + \mathrm{Vob} = \mathrm{Vao} - \mathrm{Vbo} \\ \mathrm{Vbc} = \mathrm{Vbo} + \mathrm{Voc} = \mathrm{Vbo} - \mathrm{Vco} \\ Vca = Vco + Voa = Vco - Vao \end{cases} \qquad \text{(III.39)}$$

Vao, Vbo, Vco sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tension continues.

Elles sont référencées par rapport à un pont milieu « o »d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles comme suites :

$$\begin{cases} \mathrm{Vao} = \mathrm{Van} + \mathrm{Vno} \\ \mathrm{Vbo} = \mathrm{Vbn} + \mathrm{Vno} \\ Vco = Vcn + Vno \end{cases} \qquad \text{(III.40)}$$

Van, Vbn et Vcn, sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

Vno est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o »

Du système [Van, Vbn, Vcn,] équilibré découle la relation suivante :

Van +Vbn +Vcn=0 (III.41)

La substitution de (II.25) en (II.26) aboutit à :

Vno= (Vao +Vbo +Vco) (III.42)

En remplaçant(II.27) dans (II.25) ; on obtient :

$$\begin{cases} \mathrm{Van} = \frac{2}{3}\mathrm{Vao} - \frac{1}{3}\mathrm{Vbo} - \frac{1}{3}\mathrm{Vco} \\ \mathrm{Vbn} = -\frac{1}{3}\mathrm{Vao} + \frac{2}{3}\mathrm{Vbo} - \frac{1}{3}\mathrm{Vco} \\ \mathrm{Vcn} = -\frac{1}{3}\mathrm{Vao} - \frac{1}{3}\mathrm{Vbo} + \frac{2}{3}\mathrm{Vco} \end{cases} \quad \text{(III.43)}$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$[V_{AC}]=[T].\ [V_{dc}]$ (III.44)

Tel que:

$$\begin{cases} [Vac] = [Van, Vbn, Vcn]^T \\ [Vdc] = [Vao, Vbo, Vco]^T \\ [Vdc] = Udc[S1, S2, S3]^T \end{cases} \quad \text{(III.45)}$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.[14]

Commutation supposée idéale : Si = (1 ou 0) {i=1, 2,3}.

La matrice de transfert est la suivante :

$$[\mathrm{T}]=\begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad \text{(III.46)}$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion)

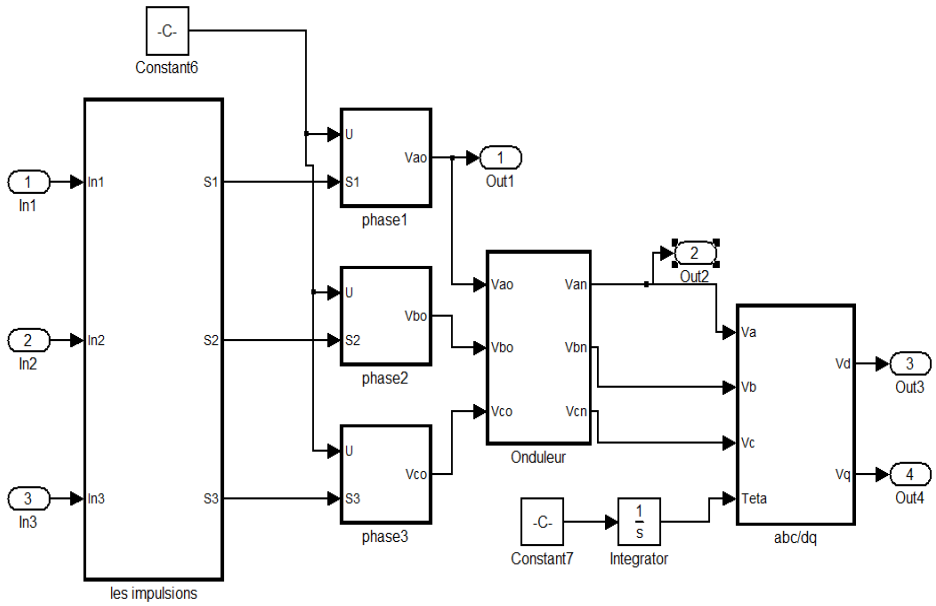

Figure.III.11 : Schéma bloc de l'onduleur à 2 niveaux

III.5 Modélisation de l'onduleur trois-niveau

La figure (III.11) montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à Structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (III.43) [14].

$$\begin{cases} Fk1 = 1 - Fk4 \\ Fk2 = 1 - Fk3 \end{cases} \qquad \text{(III.47)}$$

Avec: k = 1, 2 ou 3, représente le numéro du bras.

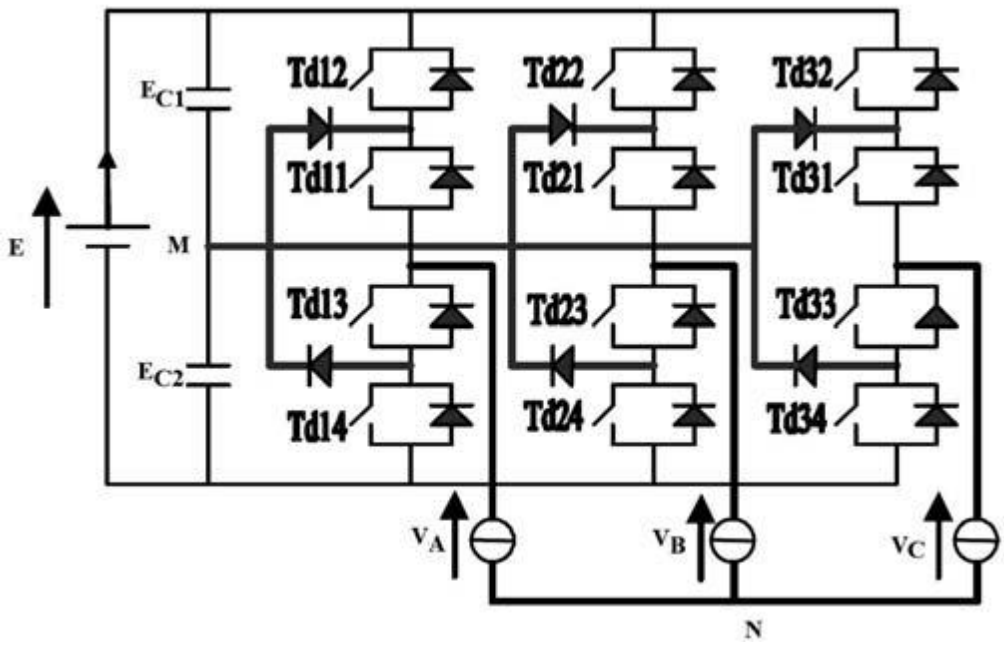

Figure .III.11 : Onduleur à trois niveaux à structure NPC [14]

