



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane Mira - Bejaia

Faculté de Technologie

Département Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique

Option : Electromécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master en électromécanique

Thème :

***Commande d'une Génératrice
asynchrone dans un système de
conversion éolien***

Réalisé par :

Mr : Mammeri Mokhtar

Mansouri Rabah

Encadré par : M^{me}, Abdelli Radia



REMERCIEMENTS

REMERCIEMENT

*Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et
d'exprimer notre gratitude envers le Bon
Dieu, qui nous a donné la patience et le courage
pour que nous puissions achever ce travail.*

*Nous tenons à adresser nos sincères et respectueux
remerciements à notre promotrice,*

*Madame R. Abdelli pour sa disponibilité, son
dévouement, et ses orientations qui nous ont permit
d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de
ce travail.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent aux membres
du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

DEDICACES

Dédicace

- ♥ *A la mémoire de mon père (Que dieu l'accueille dans son vaste paradis), et a ma mère qui ma toujours soutenu durant toute ma formation et à qui je dois rendre mes meilleurs respects et mes sincères reconnaissances.*
- ♥ *A la mémoire de ma grand-mère (Que dieu l'accueillera dans son vaste paradis).*
- ♥ *A ma fiancée LAMIA qui me soutient toujours.*
- ♥ *A mes frères est sœurs qui n'ont pas cessé de me soutenir tout le long de ma vie estudiantine.*
- ♥ *A mes nièces et neveux que j'aime beaucoup.*
- ♥ *A toute ma famille, que dieu la protège*
- ♥ *A mes amis Soufiane ,mokhtar, Nadjim, Brahim,karim, M.nassim, Lyes, Mohamed, Z.nassim ,Moustapha,.....*
- ♥ *A tous mes collègues de la promotion 2012*
- ♥ *A tous ceux qui sont pour l'électrotechnique.*

Je dédis ce travail

Mansouri Rabah

DEDICACE

*Je dédie Mon Travail avant tout A mes Chers
Parents, qui m'encourage, Et qui mon toujours
soutenu, « Que Dieux me les protègent ».*

*À Mes chers Frères >>mourad,karim,djamel,et
a mes Sœurs wahiba,sara,chaima.>>*

A tout la famille MAMMERI

A tous ceux qui me sont cher

Et a tout mes amis

MOKHTAR

SOMMAIRE

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

Chapitre I

I.1. Introduction.....	3
I.2. L'énergie éolienne.....	4
I.2.1. Définition d'un aérogénérateur.....	4
I.2.2. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur.....	4
I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I.3.1. Avantages.....	5
I.3.2. Inconvénients.....	5
I.4. Constitution d'un aérogénérateur.....	6
I.5. Différents types aérogénérateur.....	7
I.5.1. Type du capteur.....	8
I.5.1.1. Aérogénérateur à axe vertical.....	8
I.5.1.2. aérogénérateur à axe horizontal.....	10
I.5.2. Le mode de régulation.....	11
I.5.3. La nature de l'accouplement mécanique.....	11
I.6. Notions théoriques sur l'éolien.....	12
I.6.1. limite de Betz.....	12
I. 6.2. Le coefficient de puissance.....	12
I. 6.3. Le rapport de la vitesse au bout des pales λ	13
I.6.4. Coefficient de couple.....	13
I.7. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	15
I.8. Machines électriques utilisées dans les systèmes de conversion.....	15
I.8.1. Générateur synchrone.....	16
I.8.2. Générateur asynchrone.....	16
I.8.2.1. Machines asynchrones à cage.....	17
I.8.2.2. Machine asynchrone à rotor bobiné.....	17
I.8.2.3 Machine asynchrone à double alimentation.....	18
I.9. Les techniques de contrôle.....	18

I.10. Conclusion	18
------------------------	----

Chapitre II

II.1.Introduction.....	19
II.2. Modélisation de la partie mécanique.....	19
II.2.1. Modèle du vent.....	20
II.2.2. Modèle de la turbine.....	20
II.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse.....	22
II.2.4. Equation dynamique de l'arbre	23
II. 2.5. Maximisation de la puissance.....	25
II.3. Modélisation de la machine asynchrone (MAS)	26
II.3.1. Description de la MAS	26
II.3.2. Description d'une machine asynchrone à cage	26
II.3. 3. Principe de fonctionnement.....	27
II.3.4. Hypothèses simplificatrices.....	27
II.3.5. Equations générales de la machine asynchrone	27
II.3.6. Modèle de la machine dans le repère de Park	39
II.3.7. Choix du repère (dq).....	31
II.3.8. Equations de Puissance et de Couple	32
II.4. Modélisation du système de puissance (Redresseur, onduleur).....	33
II.4.1. Le redresseur MLI	34
II. 4.2. Le bus continu	34
II.4.3. L'onduleur MLI.....	35
II. 5. Modélisation de la liaison au réseau.....	36
II. 5.1. Modélisation du filtre	36
II. 5.2. Modélisation du transformateur	37
II.6.Conclusion	37

Chapitre III

III.1. Introduction	38
---------------------------	----

III.2. Commande vectorielle.....	38
III.3. Types de commande vectorielle.....	38
III.3.1 .Commande vectorielle directe	39
III.3.2 .Commande vectorielle indirecte	39
III.4. Principe de la commande vectorielle	39
III.5. Orientation de flux.....	40
III.6.Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté.....	41
III.7. Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique	42
III.7.1. Estimation du flux rotorique	43
III.7.2. Estimation de la pulsation statorique	43
III.8.Structure de la commande vectorielle.....	43
III.9. Commande de convertisseur coté génératrice.....	44
III.9 .1 .Commande MLI.....	44
III.10. Commande de la liaison au réseau	46
III.10.1.Contrôle du bus continu	47
III.10.2.Contrôle de puissance	48
III.10.3.Contrôle des courants envoyés au réseau.....	49
III.10.4. Contrôle de l'onduleur	50
III.11. Conclusion.....	50
Chapitre IV	
IV.1.Résultats de simulation	51
IV.2.Conclusion.....	58
Références bibliographiques.....	59
Annexes.....	62

NOMENCLATURE

Notations

Indices

P_t	: Puissance de la turbine éolienne (W).
P_{mec}	: La puissance mécanique du rotor de la turbine (W).
ρ	: Masse volumique de l'air (kg/m^3).
S	: Surface circulaire balayée par la turbine (m^2).
R_t	: Rayon de la turbine éolienne (m).
V_v	: La vitesse du vent (m/s)
Ω_t	: Vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur (rad/s).
C_p	: Le coefficient de puissance.
C_c	: Le coefficient du couple.
λ	: Le rapport de la vitesse en bout des pales..
C_t	: Le couple développé par la turbine sous l'action du vent (N.m).
β	: L'angle de calage des pales (rad).
G	: Le gain du multiplicateur.
$\Omega_{m e c}$: La vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
C_g	: Le couple de la génératrice (N.m).
C_f	: Le couple issu du frottement (N.m).
f	: le coefficient de frottement visqueux.
C_{em}	: Couple électromagnétique du générateur (N.m).
J	: inertie totale de l'arbre de transmission.
J_t	: L'inertie de la génératrice.

J_g	: l'inertie de la turbine.
λ_{opt}	: Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales.
C_{p-max}	: Le coefficient de puissance maximale.
Ω_{t-opt}	: Vitesse de rotation optimale de la turbine avant le multiplicateur (rad/s).
C_{em-ref}	: Couple électromagnétique référentiel du générateur (N.m).
as, bs et cs	: axes statorique.
ar, br et cr	: axes rotorique.
$V_{s a} V_{s b} V_{s c}$: Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V).
$i_{s a} i_{s b} i_{s c}$: Courants statoriques (A).
R_s	: Résistance d'une phase statorique (Ohm).
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique (H).
ω_s	: Pulsation du champ statorique (rad/s).
$[V_{s a b c}]$: Matrice des tensions statorique (V).
$[i_{s a b c}]$: Matrice des courants statoriques.
$[\Phi_{s a b c}]$: Matrice des flux statoriques.
$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
$V_{s d} V_{s q}$: Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
$i_{s d} i_{s q}$: Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
$\Phi_{s d} \Phi_{s q}$: Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
θ_s	: Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
$[V_{s d q o}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Nomenclature

$[\dot{i}_{d \ q \ o}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[\Phi_{s \ d \ q \ o}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$v_{r \ a} v_{r \ b} v_{r \ c}$: Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).
$i_{r \ a} i_{r \ b} i_{r \ c}$: Courants rotoriques (A).
R_r	: Résistance d'une phase rotorique (Ohm).
L_r	: Inductance propre d'une phase rotorique (H).
ω_r	: Pulsation du champ rotorique (rad/s).
$[v_{r \ a \ b \ c}]$: Matrice des tensions rotoriques.
$[i_{r \ a \ b \ c}]$: Matrice des courants rotoriques.
$[\Phi_{r \ a \ b \ c}]$: Matrice des flux rotoriques.
$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.
$v_{r \ d} v_{r \ q}$: Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
$i_{r \ d} i_{r \ q}$: Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
$\Phi_{r \ d} \Phi_{r \ q}$: Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
θ_r	: Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
$[M]$: Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
M	: Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
ω	: Vitesse électrique de la machine (rad/s).
p	: Nombre de paires de pôles de la machine.
θ	: Angle électrique de position de la machine (rad).
Ω_m	: Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
ω_m	: la pulsation mécanique (rad/s).

Nomenclature

P_a	: La puissance active électrique fournie au réseau(W).
$Q_{r e a}$: La puissance réactive(VAR).
P_{em}	: La puissance électromagnétique(W).
v_a, v_b, v_c	: Tensions de référence (V).
i_a, i_b, i_c	: Courants de référence (A).
$i_{d c}$: Courant modulé par le redresseur (A).
S_a, S_b, S_c	: Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur de redresseur
$V_{d c}$: Tension du bus continu (V).
i_c	: Courant capacitif (A).
C	: Capacité du bus continu (F).
$V_{o n 1}, V_{o n 2}, V_{o n 3}$: Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
$i_{o n 1}, i_{o n 2}, i_{o n 3}$: Courants alternatifs de l'onduleur (A).
$i_{o n}$: Courant modulé par l'onduleur (A).
S_a', S_b', S_c'	: Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur de l'onduleur.
σ	: Le coefficient de dispersion.
T_r	: constante de temps rotorique (s)
s	: opérateur de Laplace.
m_r	: Indice de modulation de la MLI.
r	: taux de modulation de la MLI.
E_1, E_2, E_3	: Tensions du réseau (V).
$i_{r e s 1}, i_{r e s 2}, i_{r e s 3}$: Courants du réseau (A).
$R_{r e s}$: Résistance du réseau (Ohm).
$L_{r e s}$: Inductance du réseau (H).

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre : I

Figure. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie électrique.....	4
Figure .I.2 : Constitution d'une éolienne	6
Figure I.3 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs	8
Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical.....	9
Figure I.5 : Principe du rotor de Savonius	9
Figure I.6 : Principe du rotor de Darrieus	10
Figure I.7 : Aérogénérateur à axe horizontal	10
Figure I.8 : Variation de l'angle de calage d'une pale	11
Figure I. 9 : coefficients C_p et C_m en fonction du Rapport λ Dans le cas du rotor Savonius	14
Figure I.10 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	14
Figure I.11 Zone de fonctionnement d'une éolienne	15
Figure I.12 : Machine à induction à rotor bobiné.....	17

Chapitre : II

Figure II.1 : Générateur éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à cage.....	19
Figure II.2 : configuration d'une éolienne	20
Figure II.3 : Courbe $C_p(\lambda)$	21
Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine	22
Figure II.5 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.	23
Figure II.6 : Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique	24
Figure II.7 : schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.....	24
Figure II.8 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.	25
Figure II.9 : Les composants d'une machine asynchrone à cage.....	26
Figure II.10 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.....	28

Figure II.11 : Passage du triphasé au diphasé	30
Figure II.12 : Redresseur et onduleur MLI.	33
Figure II.13 : Redresseur MLI.....	34
Figure II.14 : Courant du bus continu.	35
Figure II.15 : Représentation schématique d'un onduleur MLI.....	35
Figure II.16 : Schéma électrique de la liaison réseau.....	36
Figure II.17 : le filtre.....	37

Chapitre : III

Figure III. 1: Schéma de Principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.....	45
Figure III.2. Principe de commande d'une MLI triangulo-sinusoidale	47
Figure III.3: Contrôle de la liaison réseau.....	48
Figure III.4 : Contrôle du bus continu.....	49
Figure III.5 : Contrôle de la puissance	50
Figure III.6 : Contrôle des courants.....	51

Chapitre : IV

Figure IV.1 : vitesse du vent (V_v).....	52
Figure IV.2 : Couple électromagnétique (C_{em}).....	52
Figure IV.3:Puissance mécanique (P_{mec})	53
Figure IV.4 : Flux rotorique	53
Figure IV.5 : les courants de référence ($I_{abc-ref}$).....	54
Figure IV.6 : Tension de bus continue (V_{dc}).....	55
Figure IV.7 : tension de phase (V_a)	56
Figure IV.8 : puissance active (P_a)	56
Figure IV.9 : Puissance réactive (Q).....	57
Figure IV.10 :Courant envoyé au réseau.....	58
Figure IV.11 : Facteur de puissance ($\cos\varphi$).....	58

INTRODUCTION
GENERALE

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations une forme d'énergie dont on ne peut se passer. Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue très importante [1]. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. [1]

De plus, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. [2]

Face à cette situation, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans dommages pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Dans le cas des éoliennes connectées au réseau, différentes machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique en tant que génératrice. Toutefois, pour des raisons de fiabilité, robustesse et prix de revient, la machine asynchrone à cage d'écureuil demeure largement répandue [3].