On définit la fonction de connexion F^b_{KM} du demi-bras comme suit :

$$F_{k1}^{b} = F_{k1} \times F_{k2}$$

$$F_{k0}^{b} = F_{k3} \times F_{k4} \qquad \text{(III.48)}$$

On désigne par: m = 1: le demi-bras du haut et m = 0 : le demi-bras du bas. Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$V_{AM} = F_{11}^{b} \times U_{C1} - F_{10}^{b} \times U_{C2}$$

$$V_{BM} = F_{21}^{b} \times U_{C1} - F_{20}^{b} \times U_{C2} \qquad \text{(III.49)}$$

$$V_{CM} = F_{31}^{b} \times U_{C1} - F30b \times U_{C2}$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F11b \\ F21b \\ F31b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F10b \\ F20b \\ F30b \end{bmatrix} U_{C2} \qquad \text{(III.50)}$$

III.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier et de modéliser les composants d'un système éolien qui donnent le comportement de ces composants.

Dans ce chapitre la modélisation de l'ensemble composé de : turbine, génératrice asynchrone à double alimentation, l'onduleur multi-niveaux avec la commande MLI a été présenté. Nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. De même, nous avons étudié le modèle de la machine à l'aide de ses équations électriques et de flux dans le système d'axe dq.

D'un point de vue commande, il est clair que ce modèle présente une certaine difficulté et complexité à cause du couplage existant entre les différentes grandeurs de la machine. Pour le rendre simple, nous avons choisi la commande vectorielle en puissance active et réactive qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Commande ET simulation

IV.1 Introduction

La réalisation de chaque système dans le domaine de la production ou la distribution de l'énergie électrique prend des risques. C'est pour ça que toutes les manipulations pratiques sont prévenues par une simulation des paramètres à partir des logiciels. Dans ce chapitre, on va essayer de simuler les différentes composantes de notre système éolien avec le logiciel Matlab/Simulink.

Les techniques de régulation classique PI utilisées dans la commande vectorielle ont apporté une stabilité remarquable de réglage, mais il reste à signaler que ces régulateurs sont calculés pour imposer en boucle fermée une réponse du deuxième ordre.

IV.2 Généralité sur la commande vectorielle

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit[38].

IV.3 Principe de la commande vectorielle

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

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

Généralement ces techniques se diffèrent selon :

- ✓ la source d'énergie : commande en tension ou en courant,
- ✓ l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statorique ou rotorique ou d'entrefer, le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation [3].

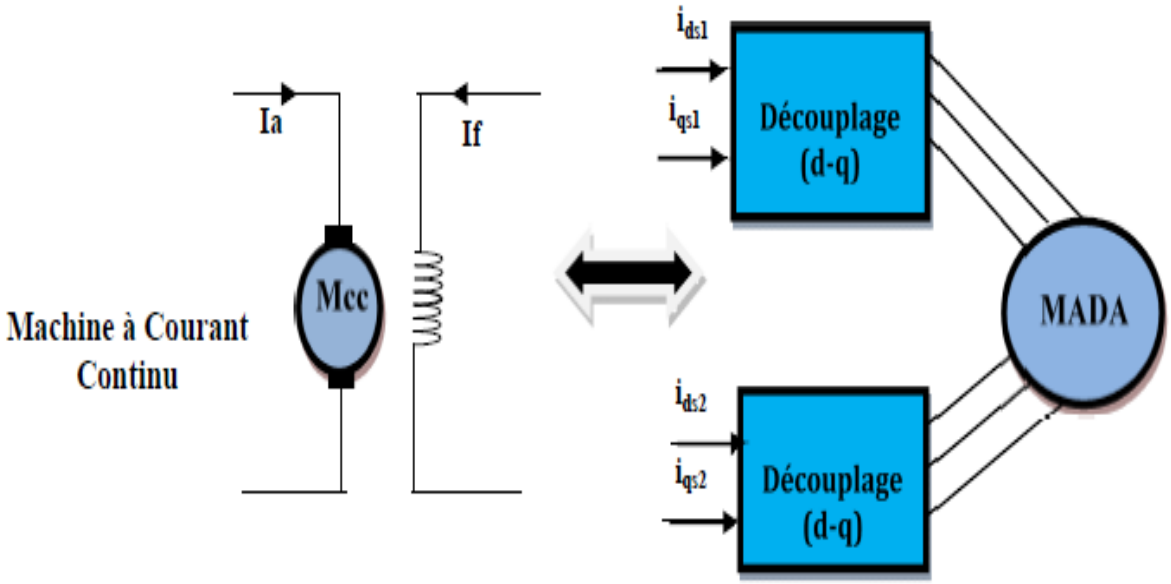

Figure IV.1 : Principe de la commande vectorielle [3].

IV.4 Modèle de la GADA en vue d'un réglage indépendant des puissances active et réactive

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, aux puissances actives et réactives statoriques[3].

IV.4.1. Choix de référentiel pour le modèle diphasé

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère d,q afin que l'axe d soit aligné sur le flux statoriques φs.

Ainsi :

$$\varphi ds = \varphi s \text{ et } \varphi qs = 0 \qquad (IV.1)$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des flux

et courants du stator comme suit :

$$\begin{cases} \varphi ds = \varphi s = Ls\, isd + Lm\, ird \\ \varphi qs = 0 = Ls\, iqs + Lm\, iqr \end{cases} \quad (IV.2)$$

$$\begin{cases} ids = -\frac{Lm}{Ls} idr + \frac{1}{Ls} \varphi s \\ iqs = -\frac{Lm}{Ls} iqr \end{cases} \quad (IV.3)$$

L'équation du couple électromagnétique devient comme suite :

$$Cem = P_1.\varphi s.ids + P_2\,(\varphi ds.iqs - \varphi qs.ids) \quad (IV.4)$$

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à[3] :

$$Vds = 0 \quad (IV.5)$$

$$Vqs = Ws.\varphi s \quad (IV.6)$$

La Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} Ps = Vds.Ids + Vqs.Iqs \\ Qs = Vqs.Ids - Vds.Iqs \end{cases} \quad (IV.7)$$

Ainsi que, les puissances actives et réactives rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} Pr = Vdr.Idr + Vqr.Iqr \\ Qr = Vqr.Idr - Vdr.Iqr \end{cases} \quad (IV.8)$$

Après l'application de l'équation (IV.4), en obtient :

$$\begin{cases} Ps = Vqs.Iqs \\ Qs = Vqs.Ids \end{cases} \quad (IV.9)$$

La relation entre le courant statorique et le courant rotorique donnée par :

$$\begin{cases} Ids = \frac{-Lm}{Ls}.Idr + \frac{Vqs}{Ls.Ws} \\ Iqs = \frac{-Lm}{Ls}.Iqr \end{cases} \quad \text{(IV.10)}$$

En remplaçant Ids et Iqs par leur expressions(IV.10), nous obtenons les puissances actives et réactive :

$$\begin{cases} P = -Vs.\frac{M}{Ls}.Idr \\ Q = \frac{Vs.\varphi s}{Ls} - Vs.\frac{M}{Ls}.Idr \end{cases} \quad \text{(IV.11)}$$

A partir du système d'équation (IV.12), en trouve les expressions des flux rotoriques comme suite :

$$\begin{cases} \varphi rd = (Lr - \frac{M2}{Ls}).Idr + \frac{Vs.M}{Ws.Ls} \\ \varphi rq = (Lr - \frac{M2}{Ls}).Idr \end{cases} \quad \text{(IV.12)}$$

La Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

$$\begin{cases} Vdr = Rr.Idr + \left(Lr - \frac{M2}{Ls}\right).\frac{d\,Idr}{dt} - g.Ws.\left(Lr - \frac{M2}{Ls}\right).Iqr \\ Vqr = Rr.Iqr + \left(Lr - \frac{M2}{Ls}\right).\frac{d\,Iqr}{dt} + g.Ws.\left(Lr - \frac{M2}{Ls}\right).Idr + g.\frac{Vs.M}{Ls} \end{cases} \quad \text{(IV.13)}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, on établit les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de reproduire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation figure(IV.2) qui sera le bloc à réguler par la suite[39].

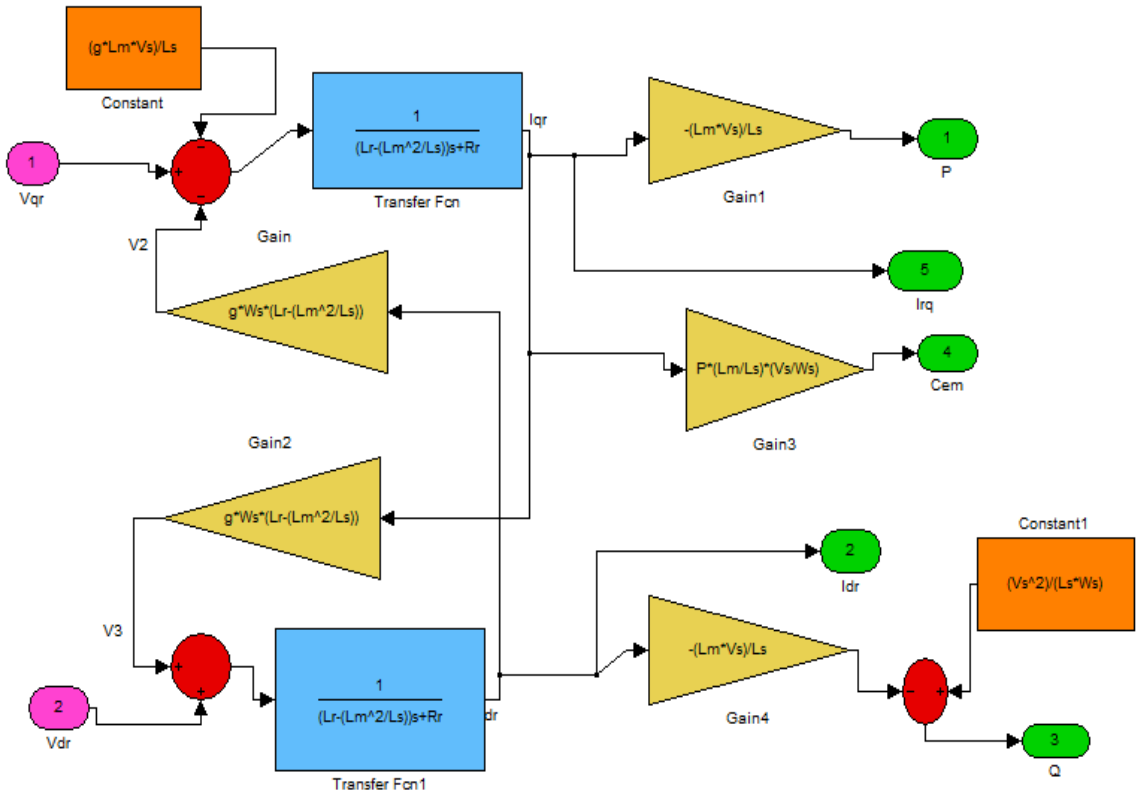

Figure IV.2 : Schéma bloc de la Commande Vectorielle

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

IV.5 Commande directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module de flux et de sa phase et celle-ci doit être vérifiée quel que soit le régime transitoire effectué. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du système. Une première possibilité est de mettre des capteurs de flux dans l'entrefer et de mesurer directement les composantes Φsd et Φsq de manière à en déduire l'amplitude et la phase, les capteurs mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sèvres dues aux vibrations et aux échauffements; les signaux captés sont entachés d'harmoniques d'encoche et leur fréquence varie avec la vitesse ceci nécessite des filtres ajustables. La précision

de la définition des flux dépend des paramètres inductifs affectés par la saturation du circuit magnétique **[3].**

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [39].

IV.6 .Calcul des régulateurs

Le schéma de la figure (IV.3) montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $\mathbf{k_p}+\frac{\boldsymbol{Ki}}{\boldsymbol{p}}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure(IV.3).

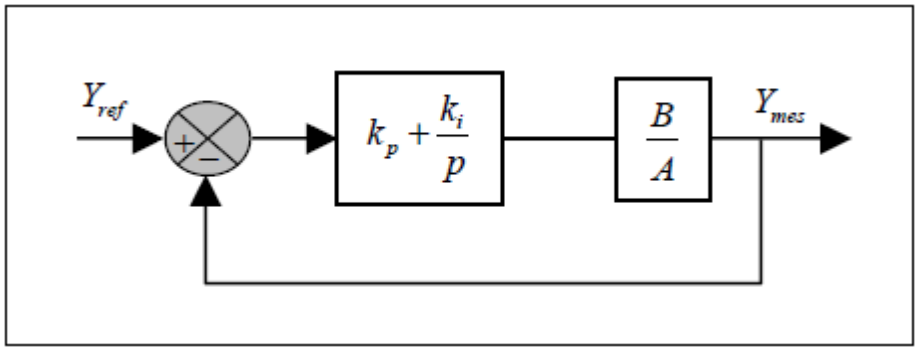

Figure IV.3 : Schéma bloc de régulateur PI[39]