Introduction générale

Aujourd'hui, La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre qu'on s'intéressera à l'étude d'un système de conversion éolien avec une génératrice asynchrone est sa commande avec le contrôle vectoriel.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présenterons un état de l'art des solutions utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne et de quelques notions théoriques sur l'énergie produite par une éolienne connectée au réseau électrique à travers une interface d'électronique de puissance.

Le deuxième chapitre portera sur la modélisation analytique de la chaîne de production de l'énergie électrique. On commencera par la présentation de la turbine, l'étude de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park et on passera à la modélisation des convertisseurs de puissance, du bus continu et de la liaison au réseau.

Le troisième chapitre sera consacré à l'utilisation des modèles élaborés au chapitre II pour étudier la génératrice asynchrone ; et nous cadrerons notre travail de façon à répondre à l'objectif de la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone dans un système de conversion éolien.

Le quatrième chapitre comportera la présentation et l'interprétation des résultats de simulation numérique du modèle de la chaîne de conversion réalisée sous l'environnement Matlab /Simulink .

CHAPITRE I
SYSTEMES DE
CONVERSION DE
L'ENERGIE EOLIENNE

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, et le pétrole, pour la production d'une énergie électrique propre.

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ainsi que sa consommation connaît un essor considérable depuis quelques décennies. Cela est dû à l'industrialisation massive et à des contraintes d'ordre environnemental mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mises en œuvre pour assurer cette conversion.

Les prévisions liées aux besoins en énergie pour les années à venir qui ne font que confirmer, voir amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique de certaines zones

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel. [2]

Face à ces problèmes, certains pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. [1]

Dans ce chapitre, nous présentons les différents systèmes de conversion de l'énergie éolienne, leurs structures, leurs utilisations, et quelques notions théoriques qui les régissent.

I.2. L'énergie éolienne

I.2.1. Définition d'un aérogénérateur

L'éolienne est un dispositif de récupération ou/et de conversion d'une partie de l'énergie cinétique emmagasinée dans le vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [1].

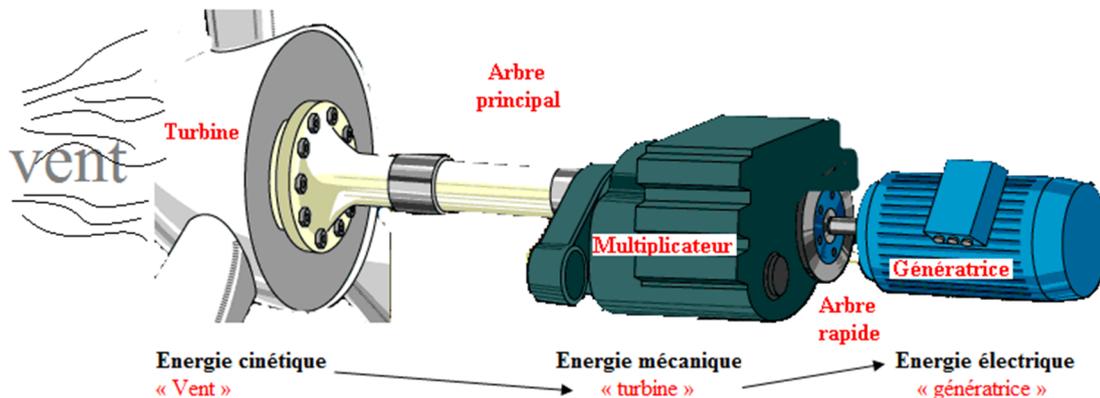


Figure. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie électrique

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement, c'est-à-dire le vent ; Ce dernier produit une considérable quantité d'énergie. Il est défini par sa direction et sa vitesse qui varie selon les zones géographiques et les saisons.

I.2.2. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

L'énergie cinétique contenue dans le vent est captée par les pales aérodynamiques de l'éolienne, qui sont soumises au dessus et en dessous à un système de pressions qui génère la rotation du rotor. Cette rotation crée une énergie mécanique qui est transmise à l'arbre de la génératrice afin de produire une électricité utilisable.

I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.3.1. Avantages [4] , [5]

Ecologiquement :

L'énergie éolienne est une énergie propre

- Aucune rejection de CO₂ ni d'aucun autre gaz polluant ou toxique.
- Renouvelable et abondante, issue d'un potentiel énorme et inépuisable. elle constitue une des énergies du futur.
- Contrairement au nucléaire, l'exploitation de l'énergie éolienne ne représente pas de risque.

Economiquement :

- les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés et non raccordés au réseau électrique.
- L'énergie éolienne est la moins coûteuse par rapport aux autres énergies renouvelables (pour les sites bien ventés).
- L'énergie éolienne crée plus d'emploi par unité d'électricité produite que n'importe quelle autre source d'énergie traditionnelle.

I.3.2. Inconvénients [4],[5]

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- le problème majeur de l'énergie éolienne, est l'instabilité de la puissance fournie, car lorsqu'elle est inférieure à la capacité du réseau, on utilise des sources de puissance complémentaire (groupes électrogènes). Quand cette puissance dépasse la capacité de la charge du réseau, l'intervention d'un système de régulation (stockage, ajout de charge de délestage...) est nécessaire.
- Impact visuel et sonore.
- La qualité de l'énergie électrique n'est toujours pas bonne, en effet c'est le caractère aléatoire qui en est à l'origine.
- Le coût de l'énergie éolienne reste élevé

I.4. Constitution d'un aérogénérateur

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.2.[1]

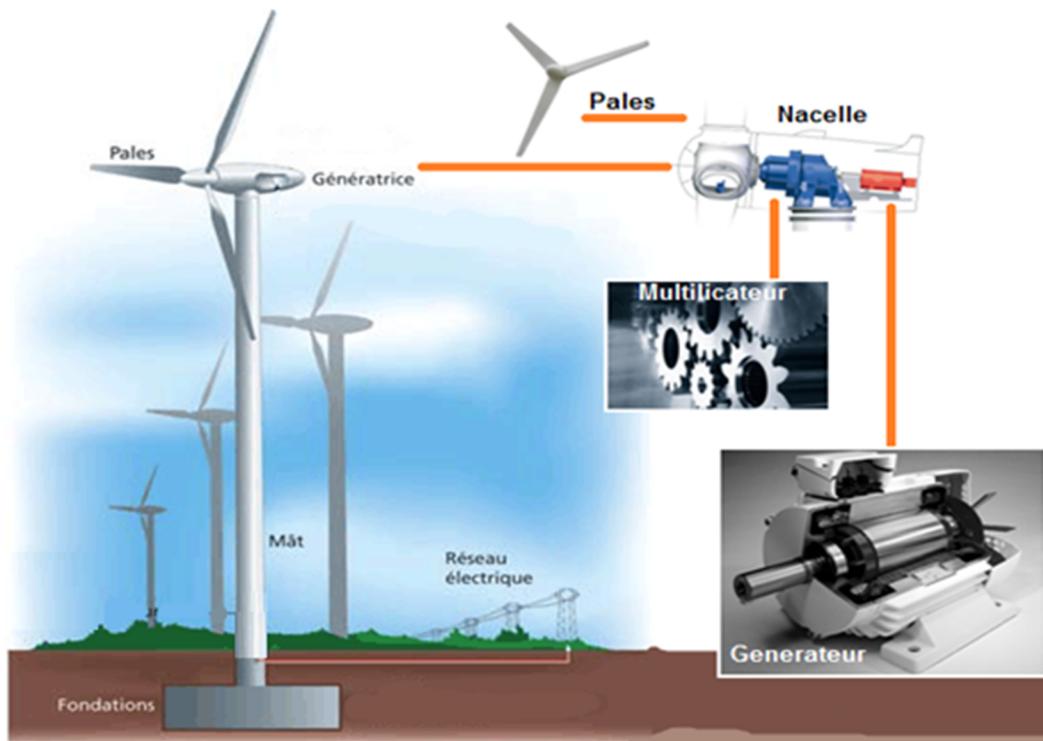


Figure .I.2 : Constitution d'une éolienne

- La fondation : La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne
- Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations dues au relief de la terre.
- La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque ; Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone ; un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne
- Le multiplicateur mécanique de vitesse : la vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse

lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [6].

- Les pales ou capteur d'énergie : elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter le bruit et les vibrations et d'améliorer le coefficient de puissance. [7]

- Le rotor : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [8].

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de rotor qui entre dans la classification des éoliennes selon le mode de fonctionnement :

- 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.
- Les rotors à vitesse variable, sont souvent moins coûteux 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 dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées [1].

I.5. Différents types aérogénérateur

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical et à axe horizontal, la Figure I.3 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes :

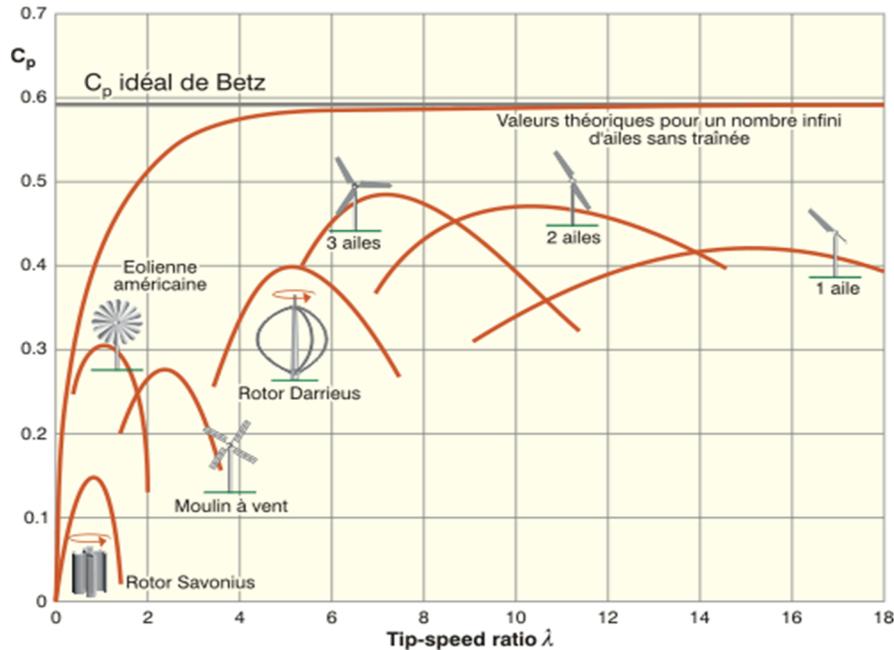


Figure I.3 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs [9]

Les générateurs éoliens peuvent être regroupés selon différentes catégories et classés selon, la nature du convertisseur électromécanique, le mode de régulation, la nature de l'accouplement mécanique, le mode de fonctionnement et le type du capteur [9].

I.5.1. Type du capteur

I.5.1.1. Aérogénérateur à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique ; ils présentent l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, donc facilement accessibles. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage.

Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924). [10]



Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical

Le rotor de **Savonius** : dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur ; (Figure I.5). [1]

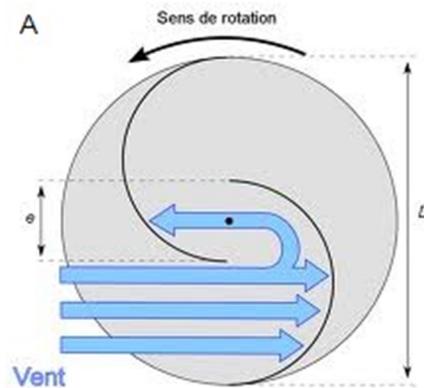


Figure I.5 : Principe du rotor de Savonius

Pour celle de **Darrieus**, Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.6) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). [1]

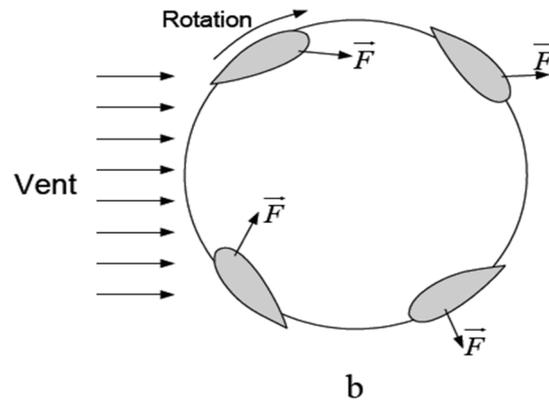
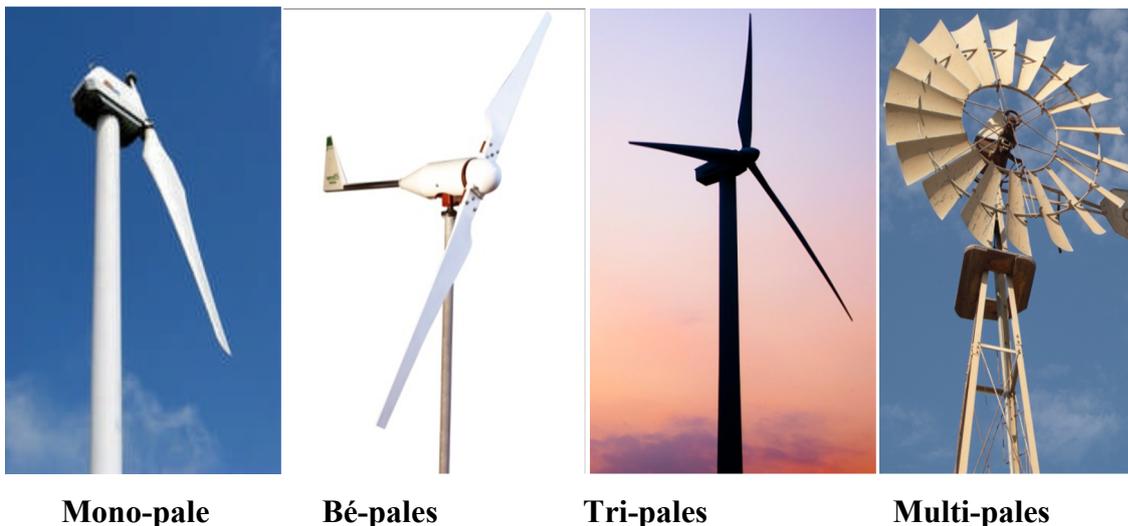


Figure I.6 : Principe du rotor de Darrieus

I.5.1.2. aérogénérateur à axe horizontal

Ces éoliennes sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion elles sont plus utilisées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales[2]; elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol ; Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales, figure I.7. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales, [8]:



Mono-pale

Bé-pales

Tri-pales

Multi-pales

Figure I.7 : Aérogénérateur à axe horizontal

I.5.2. Le mode de régulation

Pour le mode de régulation, on parle souvent de régulation par variation d'angle de calage "pitch-régulation". Il est réalisé en orientant les pales, faisant ainsi varier la surface apparente au vent et donc faisant varier l'effort, exercé par ce dernier, sur les pales ; Ce système permet aussi de freiner la turbine si nécessaire [4].

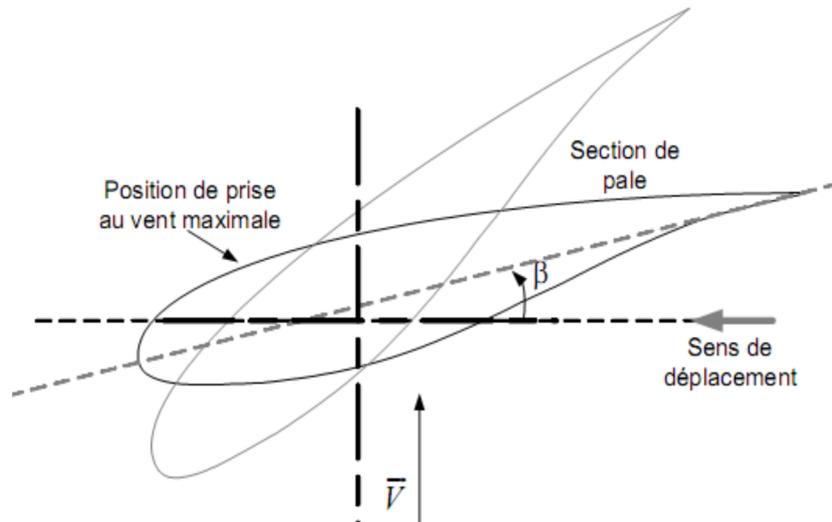


Figure I.8 : Variation de l'angle de calage d'une pale [11]

La régulation par décrochage aérodynamique "stall-régulation" utilise le phénomène de décrochage aérodynamique : plus la vitesse du vent est élevée, plus l'effort exercé par le vent sur les pales diminue [11]. Les éoliennes utilisant ce type de régulation possèdent en général un mécanisme de freinage en bout de pales qui, en cas de survitesse, actionne des masselottes par effet centrifuge pour orienter une partie de l'extrémité de la pale, freinant ainsi le rotor de manière aérodynamique [4].

I.5.3. La nature de l'accouplement mécanique

La vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [6].

Il existe des possibilités d'entraînement direct sans multiplicateur. Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la Turbine. Cela permet alors de réduire le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du

multiplicateur de vitesse [10]. Toutes les éoliennes à attaque directe sont équipées de machines synchrones multipolaires à aimants permanents qui demeure, à l'heure actuelle, relativement peu répandue [8].

I.6. Notions théoriques sur l'éolien

I.6.1. limite de Betz

Considérons une masse d'air «m» qui se déplace avec une vitesse V_v , l'énergie cinétique de cette masse sera :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (\text{I . 1})$$

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface active S de l'éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{I . 2})$$

Avec:

- ρ : masse volumique de l'air = $1.255 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.
- $S = \pi \cdot R_t^2$ est la surface balayée par la turbine éolienne (R_t : le rayon de la turbine).

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz:

$$P_{m a x} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0.59 \quad (\text{I . 3})$$

I. 6.2. Le coefficient de puissance C_p [2]

Le coefficient de puissance est le rapport entre la puissance récupérée $P_{m a x}$ et la puissance récupérable P_v . Donc, le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_{p - m a x} = \frac{P_{m a x}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{m a x}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{I . 4})$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de

puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure, figure (1. 3). Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par la relation suivante :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_t}{\rho \cdot S \cdot V^3} \quad (1.5)$$

Avec : P_t : Puissance de la turbine éolienne.

I. 6.3. Le rapport de la vitesse au bout des pales λ

Il est défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire au bout des pales de la turbine et de la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (1.6)$$

Avec :

- Ω_t : la vitesse de la turbine
- R_t : rayon de la turbine
- V_v : vitesse du vent.

I.6.4. Coefficient de couple

Le coefficient de couple de la turbine C_c est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est très utile afin d'estimer la valeur des couples, à différents points de fonctionnement. Sa valeur est déterminée par la relation suivante [10]:

$$C_c = \frac{2 \cdot C_t}{\rho \cdot S \cdot R_t \cdot V^2} \quad (1.7)$$

Avec :

C_t : Couple de la turbine éolienne,

Le couple de la turbine éolienne est donné par l'expression suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\rho S V_v^3}{2 \Omega_t} C_p = \frac{\rho \pi R_t^3 V_v^2}{2 \lambda} C_p = \frac{\rho \pi R_t^3 V_v^2}{2} C_c \quad (1.8)$$

En règle générale, les turbines sont caractérisées par les courbes de C_p et de C_c en fonction du rapport λ comme représenté à la figure I.7. [10]

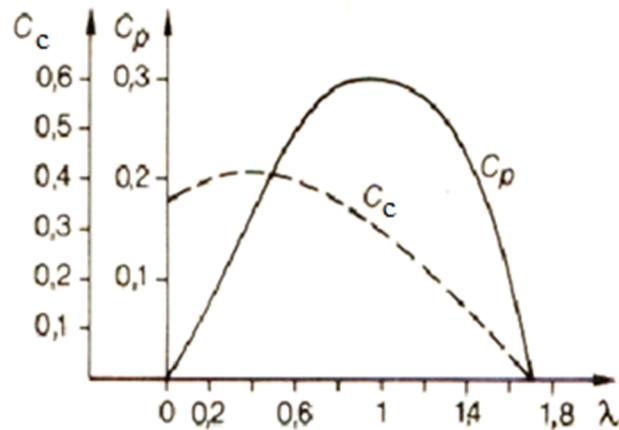


Figure 1. 9 Allure des coefficients C_p et C_c en fonction du Rapport λ
 Dans le cas du rotor Savonius [10]

Sachant que $P_t = C_t \Omega_t$ les coefficients C_p et C_c sont liés par la relation suivante :

$$C_p = \lambda \cdot C_c \tag{I. 9}$$

Disposant d'une des deux caractéristiques, on déduit alors l'autre facilement. il est intéressant d'avoir plusieurs jeux de courbes pour différents angles de calage (Figure I.10). Une approximation mathématique de C_p est donnée en fonction du rapport de vitesse λ et aussi de l'angle β [12] :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \tag{I. 10}$$

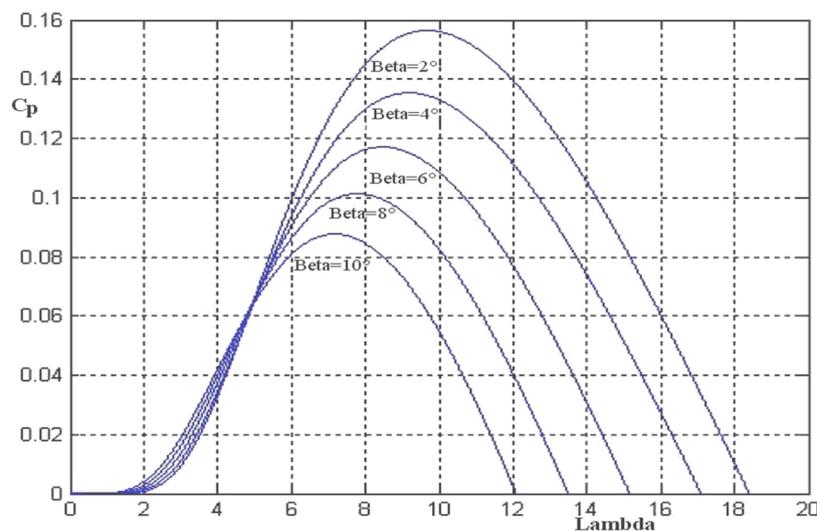


Figure I.10 Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple [12]

I.7. Zone de fonctionnement d'une éolienne [13]

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n qui est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n , un système de freinage se met en marche afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne :

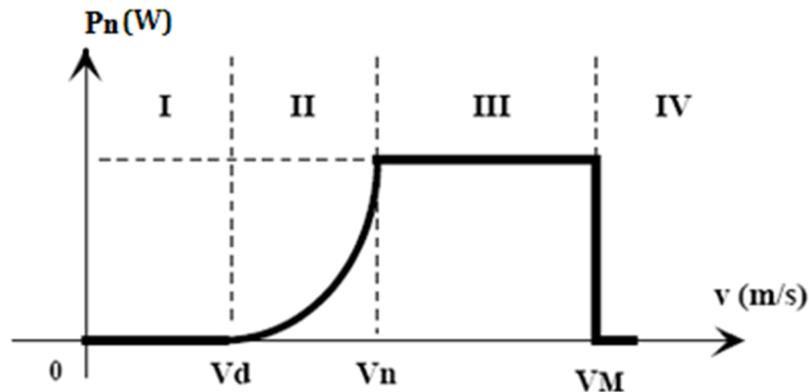


Figure I.11 Zone de fonctionnement d'une éolienne

Avec :

- V_d : la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.
- V_M : la vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.
- V_n : la vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production.

Les vitesses V_n ; V_d et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- **Zone I** : la puissance est nulle (la turbine ne fonctionne pas).
- **Zone II** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- **Zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie reste égale à P_n .
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I.8. Machines électriques utilisées dans les systèmes de conversion [14]

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur, on peut citer :

I.8.1. Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau [4].

En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur – réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [1,4].

I.8.2. Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable. Comme pour les machines synchrones, il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus au moins grands.

Les avantages de la machine asynchrone sont l'absence de balais des machines à cage d'écureuil, qui leur confère une robustesse et une longévité sans égales. D'autre part, les coûts d'achat et d'entretien d'une génératrice sont bien inférieurs à ceux d'un alternateur d'une même puissance.

I.8.2.1. Machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

On trouve aussi dans l'industrie des aérogénérateurs la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

I.8.2.2. Machine asynchrone à rotor bobiné

Comme c'est le cas pour un stator classique, les machines asynchrones à rotor bobiné ont des enroulements logés dans des encoches. Le courant rotor circule via des anneaux qui glissent contre des balais généralement en carbone montés sur le châssis du générateur (Figure I.12). Contrairement aux machines à cage directement connectées au réseau, les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système.



Figure I.12 : Machine à induction à rotor bobiné

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais.

I.8.2.3 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement lié au réseau alors l'enroulement statorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance.

De même, l'utilisation d'un filtre juste après les convertisseurs s'impose pour contrôler le niveau des harmoniques. Ces principaux avantages sont le fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme) et l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens. De plus les prix ne sont pas trop élevés car la machine est standard et l'électronique de puissance est dimensionnée seulement à 30% de la puissance nominale. Il reste comme inconvénients la maintenance de la boîte à vitesse et le contrôle qui sont complexes et aussi la présence de système de bagues et balais.

Le type d'éolienne retenu pour cette étude est une éolienne à axe horizontal à vitesse variable avec technologie asynchrone à cage et a pale fixe.

I.9. Les techniques de contrôle :

Quelle que soit la vitesse de rotation de l'éolienne (sur une plage de vitesse donnée) et quelle que soit la charge connectée, il est possible, en utilisant différents principes de commande (contrôle vectoriel, contrôle direct du couple (DTC), logique floue, réseaux de neurone) [15], de réguler la tension continue à la sortie du redresseur et de la maintenir constante. L'onduleur est alors chargé de fournir une tension alternative d'une amplitude et d'une fréquence donnée. La stratégie la plus étudiée actuellement est la commande vectorielle à flux rotorique orienté ; Cette méthode permet de découpler et de piloter la machine suivant deux axes : un axe de flux et un axe de couple.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une structure de chaîne de production de l'énergie électrique par énergie éolienne. Notre choix, s'est porté sur un système comportant une éolienne à axe horizontale connecté au réseau, via une interface d'électronique de puissance (redresseur et onduleur), ces derniers sont séparés par un bus continu, et une génératrice asynchrone a cage. Le modèle de tous les éléments de la chaîne de conversion choisie sera présenté en détail dans le deuxième chapitre de ce travail.

CHAPITRE II
MODELISATION DE
LA CHAINE
DE CONVERSION

II.1.Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la Compréhension du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Pour notre étude, nous avons choisi une éolienne munie d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil connectée à un convertisseur de puissance de type (AC/DC/AC). Ce convertisseur comprend un onduleur et un redresseur de type modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Dans ce chapitre, on va modéliser les différentes parties de la chaîne de conversion éolienne à savoir :

- La partie mécanique (turbine).
- La génératrice asynchrone.
- Les convertisseurs de puissance. (redresseur, onduleur)
- La commande MLI, et le bus continu.
- Le réseau électrique.