$$\text{FTBO}=\frac{\text{P}+\frac{Ki}{Kp}}{\frac{P}{Kp}}\cdot\frac{\frac{M.Vs}{Ls(Lr-\frac{M2}{Ls})}}{P+\frac{Ls.Rs}{Ls(-\frac{M2}{Ls})}} \qquad \text{(IV.14)}$$

$$FTBO=\frac{\text{Kp}.\frac{M.Vs}{Ls(Lr-\frac{M2}{Ls}}}{P} \qquad \text{(IV.15)}$$

$$\frac{Ki}{Kp}=\frac{Ls.Rr}{Ls(Lr-\frac{M2}{Ls})} \qquad \text{(IV.16)}$$

$$\text{FTBF}=\frac{1}{1+P\tau r} \qquad \text{avec } \tau r=\frac{1}{Kp}\frac{Ls(Lr-\frac{M2}{Ls})}{M.Vs} \qquad \text{(IV.17)}$$

$$K_p = \frac{1}{0.001}\frac{LsLr-M2}{M.Vs} = 0*4.0808.10^{-4}\ s^{-1} \qquad (IV.18)$$

$$K_i = \frac{1}{0.001}\frac{Ls-Rr}{M.Vs} = -0.4\ S^{-1}$$

IV.7 Résultats de Simulation du système sans onduleur

Le teste de performance de la chaine éolienne sans onduleur est fait en considérant un vent de vitesse variable. La génératrice étant raccordée à un réseau d'une tension nominale efficace de 398V et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de la chaine éolienne sans onduleur sont représentés sur les figures ci dessous.

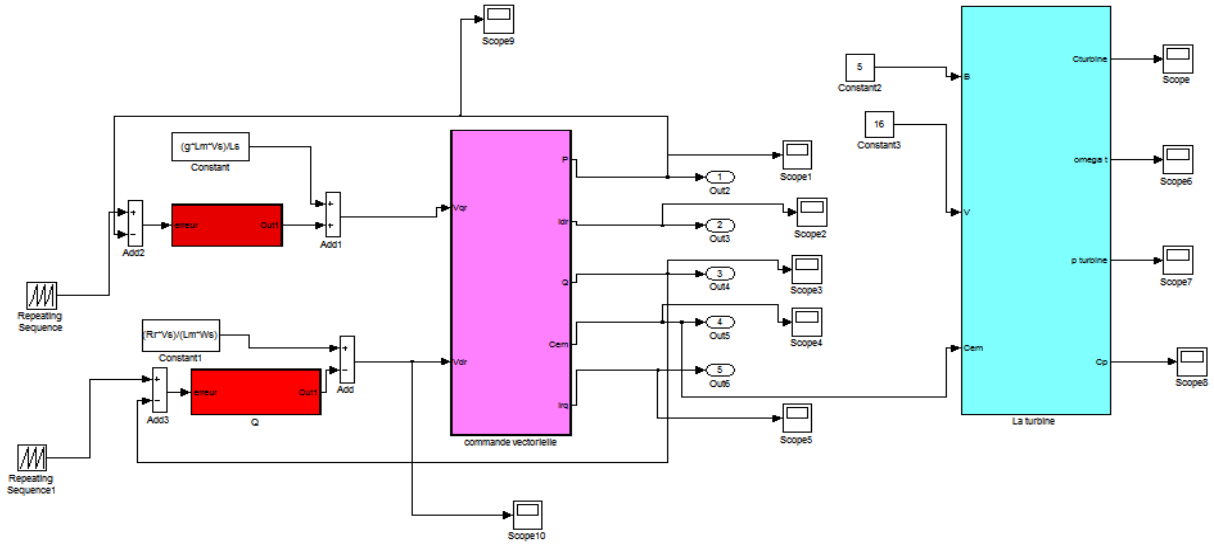

Figure IV.3 : Schéma bloc de système sans onduleur

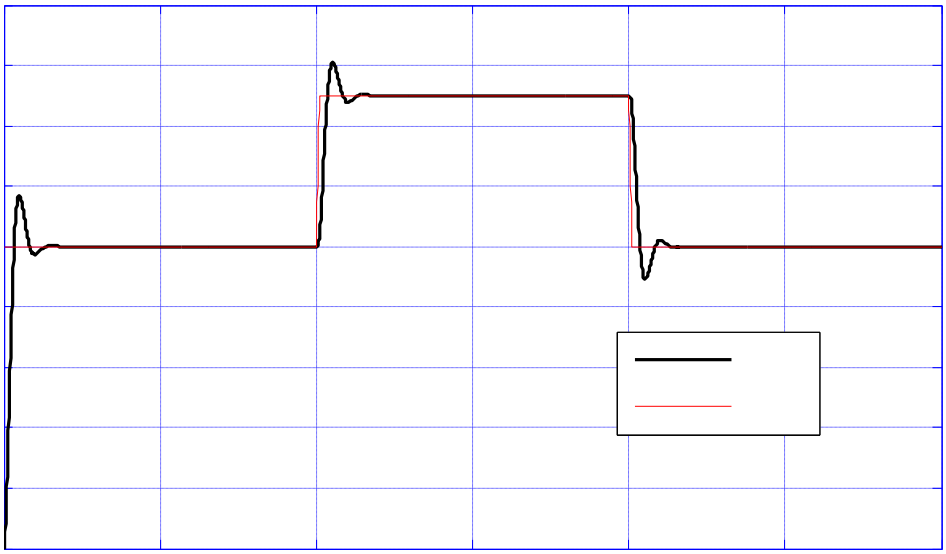

Figure IV.4 : La puissance Active sans onduleur

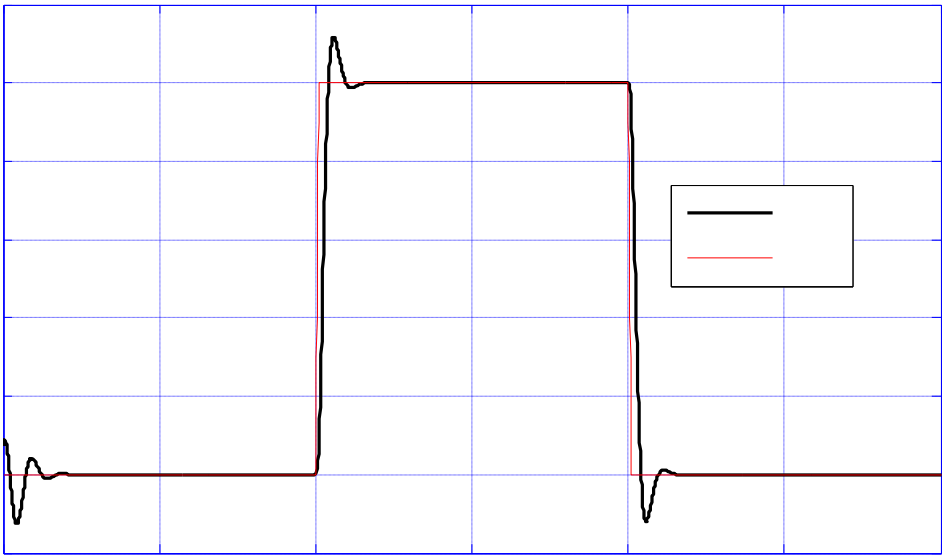

Figure IV.5: La puissance réactive sans onduleur

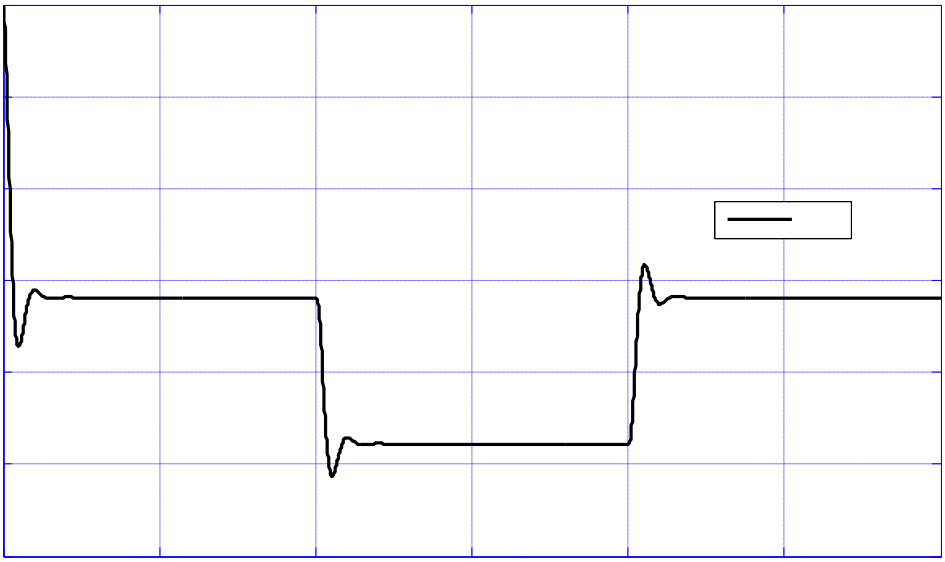

Figure. IV.6: Couple électromagnétique sans onduleur

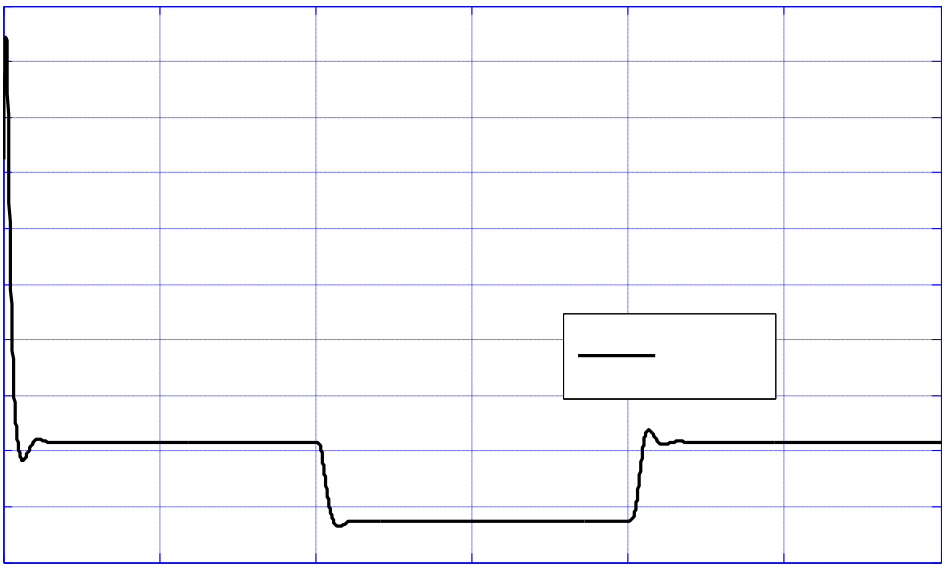

Figure. IV.7: Couple de la turbine sans onduleur

Interprétation des résultats

Les résultats de simulations sont effectués sans onduleur. La consigne de puissance active est fonction de la vitesse du vent (déterminée à partir de la puissance de la turbine). Quand la consigne de puissance réactive est maintenue à zéro cela permet de garder le facteur de puissance unitaire côté stator. On remarque que les puissances actives et réactives suivent parfaitement la consigne en régime permanent et avec une bonne dynamique au régime transitoire