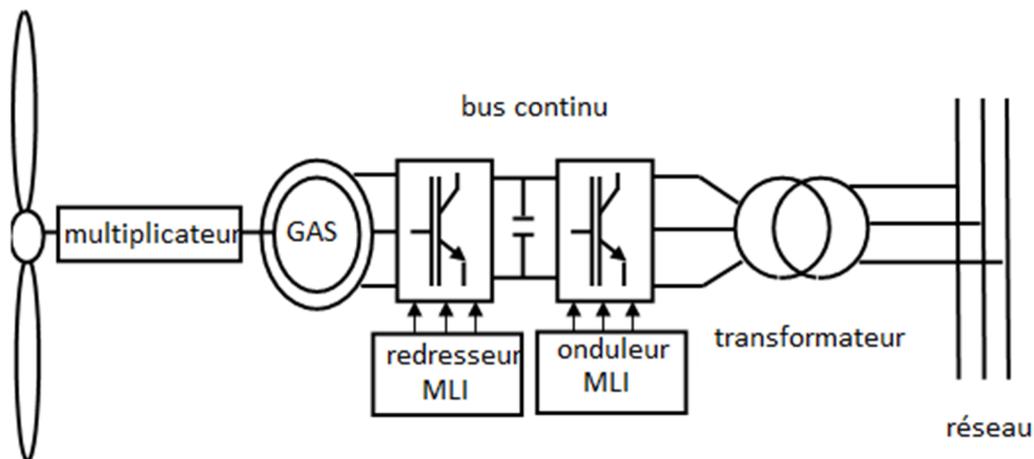


Figure II.1 : Générateur éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à cage.

II.2. Modélisation de la partie mécanique

La figure II.2 représente le système mécanique à modéliser. Nous commençons par la représentation de la puissance extractible P_t en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement. Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînent une génératrice asynchrone à cage à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

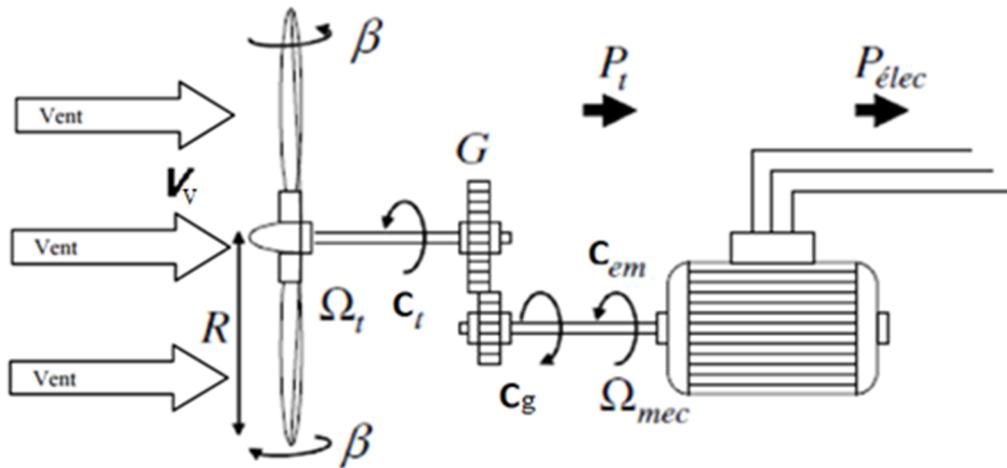


Figure II.2 : configuration d'une éolienne

II.2.1. Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur.

Les propriétés dynamiques du vent sont donc capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur multidimensionnel.

Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à la dimension horizontale. Le modèle comportemental de vent peut donc être simplifié considérablement. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.[4]

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

II.2.2. Modèle de la turbine

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_t = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

La puissance mécanique apparaissant au niveau du rotor de la turbine, s'écrit alors :

$$P_{m \ e} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.3})$$

Avec : λ Le rapport de la vitesse en bout des pales

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_V} \quad (\text{II.4})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple C_t est donné par l'expression suivante :

$$C_t = \frac{P_{m e c}}{\Omega_t} = \frac{1}{2 \Omega_t} C_p (\lambda, \beta) \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (\text{II.5})$$

Avec : C_p est le coefficient de performance ou coefficient de puissance [16].

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.6})$$

L'expression du coefficient de puissance de la turbine, est généralement décrite par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures. Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure (II.3) :

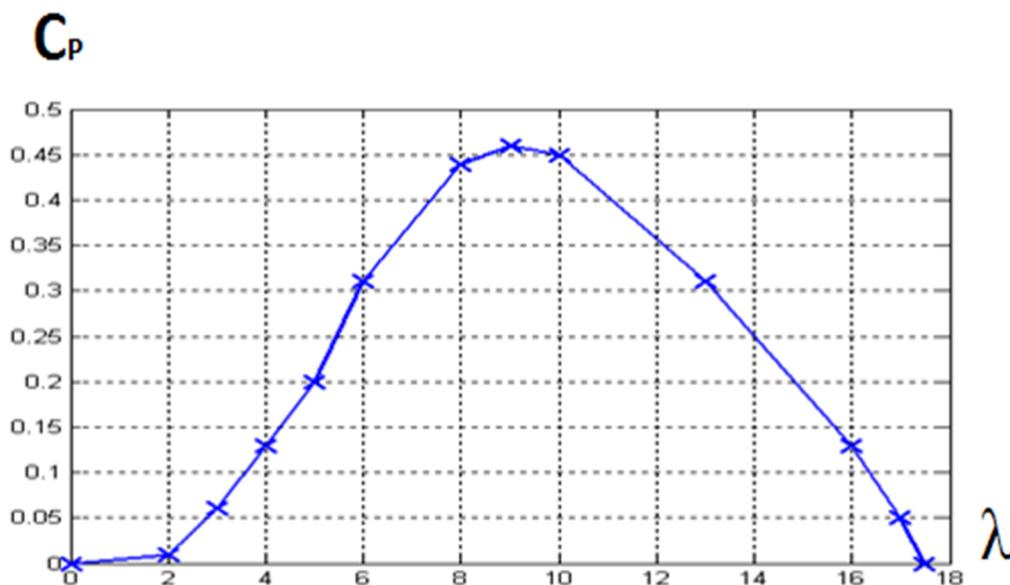


Figure II.3 : Courbe $C_p(\lambda)$. [17]

En introduisant le terme $C_c(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$, appelé coefficient de couple, on obtient la relation suivante :

$$C_t = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V_V^2 \tag{II.7}$$

ρ : Masse volumique de l'air

S: Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi \cdot R^2$

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur

R_t : Rayon de la turbine

C_p : Coefficient de puissance

V_V : Vitesse du vent

C_t : Couple de la turbine éolienne

β : L'angle de calage des pales

Ainsi le schéma bloc étudiées du modèle de la turbine est représenté en figure II.4.

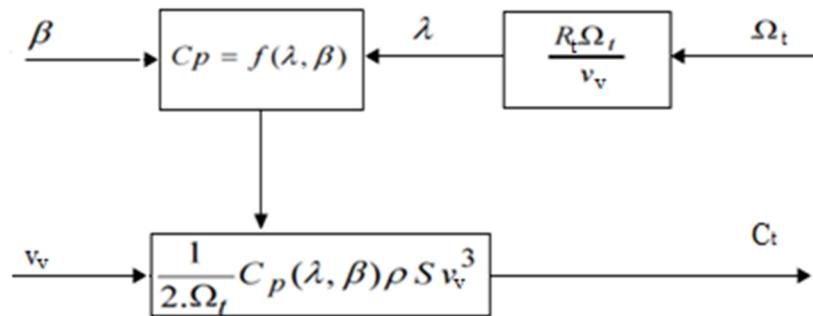


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine, assez lente, à celle que nécessite la génératrice

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{m e c} \tag{II.8}$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \tag{II.9}$$

Avec :

- G est le gain du multiplicateur
- C_t , le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

- $\Omega_{m e c}$ est la vitesse mécanique de la génératrice,
- Ω_t , est la vitesse de la turbine.
- C_g , le couple de la génératrice

Le schéma bloc du multiplicateur de vitesse est représenté en Figure II.5

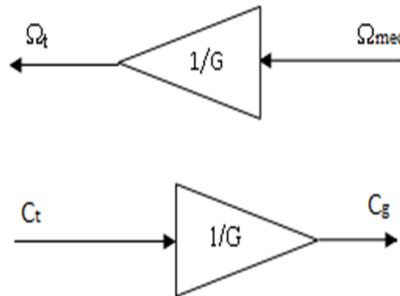


Figure II.5 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.

II.2.4. Equation dynamique de l'arbre

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine Supportant les pales, le moyeu, et une inertie représentant le rotor de la génératrice.

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J \frac{d\Omega_{m e c}}{d t} = C_{e m} - C_g - C_f \quad (\text{II.10})$$

Où

C_f : Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$C_{e m}$: Couple électromagnétique du générateur

Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice.

$$J = J_g + \frac{J_t}{G^2} \quad (\text{II.11})$$

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique $C_{e m}$ a un signe négatif.

$$J \frac{d\Omega_{m e c}}{d t} = C_g - C_{e m} - C_f \quad (\text{II.12})$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$$C_f = f \Omega_{m e c} \quad (\text{II.13})$$

En remplaçant (II.13) Dans (II.12), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = f \Omega_{me} + J \frac{d\Omega_{me}}{dt} \tag{II.14}$$

$$(Jp + f)\Omega_{me} = C_g - C_{em} \tag{II.15}$$

Avec :

- J, inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine,
- f, coefficient de frottement dynamique,

A partir des équations précédentes le schéma bloc de l'arbre mécanique est représenté comme suit :

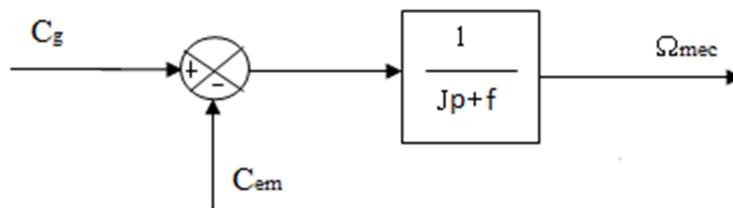


Figure II.6 : Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique.

Le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne Cinématique de la turbine (Figure. II.7), est obtenu en regroupant les composantes respectives développées précédemment (Figure. II.4, 5 et 6).

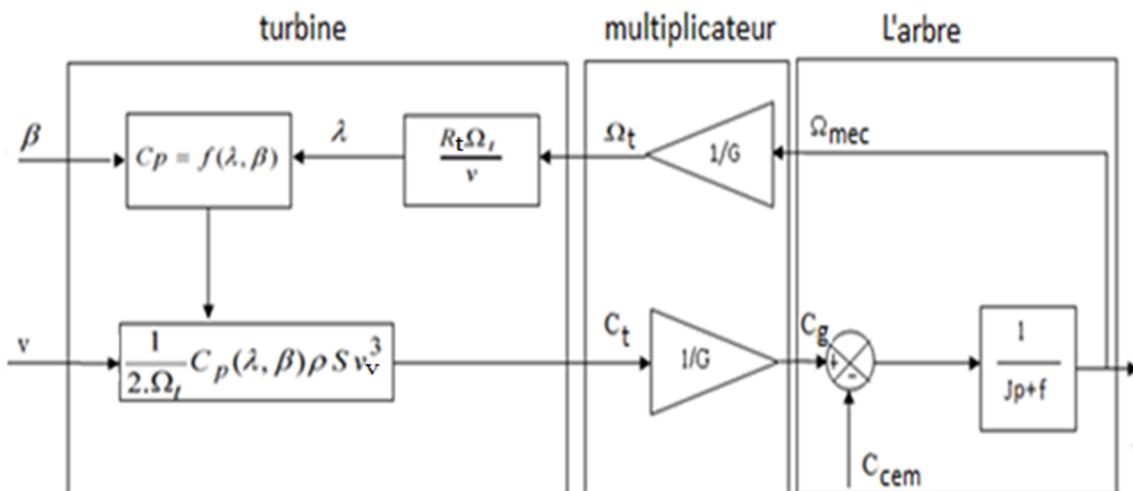


Figure II.7 : schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.

II. 2.5. Maximisation de la puissance

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant le point maximal de la courbe C_p en fonction de λ .

$$\Omega_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt}}{R_t} V_v \tag{II. 16}$$

En comparant la vitesse de la génératrice, à une vitesse de référence (calculée à partir du point de fonctionnement optimal) on peut extraire le maximum de puissance. Ce procédé est connu dans la littérature scientifique sous le nom de recherche de point de puissance maximale (P.P.M) et souvent connu en littérature Anglo-Saxonne la technique M.P.P.T (Maximum Power Point Tracking. L'asservissement de vitesse nécessite le calcul de la vitesse du vent. Or une mesure précise de cette dernière, est difficile à réaliser [16].

Une seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Donc le couple électromagnétique de référence est donné par :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho S R_t^3}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \tag{II. 17}$$

La figure suivante (II.8) représente le schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.