IV.8. Simulation de système complète avec onduleur deux niveaux

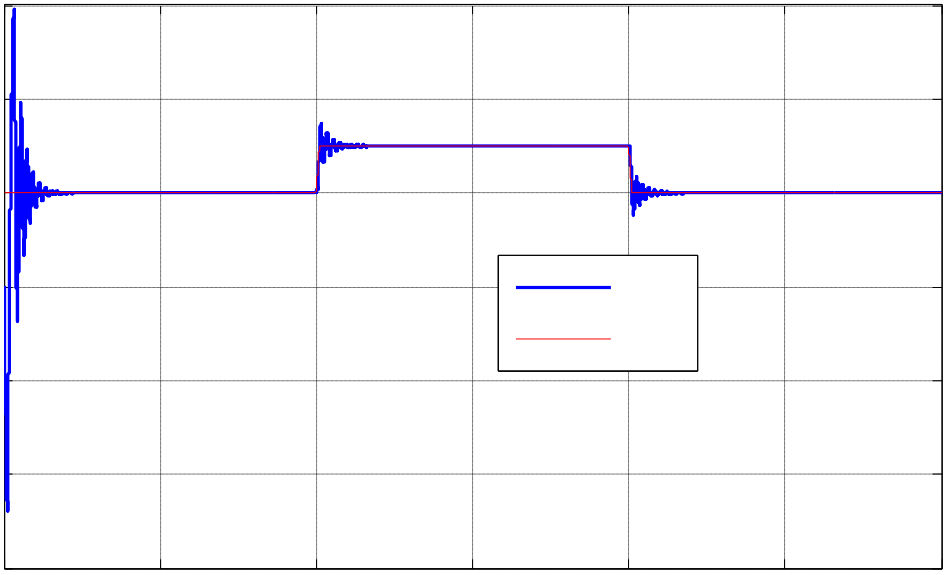

Figure .IV.8. Puissance active avec onduleur à 2 niveaux

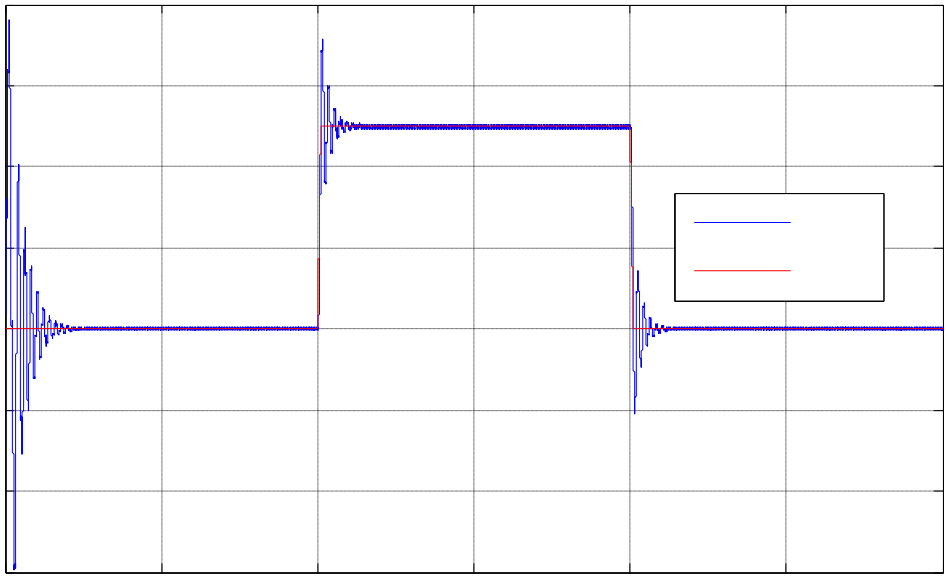

Figure .IV.9: Puissance réactive avec onduleur à 2 niveaux

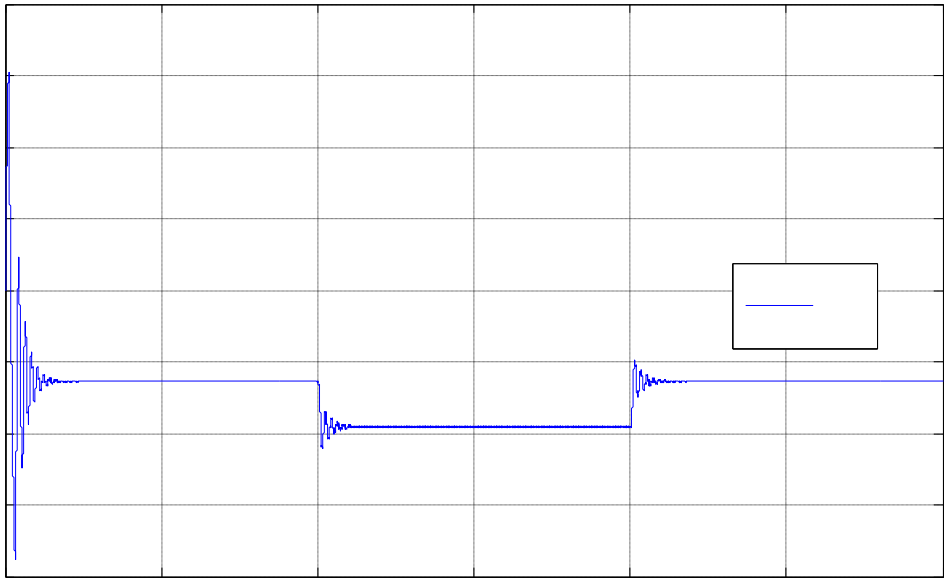

Figure .IV.10: Couple électromagnétique avec onduleur à 2 niveaux

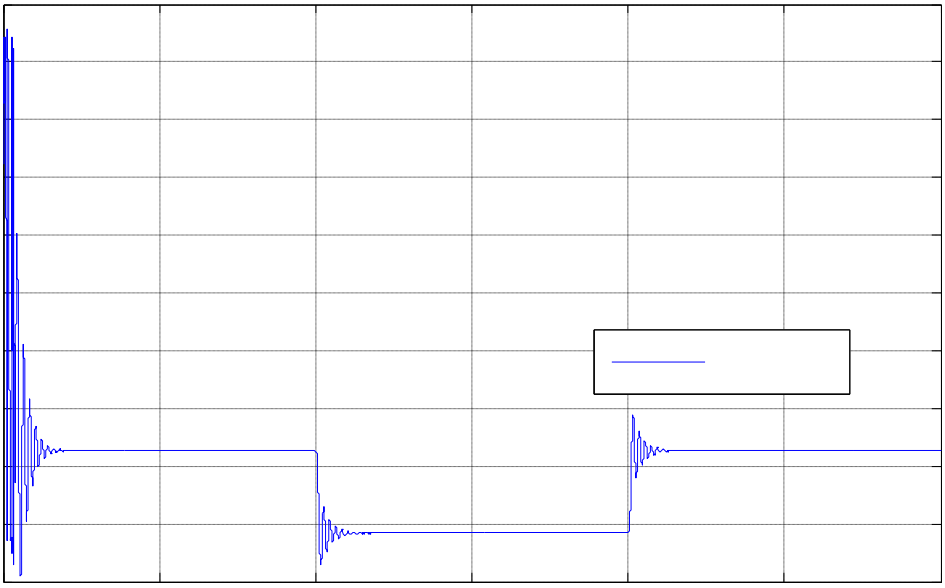

Figure .IV.11: Couple de la turbine avec onduleur à 2 niveaux

Interprétation des résultats

A partir de ces résultats on remarque que le signal de puissance active et réactive est suivi la forme de la signale de référence Les ondulation qu'on remarque sont dues aux commutations des interrupteurs de l'onduleur.