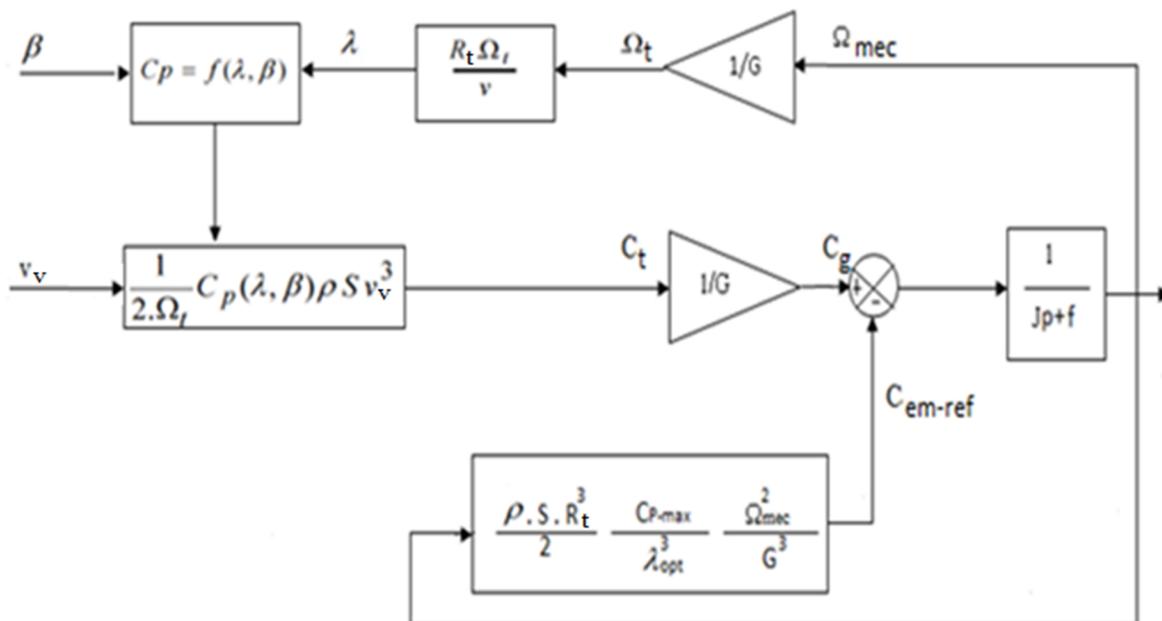


Figure II.8 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.

II.3. Modélisation de la machine asynchrone (MAS)

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications. La machine asynchrone présente l'avantage d'être robuste, de construction simple et peu coûteuse [18]. A l'origine, elle était uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

II.3.1. Description de la MAS

II.3.2. Description d'une machine asynchrone à cage

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, elle est constituée d'une carcasse intégrant le circuit ferromagnétique statorique constitué d'encoches où l'enroulement statorique polyphasé est bobiné. Au centre de ce circuit magnétique, qui se présente comme un cylindre creux, se trouve le circuit magnétique rotorique. Celui-ci est également constitué des barres en aluminium coulé. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité à l'aide d'anneaux [19]

La figure. II.9 représente ces différents éléments.

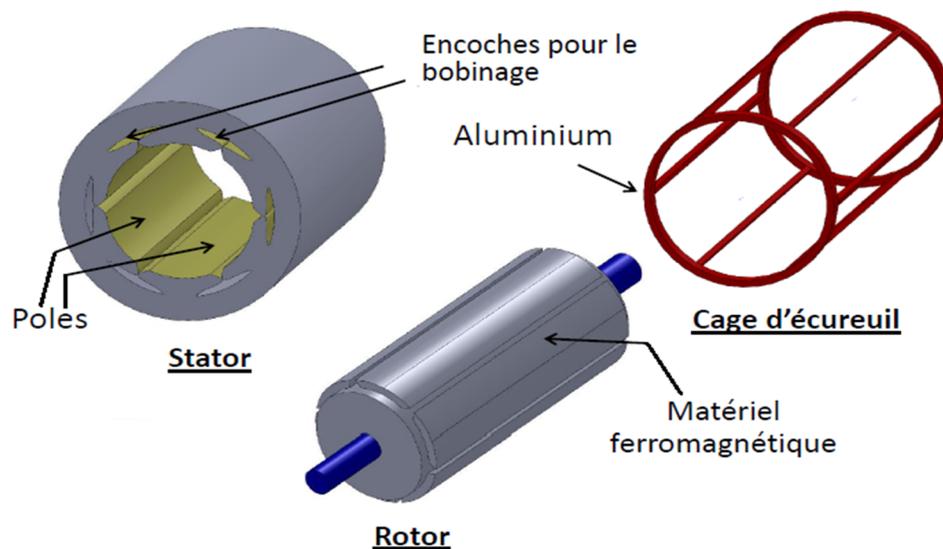


Figure II.9 : Les composants d'une machine asynchrone à cage.

II.3.3. Principe de fonctionnement

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques.

La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux. Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux (lois de Lenz). Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement. Lorsque la machine asynchrone tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator, on a un fonctionnement de type moteur. Si la vitesse de rotation du rotor devient égale à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator (fonctionnement hyper synchrone), la machine fonctionne en générateur. Mais son stator doit être forcément relié au réseau pour créer le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de la génératrice [20]

II.3.4. Hypothèses simplificatrices

Pour bien modéliser la MAS, nous supposons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé équivalent.
- Le système triphasé est équilibré.
- L'entrefer est constant et l'effet des encoches est négligeable
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables
- L'échauffement n'est pas pris en compte

II.3.5. Equations générales de la machine asynchrone

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme l'indique la figure II.10, les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles même.

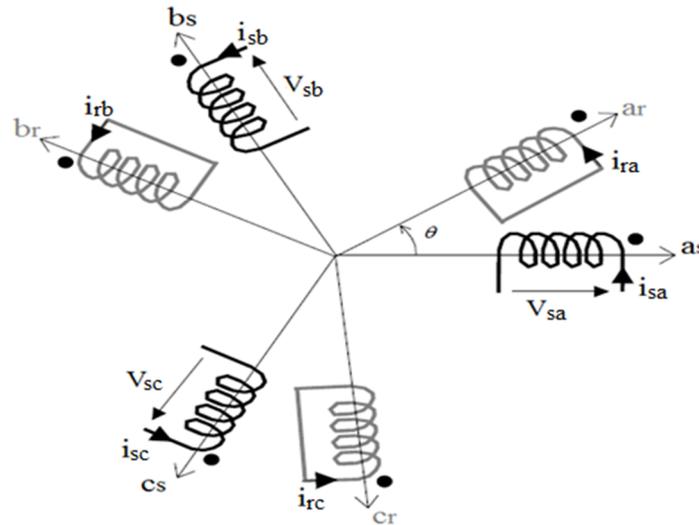


Figure II.10 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.

as, bs et cs : axes statorique ; ar, br et cr: axes rotorique.

Les équations générales des tensions de la machine asynchrone s’obtiennent en considérant que la tension appliquée à chacun des enroulements, est la somme de la chute de tension ohmique et de la chute de tension inductive :

Loi de FARADAY :

$$V=R. i + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.18}$$

Pour une phase statorique, on a :

$$[V_{sabc}]=[R_s].[i_{sabc}]+\frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \tag{II.19}$$

Pour une phase rotorique, on a :

$$[V_{rabc}]=[R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \tag{II.20}$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_s a \\ V_s b \\ V_s c \end{bmatrix} \qquad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_r a \\ V_r b \\ V_r c \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_s a \\ i_s b \\ i_s c \end{bmatrix} \qquad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_r a \\ i_r b \\ i_r c \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

Les flux s’expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

Is, Ir: inductances propres statoriques et rotoriques ;

M : inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

[M] : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] [i_{sabc}] + [M] [i_{rabc}] \quad (\text{II.21})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] [i_{rabc}] + [M] [i_{sabc}] \quad (\text{II.22})$$

Sont respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$\text{Avec : } [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{s a} \\ \Phi_{s b} \\ \Phi_{s c} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{r a} \\ \Phi_{r b} \\ \Phi_{r c} \end{bmatrix}$$

Avec : [L_s] et [L_r] et [M] représentent respectivement les matrices inductances statoriques, rotoriques et mutuelles exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s a a} & L_{s a b} & L_{s a c} \\ L_{s a b} & L_{s a a} & L_{s a c} \\ L_{s a c} & L_{s a b} & L_{s a a} \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{r a a} & L_{r a b} & L_{r a c} \\ L_{r a b} & L_{r a a} & L_{r a c} \\ L_{r a c} & L_{r a b} & L_{r a a} \end{bmatrix}$$

$$[M] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Puisque le rotor est court-circuité, la tension à ses bornes est nulle. L.

a relation (II. 20) s'écrit :

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] = 0 \quad (\text{II.23})$$

II.3.6. Modèle de la machine dans le repère de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique

plus simple que le modèle physique du système. Si l'on appelle (θ) l'angle de rotation électrique entre l'axe **d** du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase **a** du stator. (Figure II.11) [3][21][22]

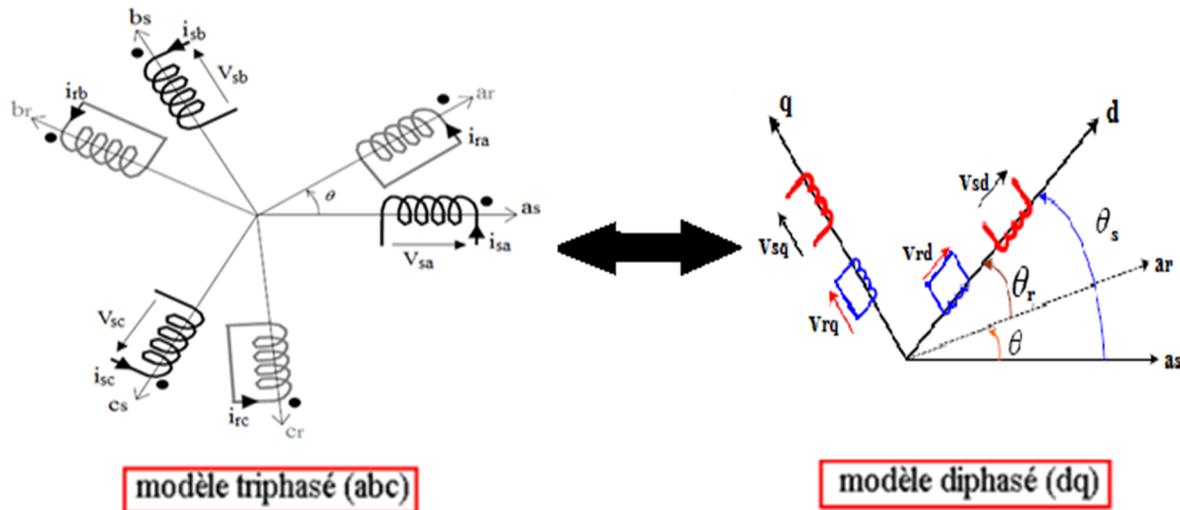


Figure II.11 : Passage du triphasé au diphasé.

Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dqo}] \tag{II.24}$$

Et

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \tag{II.25}$$

Avec :

$\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

X : courant, tension ou flux.

O : indice homopolaire.

En équilibre : les composantes homopolaires sont nulles

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Ainsi, en multipliant les équations (II.19), (II.20) et (II.21), (II.22) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} [V_s d] = R_s \cdot i_s d - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \phi_{s q} + \frac{d\phi_{s d}}{dt} \\ [V_s q] = R_s \cdot i_s q + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \phi_{s d} + \frac{d\phi_{s q}}{dt} \end{cases} \quad (II.26)$$

$$\begin{cases} [V_r d] = R_r \cdot i_r d - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \phi_{r q} + \frac{d\phi_{r d}}{dt} = 0 \\ [V_r q] = R_r \cdot i_r q + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \phi_{r d} + \frac{d\phi_{r q}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (II.27)$$

$$\begin{cases} [\phi_{s q}] = L_s \cdot i_s q + M \cdot i_r q \\ [\phi_{r q}] = L_r \cdot i_r q + M \cdot i_s q \end{cases} \quad (II.28)$$

$$\begin{cases} [\phi_{s d}] = L_s \cdot i_s d + M \cdot i_r d \\ [\phi_{r d}] = L_r \cdot i_r d + M \cdot i_s d \end{cases} \quad (II.29)$$

II.3.7. Choix du repère (dq)

Il existe trois choix importants. On peut fixer le repère (dq) au stator, au rotor ou au champ tournant. Or, le repère (dq) est mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park θ_s et θ_r pour effectuer les rotations. On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant qui est le champ créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. [21]

Nous choisissons de fixer le repère (dq) au champ tournant.