IV.9 Simulation de système complète avec onduleur trois niveaux

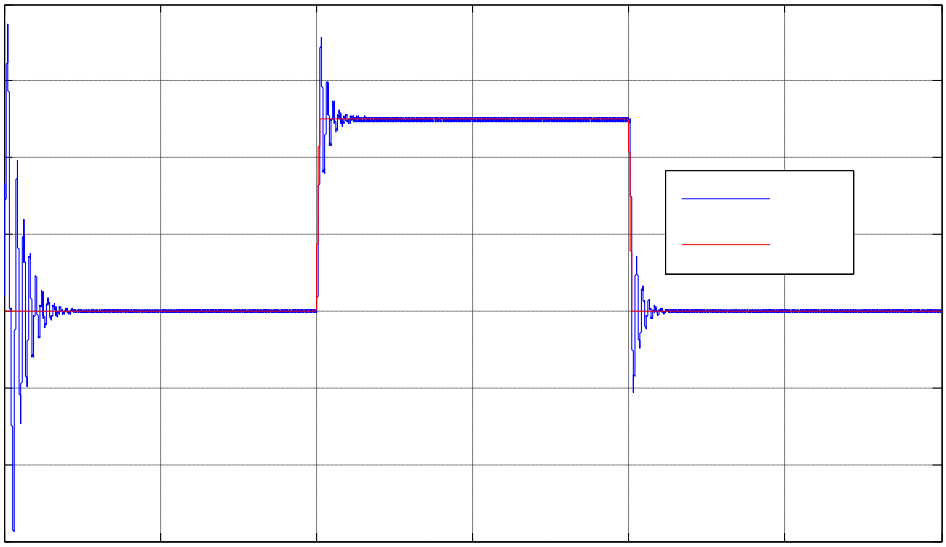

Figure. IV.13 : Puissance réactive avec onduleur à 3 niveaux

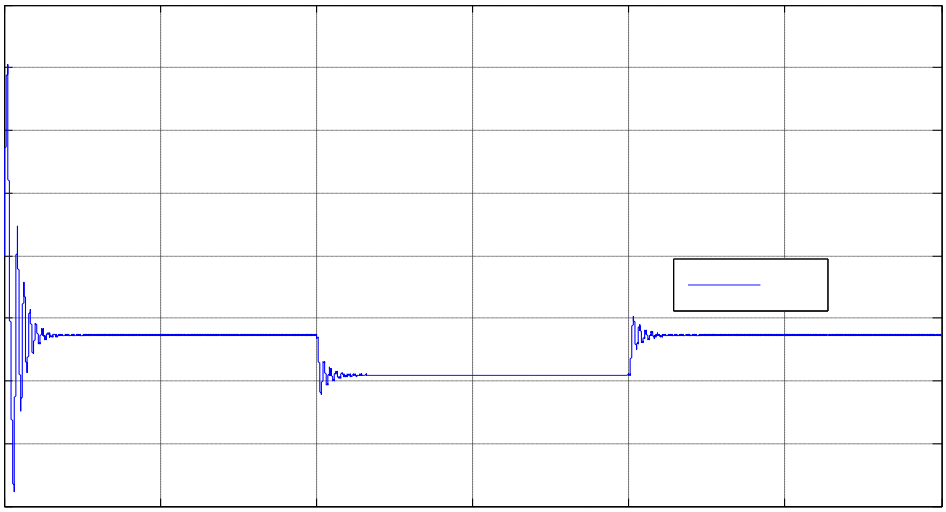

Figure .IV.14: Couple électromagnétique avec onduleur à 3 niveaux

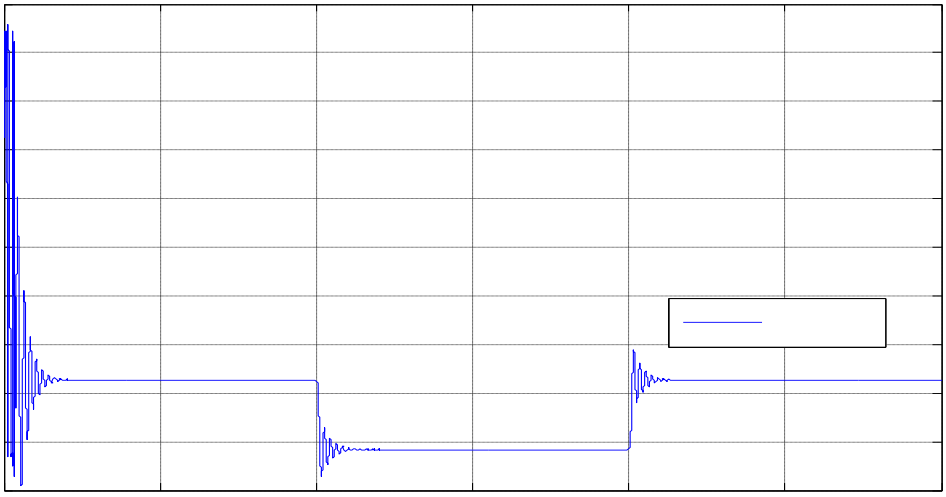

Figure IV.15: Couple de la turbine avec onduleur à 3 niveaux

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures président du système avec l'onduleur à trois niveaux montre que les résultats de simulation est approximativement comme les signaux de puissance active et réactive avec un onduleur à deux niveaux presque gardé la même forme de signale mais il' à une petite diminution de ondulation pendant le régime transitoire.

IV.10 Conclusion

Ce chapitre présente la simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne sur MATLAB SIMULINK. La simulation de système si on ajoute l'onduleur présent des ondulations par rapport le modèle sans onduleur à cause de la commutation d'interrupteurs

On remarque que les résultats du système complet avec un onduleur à trois niveaux donnée une bonne signale par rapport au système avec deux niveaux. Alors, a partir de cette expérience on peut dire que si on augmente le nombre de niveaux d'un onduleur on obtient une qualité des signaux meilleurs a cause de la minimisation des harmoniques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire on a étudiés et simulé sur Matlab Simulink un système de conversion d'énergie basé sur l'énergie du vent pour l'obtenir d'une énergie durable.

Ce système est basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production de l'électricité commandé par un onduleur multi-niveaux. On commence avec une étude théorique sur les énergies éolienne et nous exposons le principe de la conversion de l'énergie du vent a une énergie mécanique après a une énergie électrique. On choisi de travailler avec la commande vectorielle direct dans le but de commandé les puissances active et réactive.

On a exprimé les modèles de ce système par une simulation a partir d'un modèle mathématique, on a présenté le modèle de la turbine de la machine asynchrone à double alimentation et de l'onduleur, après on a fait une comparaison entre l'onduleur à deux niveaux et à trois niveaux.

On a remarqué que les résultats du système complet avec un onduleur à trois niveaux donnée un bon signal par rapport au système avec deux niveaux. Alors, a partir de cette expérience on peut dire que si on augmente le nombre de niveaux d'un onduleur on obtient une qualité des signaux meilleurs a cause de la minimisation des harmoniques.

Références bibliographiques

[1] N.Cherfia "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007.

[2] S.Hamacha "étude et commande d'une MSAP" mémoire Magister. Univ Tizi Ouzo Juin 2013

[3] M.K.Touati "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique" mémoire magister. Univ Batna. Janvier 2015

[4] T.Daoudi "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'un Générateur asynchrone thème magister. Univ 2017

[5] R.Radjem "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne" thème magister. Univ. Constantine 07/2009.

[6] S.El Aimani "modélisation de déférentes technologies d'éolienne intégré dans un réseau de moyen tension" thèse doctorat. Ecole centrale de Lille .Décembre 2004.

[7] F.Poitiére" Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone _a cage autonome - Machine asynchrone _a double alimentation reliée au réseau" thèse doctorat Juin 2006

[8] A.BenAmar "Etude de la commande d'un système éolienne base sur une GADA" mémoire magister. Univ Batna. Avril 2016.