Notons $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ que nous appellerons pulsation statorique

De même $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ que nous appellerons pulsation rotorique

Et $\omega_m = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ est la pulsation mécanique

On remplace les systèmes d'équations (II.28) et (II.29) dans les systèmes d'équations (II.26) et (II.28) respectivement, on obtient :

$$\begin{cases} V_{s d} = R_s \cdot i_{s d} - \omega_s \cdot (L_s \cdot i_{s q} + M \cdot i_{r q}) + \frac{d (L_s \cdot i_{s d} + M \cdot i_{r d})}{d t} \\ V_{s q} = R_s \cdot i_{s q} + \omega_s \cdot (L_s \cdot i_{s d} + M \cdot i_{r d}) + \frac{d (L_s \cdot i_{s q} + M \cdot i_{r q})}{d t} \end{cases} \quad (II.30)$$

$$\begin{cases} V_{r d} = R_r \cdot i_{r d} - \omega_r \cdot (L_r \cdot i_{r q} + M \cdot i_{s q}) + \frac{d (L_r \cdot i_{r d} + M \cdot i_{s d})}{d t} \\ V_{r q} = R_r \cdot i_{r q} + \omega_r \cdot (L_r \cdot i_{r d} + M \cdot i_{s d}) + \frac{d (L_r \cdot i_{r q} + M \cdot i_{s q})}{d t} \end{cases} \quad (II.31)$$

$$\begin{cases} i_{s d} = \frac{1}{R_s + L_s \cdot S} (V_{s d} - M \cdot \frac{d i_{r d}}{d t} + \omega_s \cdot L_s \cdot i_{s q} + \omega_s \cdot M \cdot i_{r q}) \\ i_{s q} = \frac{1}{R_s + L_s \cdot S} (V_{s q} - M \cdot \frac{d i_{r q}}{d t} - \omega_s \cdot L_s \cdot i_{s d} - \omega_s \cdot M \cdot i_{r d}) \end{cases} \quad (II.32)$$

$$\begin{cases} i_{r d} = \frac{1}{R_r + L_r \cdot S} (V_{r d} - M \cdot \frac{d i_{s d}}{d t} + \omega_r \cdot L_r \cdot i_{r q} + \omega_r \cdot M \cdot i_{s q}) \\ i_{r q} = \frac{1}{R_r + L_r \cdot S} (V_{r q} - M \cdot \frac{d i_{s q}}{d t} - \omega_r \cdot L_r \cdot i_{r d} - \omega_r \cdot M \cdot i_{s d}) \end{cases} \quad (II.33)$$

II.3.8. Equations de Puissance et de Couple

Selon Park, Les expressions de la puissance active et réactive sont données par les relations suivantes :

$$P_a = V_{s d} i_{s d} + V_{s q} i_{s q} \quad (II.34)$$

$$Q_r = V_{s d} i_{s q} - V_{s q} i_{s d} \quad (II.35)$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, en remplaçant V_{sd} et V_{sq} par leurs valeurs, la relation de la puissance active précédente devient :

$$P_a = (i_{s d}^2 + i_{s q}^2) R_s + (i_{s d} \frac{d \Phi_{s d}}{d t} + i_{s q} \frac{d \Phi_{s q}}{d t}) + \omega_s (\Phi_{s d} i_{s q} - \Phi_{s q} i_{s d}) \quad (II.36)$$

La puissance électrique fournie au stator se décompose ainsi en trois termes :

- Le premier représente les pertes Joules au stator ;
- Le second représente la variation d'énergie électromagnétique statorique ;

- Le troisième représente la puissance électromagnétique ;

Avec :

$$P_{e\text{ mF}} \omega_s (\Phi_{s\text{ d}} i_{s\text{ q}} - \Phi_{s\text{ q}} i_{s\text{ d}}) \quad (\text{II.37})$$

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le troisième terme de l'équation (II.36) par Ω_s :

$$C_{e\text{ mF}} p \cdot M(i_{r\text{ d}} i_{s\text{ q}} - i_{r\text{ q}} i_{s\text{ d}}) \quad (\text{II.38})$$

Avec: $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$

p : nombre de paires de pôles.

II.4. Modélisation du système de puissance (Redresseur, onduleur)

Dans ce chapitre, nous allons étudier la cascade : (redresseur triphasé MLI- bus continu-onduleur triphasé MLI) connecté au stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette cascade constitue une alimentation réelle du réseau à laquelle elle est connectée.

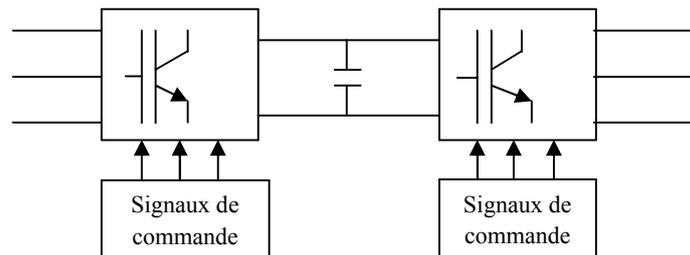


Figure II.12 : Redresseur et onduleur MLI.

II.4.1. Le redresseur MLI

La figure (II-13) représente le schéma d'un redresseur MLI.

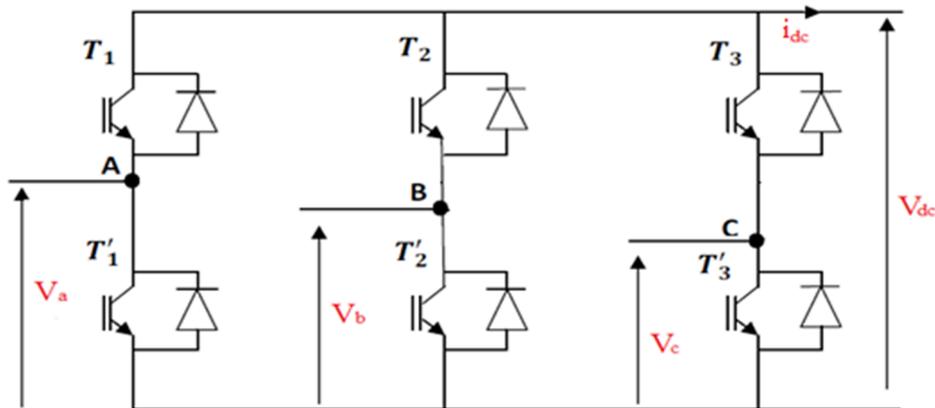


Figure II.13 : Redresseur MLI.

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + i_c S_c \quad (\text{II.40})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II. 4.2. Le bus continu

Le condensateur du bus continu est modélisé par :

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{II. 41})$$

Avec :

- C : la capacité de filtrage du bus continu.

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur.

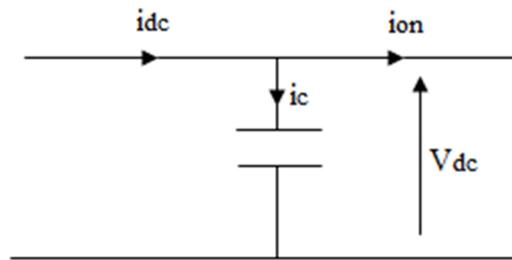


Figure II.14 : Courant du bus continu.

$$i_c = i_{dc} - i_{on} \quad (\text{II. 42})$$

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int i_c \cdot dt \quad (\text{II. 43})$$

II.4.3. l'onduleur MLI

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

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

L'onduleur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs, répartis d'une façon symétrique sur trois bras commandés à la fermeture et à l'ouverture, avec des diodes en antiparallèle comme le montre la figure II.15

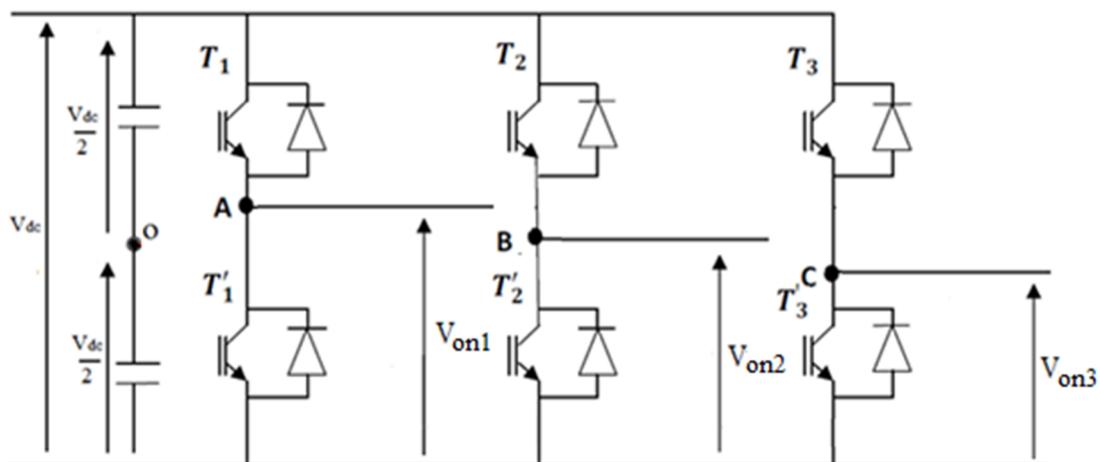


Figure II.15 : Représentation schématique d'un onduleur MLI.

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion) donc La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$$i_{on} = S'_a i_{on1} + S'_b i_{on2} + S'_c i_{on3} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

- i_{on} , le courant modulé par l'onduleur.
- S'_a, S'_b, S'_c sont les fonctions logiques correspondantes à l'état de m'interrupteur (égal à 1 si l'interrupteur est fermé et zéro s'il est ouvert).

II. 5. Modélisation de la liaison au réseau

La liaison au réseau est constituée d'un filtre R_{res}, L_{res} , une source E et d'un transformateur parfait de gain N

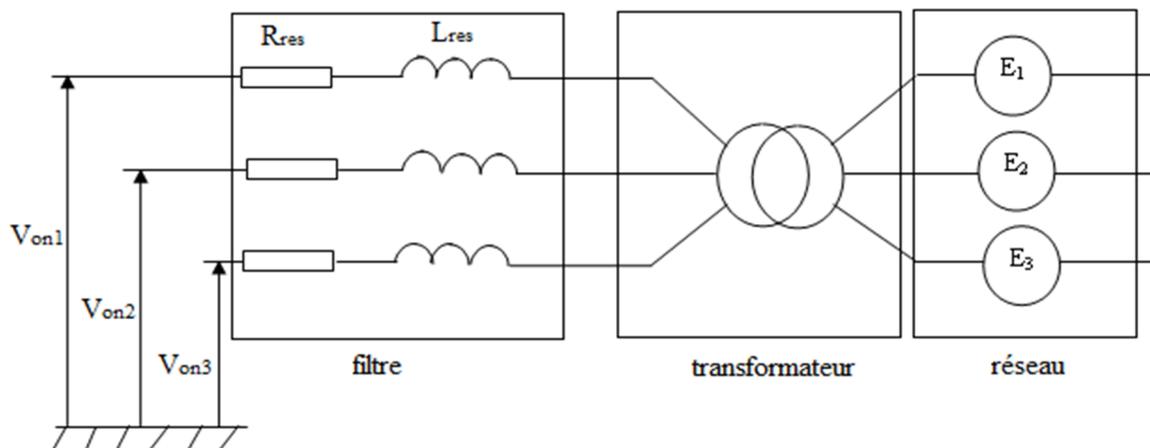


Figure II.16 : Schéma électrique de la liaison réseau.

II. 5.1. Modélisation du filtre [17]

Il s'agit d'un filtre passif série (R_{res}, L_{res}) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure. II.17) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.

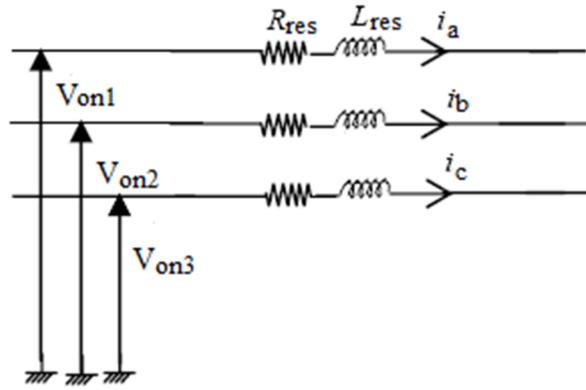


Figure II.17 : le filtre

Le filtre de la figure (II.27) est modélisé par l'équation suivante :

$$i_x = \frac{1}{L_{res} \cdot s + R_{res}} v_x. \quad (\text{II.46})$$

Avec :

- $i_x = i_a, i_b, i_c$, les courants des trois phases.
- $v_x = v_a, v_b, v_c$, les tension des trois phases.

II. 5.2. Modélisation du transformateur

La fonction de transfert d'un transformateur parfait, de gain N, est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_{secondaire}}{V_{primaire}} = N \quad (\text{II.47})$$

II.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les modèles mathématiques des différentes parties constituant notre système.

Dans la prochaine partie du travail, La commande vectorielle de la génératrice asynchrone ainsi qu'un contrôle de la liaison au réseau sont réalisés afin de fournir au réseau la tension et la fréquence désirée avec un facteur de puissance le plus unitaire possible.

CHAPITRE III

COMMANDE

VECTORIELLE

III.1. Introduction

Dès son apparition, La commande vectorielle n'a pas eu tout de suite un grand essor car les régulations, à l'époque, reposaient sur des composantes analogiques, l'implantation de la commande était alors difficile. Avec l'avènement des microcontrôleurs et des dispositifs permettant le traitement du signal (DSP), il est devenu possible de réaliser une telle commande à un coût raisonnable. Cela a conduit à une explosion des recherches et des applications relatives à la commande vectorielle de la machine asynchrone.[21]

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la commande de la génératrice asynchrone à cage via le convertisseur MLI (coté génératrice) et à la régulation des puissances et des courants via le convertisseur coté réseau.

III.2. Commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux, le courant d'excitation, et celle liée au couple, le courant d'induit. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple [21]

Dans notre cas (le système aérogénérateur raccordé au réseau), l'objectif est de fournir au réseau la puissance active souhaitée sans absorber de puissance réactive quelque soit la vitesse du vent, à condition qu'elle soit suffisante pour produire de l'énergie électrique. L'objectif de la commande est alors de maintenir constante la tension continue en sortie du redresseur. Cela peut être obtenu par le contrôle du flux et de la puissance transmise par la machine, c'est à dire son couple électromagnétique (en fonction de la vitesse) [3].

III.3. Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à cage dans les applications d'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande des grandeurs de la machine.

Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase). Deux méthodes ont été citées soit : [23]

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte

III.3.1 .Commande vectorielle directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa position et celui-ci, doit être vérifiée quelque soit le régime transitoire effectué .Il faut donc procéder à une série de mesure aux bornes du système. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global. Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale.

III.3.2 .Commande vectorielle indirecte

A cause des inconvénients vus dans la précédente commande, la commande vectorielle indirecte est considérée comme plus pratique. Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué.

Dans ce qui suit, on va employer la méthode indirecte de l'orientation du flux rotorique associé au modèle de la machine asynchrone.

III.4. Principe de la commande vectorielle

L'équation du couple de la machine asynchrone exprimée dans le système d'axes (d, q) est donnée sous la formule suivante :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{III. 1})$$

Le principe de la commande vectorielle est de réduire l'expression (III. 1) et de la rendant comparable à l'expression du couple de la machine à courant continu. La méthode étant d'annuler un des termes contenus dans la parenthèse en rendant nul le flux sur un axe de Park, en général l'axe q. Dans le cadre de ce travail, nous étudierons la commande vectorielle à flux rotorique orienté, qui est la plus utilisée et la plus simple à implanter. [24] par contre, le système est sensible aux variations de paramètres ainsi qu'à l'estimation du flux. [3]

III.5. Orientation de flux

Dans le chapitre II, nous avons établi les équations de la machine dans le repère « dq » lié au champ tournant. Ce choix facilite la réalisation du découplage entre le flux et le couple, Pour réaliser ce découplage, il faut orienter le repère « dq », c'est à dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple soit imposée, pour maintenir le flux constant. Le couple est alors contrôlé linéairement. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit : [21], [22]

- le flux rotorique
- le flux statorique
- le flux d'entrefer

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [21]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que :

$$\phi_{rd} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{rq} = 0 \tag{III.2}$$

Cela signifie que le flux ϕ_r est aligné en permanence avec l'axe « d ». Sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux ϕ_r soit maintenu constant.

Le comportement de la machine asynchrone, en régime permanent, est défini par les expressions des tensions et des flux données dans le chapitre II, Nous rappelons, ci-dessous, les relations comme suite :

Tension :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} \end{array} \right. \tag{III.3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} \end{array} \right. \tag{III.4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{rd} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} \end{array} \right. \tag{III.5}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} \end{array} \right. \tag{III.6}$$

Flux:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \end{array} \right. \tag{III.7}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \end{array} \right. \tag{III.8}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} = \Phi_r \end{array} \right. \tag{III.9}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} = 0 \end{array} \right. \tag{III.10}$$

En supposant que la commande maintienne $\phi_{rd} = \phi_r = \text{constante}$ et $\phi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{d\phi_r}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$$

A partir de la relation (III.4), on obtient:

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III. 11})$$

Ce qui implique que le courant i_{rd} est également nul en régime permanent. Par ailleurs, L'équation (III.6) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotoriques sous la forme suivante :

$$\Phi_r = \frac{-R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III. 12})$$

La relation (III.12) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Φ_r en fonction de i_{rq} (avec $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$ et $i_{rd}=0$) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir des équations (III.9) (III.10), on donne les expressions des courants rotoriques :

$$i_{rd} = \frac{\phi_r - M * i_{sq}}{L_r} \quad (\text{III. 13})$$

$$i_{rq} = -\frac{M * i_{sq}}{L_r} \quad (\text{III. 14})$$

III.6. Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté

Suite aux différentes simplifications établies ci-dessus, nous allons ré-exprimer les tensions statoriques en fonction des courants statoriques et du flux ϕ_r . Les développements seront effectués uniquement pour v_{sd} sachant que le raisonnement est identique pour v_{sq} .

En dérivant le flux Φ_{sd} , dont l'expression est donnée par (III.7), par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + M \cdot \frac{di_{rd}}{dt} \quad (\text{III. 15})$$

En remplaçant Φ_{sq} exprimé dans la relation (III.8) et $\frac{d\Phi_{sd}}{dt}$ avec leurs valeurs respectives dans l'équation (III.2), on obtient alors :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot L_s \cdot i_{sq} + M \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \cdot M \cdot i_{rq} \quad (III.16)$$

En remplaçant les courants rotorique par leurs valeurs exprimées aux équations (III.13) et (III.14), on aura :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (III.17)$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s}$ la relation précédente devient :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (III.18)$$

De manière identique, on peut réécrire v_{sq} sous la forme suivante :

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot \omega_s \quad (III.19)$$

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser la commande par MLI. De ce fait, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de la génératrice n'est pas nécessaire et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande.

Le repère orienté impose $\Phi_{rq} = 0$. Connaissant le courant i_{sq} , l'expression du Couple électromagnétique donnée par la relation (III.2) devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (III.20)$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer Φ_r et ω_s pour l'application de la transformation de Park.

III.7. Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Les grandeurs de sortie utilisées pour l'élaboration de la commande sont souvent difficilement accessibles pour des raisons techniques (c'est le cas du flux) ou pour des problèmes de cout.

Elles peuvent être reconstituées par :

- Des estimateurs utilisés en boucle ouverte.
- Des observateurs corrigeant en boucle fermée les variables estimées.

Les estimateurs reposent sur l'utilisation d'une représentation de la machine sous forme d'équation de Park définie en régime permanent (estimateur statique) ou transitoire

(estimateur dynamique). Ils sont obtenus par une résolution directe des équations associées à ce modèle. [25]

L'intérêt d'une telle approche est de nous conduire à la mise en œuvre d'algorithmes simples et donc rapide. Toutefois, ils sont peu robuste par rapport aux variations paramétriques (résistance statoriques et rotoriques, mutuelle, etc).

III.7.1. Estimation du flux rotorique

Dans la relation (III.11), on remplace i_{rd} par sa valeur exprimée en (III.13), il vient :

$$\Phi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (\text{III.21})$$

Avec $T_r = L_r/R_r$: constante de temps rotorique.
 s : opérateur de Laplace.

III.7.2. Estimation de la pulsation statorique

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel « dq » doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$. La vitesse de rotation de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique.

Dans l'équation (III.12), on remplace i_{rq} par sa valeur donnée en (III.14). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} \quad (\text{III.22})$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + p \cdot \Omega \quad (\text{III.23})$$

III.8. Structure de la commande vectorielle

Le schéma de principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté sur l'axe d est montré par la figure (III.1).

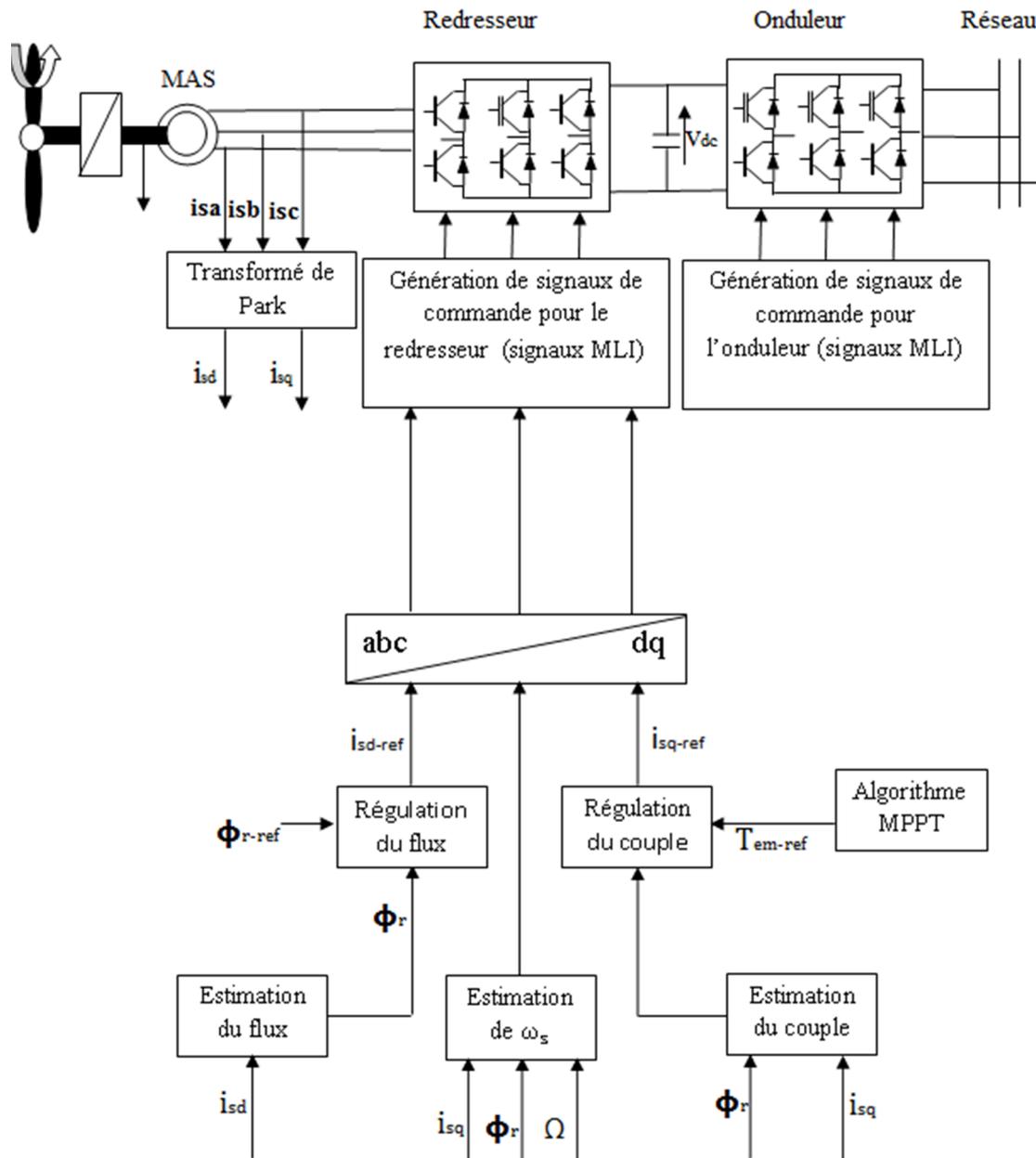


Figure III. 1: Schéma de Principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

III.9. Commande de convertisseur coté génératrice

III.9.1 .Commande MLI

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

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

Il existe de nombreuses manières d'élaborer le signal de commande MLI. Il est possible de classer les modes de commande selon quatre catégories principales [12] :

- MLI à Bande d'hystérésis :
La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.
- MLI à échantillonnage périodique :
La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.
- MLI à porteuse triangulaire :
La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire.
- MLI vectorielle :
Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras du redresseur en même temps.

Au cours de ce travail, on s'intéressera uniquement à l'étude de la MLI triangulo- sinusoïdale.

Les deux signaux de commande représentés sur la figure III.2 sont appliqués aux deux entrées d'un comparateur qui détermine (à travers une interface) les états de commutation de l'onduleur :

- La tension sinusoïdale v_{ref} de fréquence f et d'amplitude $V\sqrt{2}$ est le signal de référence.
- La tension triangulaire v_p de fréquence $f' \gg f$ et d'amplitude $V_p \geq V\sqrt{2}$ est le signal de modulation (porteuse) [26]

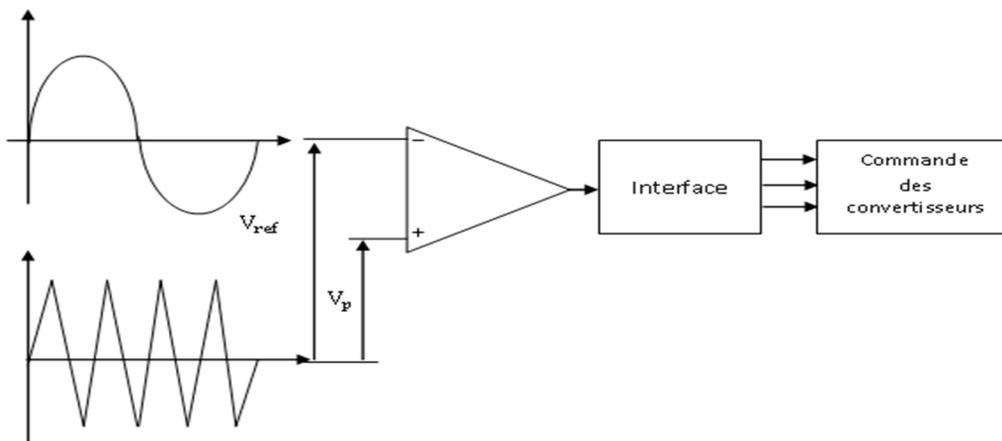


Figure. III.2. Principe de commande d'une MLI triangulo-sinusoïdale

L'indice de modulation est défini par :

$$m_r = \frac{f'}{f} \quad (\text{III. 24})$$

Le taux de modulation est défini par :

$$r = \frac{V\sqrt{2}}{V_p} \quad (\text{III. 25})$$

- V et f' sont l'amplitude et la fréquence de la tension sinusoïdale (modulante).
- V_p et f sont l'amplitude et la fréquence de tension triangulaire (porteuse).