[9] F.Kendouli " Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique" thèse Doctorat. Univ. Constantine.2012

[10] M.Adjoudj "commande d'une machine asynchrone à double alimentation" thèse Doctorat.Univ Sidi Bel Abbas

[11] Y.Djeriri "commande vectorielle d'une MADA intégré à un système éolienne" mémoire magister. Univ. Sidi Bel Abbas

[12] S.Mokrane " Modélisation et commande d'un aérogénérateur à MADA en vue de simulation des problèmes de cogénération "thèse Doctorat .Univ. Québec. Aout.2013

[13]K. Mankour N. Bentadj" Etude et Simulation d'un Système de Conversion d'Énergie Éolienne basée sur une GADA" mémoire master.Univ.Saida. juin 2015

[14] E.Elmodjebber "modélisation et commande de la MADA dans l'utilisation dans la production dans l'énergie éolienne" mémoire. Master.Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah. Juin 2013

[15]Http**:**//www.ewea.org."Wind Energy. European Wind Energy Association"

[16] AKKARI NADIA. "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine" Thèse de DOCTORAT de l'université de Batna, 02 /06/ 2010

[17] Y.Diaf. D.BenAnter "modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par MLI à structure multi niveaux mémoire. Master. Univ.ouargla. Juin.2012

[18] H.Bareau « Dans l'air du temps l'énergie éolienne » guide document Décembre 2011

[19] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.

[20] T.Senjyu, N.Nakasone, A Yona, A.Saber, T.Funabashi, H.Sekine, « operation strategies for stability of gearless winde power generation systems », 2008

[21] A.Belguidom « les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides », Mémoire de Magister,Université Mouhamed kider-Biskra

[22] C.benoudjit "étude pour a conception d'un banc d'essais pour énergie Renouvelable", Mémoire magister juin 2004.

[23] M.Lefir « les éoliennes », Document, 2013

[24] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne"**,** thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy. 11/12/2006.

[25] 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.

[26] O.Bouhali « Constribution des convertisseurs Multi niveaux au raccordement de la production d'orgaine éolienne sur un Résau Electrique »,Thése Doctorat,Ecoole Nationale polytechnique Ecole centrale de Lille

[27] H.Brighen,S.Halaimia, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi niveaux par **MLI sinusoidale** »,Mémoire de Master,Université Larbi Tebssi-Tebessa, 2016

[28] S.Gana,S.Elanany, « Contrôle robuste d'un statcom à base des onduleurs Multi niveaux »,Mémoire de Master,Centre Univercitaire Belhaj Bouchib d'ain-Temouchent,2017

[29]A.BOUZID « commandé par la Stratégied'Éliminationd'Harmonique « SHE » » Mémoire de Magister École Normale Supérieurs d'Enseignement Technique-ORAN-,2010

[30] https://www.scribd.com/doc/31140407/Onduleur-a-MLI, May 25, 2018,

[31] F.Berrezk « Etude des différents Techniques de commande des onduleurs à MLI Associés à une machine asynchrone » Mémoire de Magiter , Univercité BADJI MOKHTAR-ANNABA,2006

[32] Muhammad H .Rashid« Power Electronics » Circuits, Devices, and applications Second édition - prentice HAll

[33] F Brichant« Électronique de puissance » Agence parisienne des distributions.

[34] B.Mamadou « Etude d'un compensateur statique pour éolienne à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage » mémoire,l 'université du québec à trois-Riviéses,2010

[35] M.T « Application des onduleurs Multi-niveaux dans les systemes de chaufage par induction » mémoire Magister,Université de Batna, 2012

[36] M.Hassani, K.Benchaib « Etude d'un système de production d'énergie éolienne »mémoire de master, Centre universitaire d'Ain –Temouchent, 2016

[37] B.Kelkoul « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister,univercité de Tlemcen,2011

[38] A.BenAon « Commande directe des puissances d'une machine asynchrone à double Alimentation intégré dans un systéme éolienne connecté au réseau » Mémoire de Magiter, Univercité d'ELouad, 2013

[39] M.Adoudj « commande d'une machine asynchrone à double alimentation » Thése Doctorat, Univercité DJiualiliales de sidi-Bel-Abbes

Annexes

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique des paramètres
Puissance nominale P	1.5 MW
Rayon de l'éolienne R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Tension nominale statorique V	398 / 690 V
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Tension nominale rotorique V	225 / 389 V
Fréquence nominale rotorique f2	14 Hz
Résistance statorique Rs	0.012 W
Résistance rotorique Rr	0.021W
Inductance statorique Ls	0.0137 H
Inductance rotorique Lr	0.0136 H
Inductance mutuelle M	0.0135 H
Inertie de l'arbre J	1000 kg.m2
Coefficient de frottement visqueux de la MADA fr	0.0024 N.m.s-1
Glissement g	0.03
Nombre de paires de pôles p	2

Résumé:

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude d'une commande éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi niveau. 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). Le deuxième chapitre été consacré à l'onduleur, leur principe de fonctionnement et leur classification; nous avons également exposé les onduleurs multi-niveaux leur topologies et leur déférents types de commande et on a insisté sur la technologie de commande MLI. La modalisation de la partie mécanique, la partie de conversion électromécanique et de l'onduleur MLI est détaillé dans le troisième chapitre. Dans le quatrième chapitre nous avons présentées la commande vectorielle 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. 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 modeling of mechanical part of the wind system and the asynchronous generator with double power is detailed in the third chapter. In the second chapter, the multilevel inverters to their topologies and their different types of control and insisted on the PWM command is presented. The fourth chapter is interested in direct vector control (DVC). 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)

تهدف هده المذكرة إلى دراسة التحكم بالعنفات الهوائية بواسطة مولد لا تزامني ثنائي التغذية اعتمادا على مموج متعدد المستويات. الفصل الأول يشرح عموميات حول طاقة الهواء ومصادرها أنواع العنفات ومكوناتها الأساسية و الفصل الثاني يعرض طريقة عمل المموج متعدد المستويات و أنواعه المختلفة والتكنولوجية المتعمد عليها في التحكم .أما الفصل الثالث فيتضمن نمدجة الجزأين الميكانيكي و جزء التحويل الالكتروميكانيكي كما نمدجة المموج الكهربائي .أخيرا الفصل الرابع يوضح ماهية التحكم ألشعاعي المباشر كما يحتوي على المحاكاة العامة لقناة التحويل الكهربائي.

الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح ، عنفه الكهربائية ، المولد لاتزامني ثنائي التغذية ، عاكس متعدد المستويات ، التحكم ألشعاعي المباشر المحاكاة.