III.10. Commande de la liaison au réseau

Un schéma global de la commande de la liaison au réseau est représenté sur la Figure III. 3

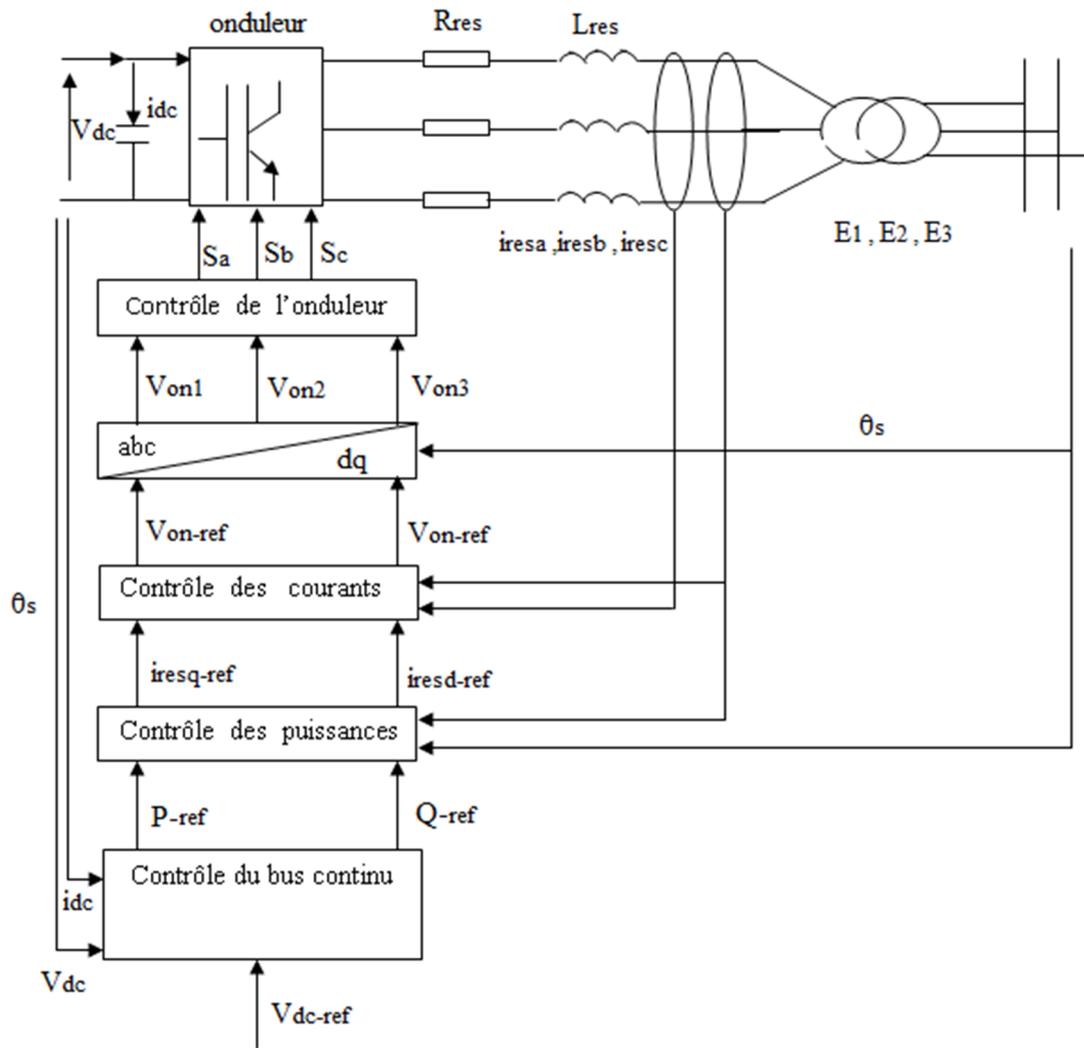


Figure III.3: Contrôle de la liaison réseau.

III.10.1. Contrôle du bus continu

Le contrôle de bus continu est réalisé avec une boucle qui permet de garder la tension du bus continu constante, au moyen d'un correcteur proportionnel intégral. La puissance dans la capacité est donnée par :

$$P_c = V_{dc} \cdot i_c \tag{III. 26}$$

Et sa référence est donnée par :

$$P_{c_ref} = V_{dc} \cdot i_{c_ref} \tag{III. 27}$$

Les pertes dans le convertisseur et dans le filtre sont considérées négligeables par rapport à la puissance transitée. On aura alors la figure III. 4

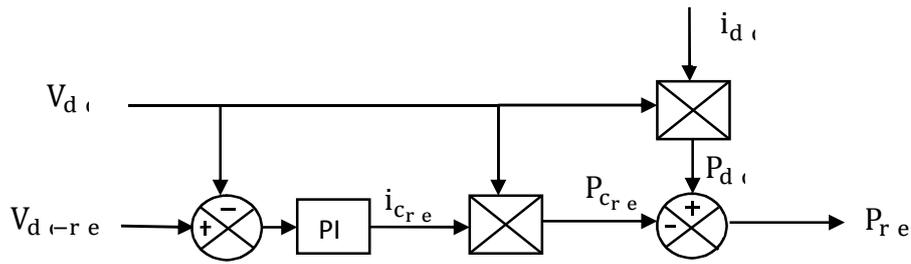


Figure III.4 : Contrôle du bus continu

III.10.2. Contrôle de puissance [27]

Le dispositif de commande permet d'imposer les courants transités à suivre leurs références. Cela entraîne les puissances active et réactive transitées suivantes :

$$P = E_d \cdot i_{resd} + E_q \cdot i_{resq} \tag{III. 28}$$

$$Q = E_q \cdot i_{resd} - E_d \cdot i_{resq} \tag{III. 29}$$

En multipliant l'équation (III.3) par E_d et l'équation (III.4) par E_q , on aura :

$$P \cdot E_d = E_d^2 \cdot i_{resd} + E_q \cdot E_d \cdot i_{resq} \tag{III. 30}$$

$$Q \cdot E_q = E_q^2 \cdot i_{resd} - E_d \cdot E_q \cdot i_{resq} \tag{III. 31}$$

En faisant la somme de ses deux équations, l'expression du courant i_{resd} est donnée par :

$$i_{resd} = \frac{P \cdot E_d + Q \cdot E_q}{E_d^2 + E_q^2} \tag{III. 32}$$

De la même manière, on aura l'expression du courant i_{resq} :

$$i_{resq} = \frac{P \cdot E_q - Q \cdot E_d}{E_d^2 + E_q^2} \tag{III. 33}$$

Il est donc possible d'imposer des références pour la puissance active P_{ref} et la puissance réactive Q_{ref} , en imposant les courants de références comme suit :

$$i_{resd_{ref}} = \frac{P_{ref} E_{d_{mes}} + Q_{ref} E_{q_{mes}}}{E_{d_{mes}}^2 + E_{q_{mes}}^2} \tag{III. 34}$$

$$i_{resq_{ref}} = \frac{P_{ref}E_{q_{mes}} - Q_{ref}E_{d_{mes}}}{E_{d_{mes}}^2 + E_{q_{mes}}^2} \quad (III. 35)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [16].

Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des tensions sinusoïdales au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau. La puissance réactive est imposée nulle $Q_{ref} = 0$.

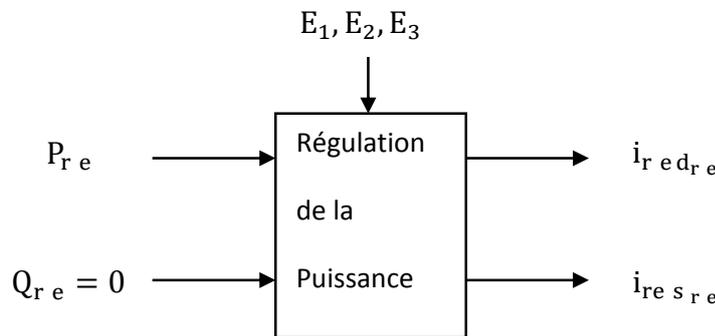


Figure III.5 : Contrôle de la puissance

III.10.3. Contrôle des courants envoyés au réseau [16]

Le contrôle des courants est obtenu par trois actions spécifiques :

- Une compensation de la liaison au secondaire du transformateur

$$e_q = L_{res}\omega_s i_{resq} \quad (III. 36)$$

$$e_d = L_{res}\omega_s i_{resd} \quad (III. 37)$$

- Une action de découplage des courants

$$v_{ond_{ref}} = v_{bd_{ref}} - e_q + E_{d_{mes}} \quad (III. 38)$$

$$v_{onq_{ref}} = v_{bq_{ref}} + e_d + E_{q_{mes}} \quad (III. 39)$$

- Un contrôle en boucle fermée des courants

$$v_{bd_{ref}} = [PI][i_{resd_{ref}} - i_{resd}] \quad (III. 40)$$

$$v_{bq_{ref}} = [PI][i_{resq_{ref}} - i_{resq}] \quad (III. 41)$$

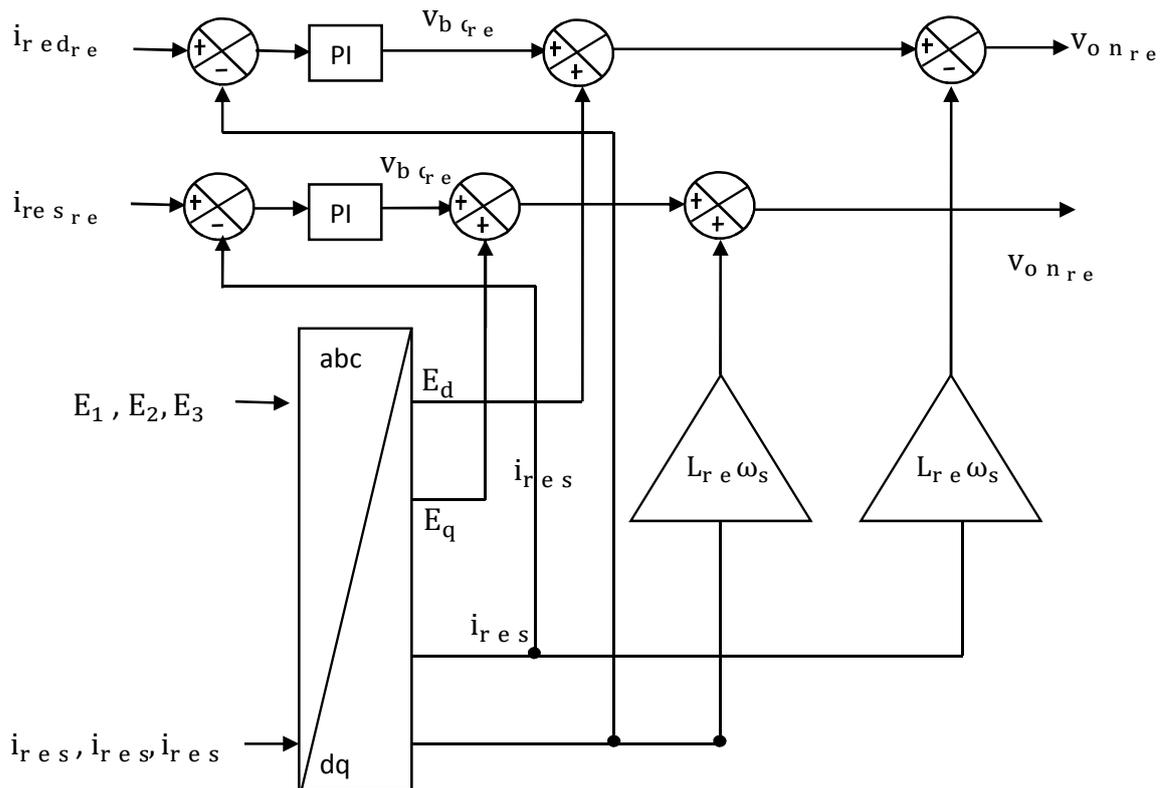


Figure III.6 : Contrôle des courants

III.10.4. Contrôle de l'onduleur

En appliquant la transformée inverse de Park à $V_{ond-ref}$ et $V_{onq-ref}$, on obtiendra les signaux de commande de l'onduleur (S_a, S_b, S_c) en appliquant la commande par MLI triangulo-sinusoidale, grâce à cette commande on pourra maintenir la tension du bus continu constante quelque soit la vitesse du vent et le sens de la puissance.

III.11. Conclusion

La commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique permet de traiter la machine asynchrone de façon semblable à la machine à courant continu à excitation séparé. Ainsi on a choisi l'orientation du flux rotorique car cette dernière permet d'obtenir un découplage total entre le flux et le couple.

Les résultats de la simulation numérique du modèle présenté dans ce chapitre seront présentés et interprétés dans la prochaine partie de notre travail.

CHAPITRE IV
RESULTATS DE
SIMULATION

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de simulation du système de conversion déjà étudié et modélisé sont présentés et interprétés en vue de montrer l'efficacité de la commande appliquée.

IV.2. Présentation et interprétation des résultats

On présente les résultats de simulation de la chaîne de conversion avec la commande proposée sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. On applique un profil du vent (vitesse variable) illustré dans la figure (IV.1). On considère le transformateur relié au réseau comme étant parfait avec un gain $N=1$. Le réseau est considéré parfait aussi. Les références de contrôle appliquées dans la commande sont les suivantes : $\Phi_{r_r e}=0.7$ Wb, $V_{d \bar{c}}=450$ V.

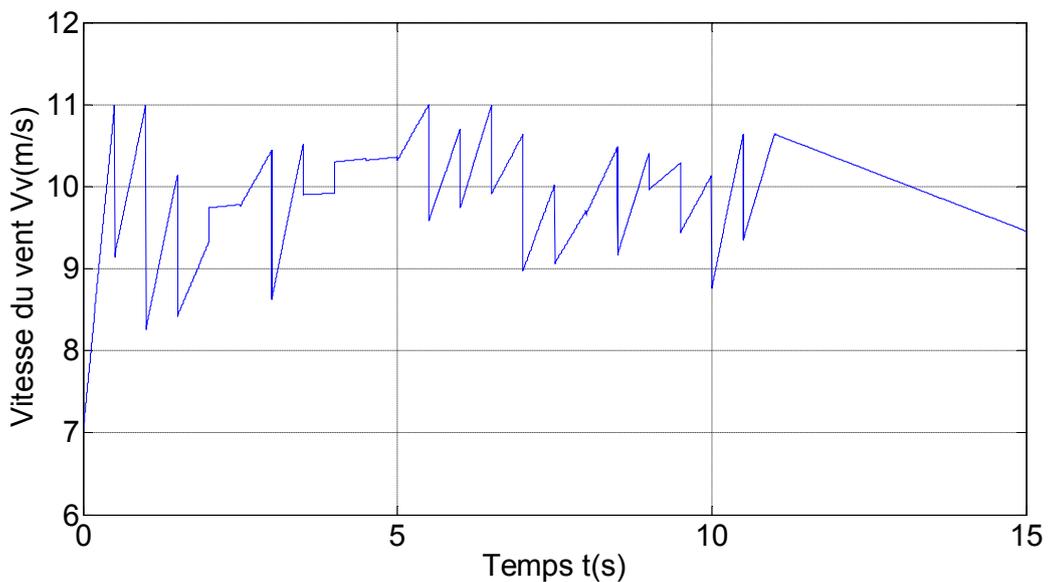


Figure IV.1 Vitesse du vent (Vv)

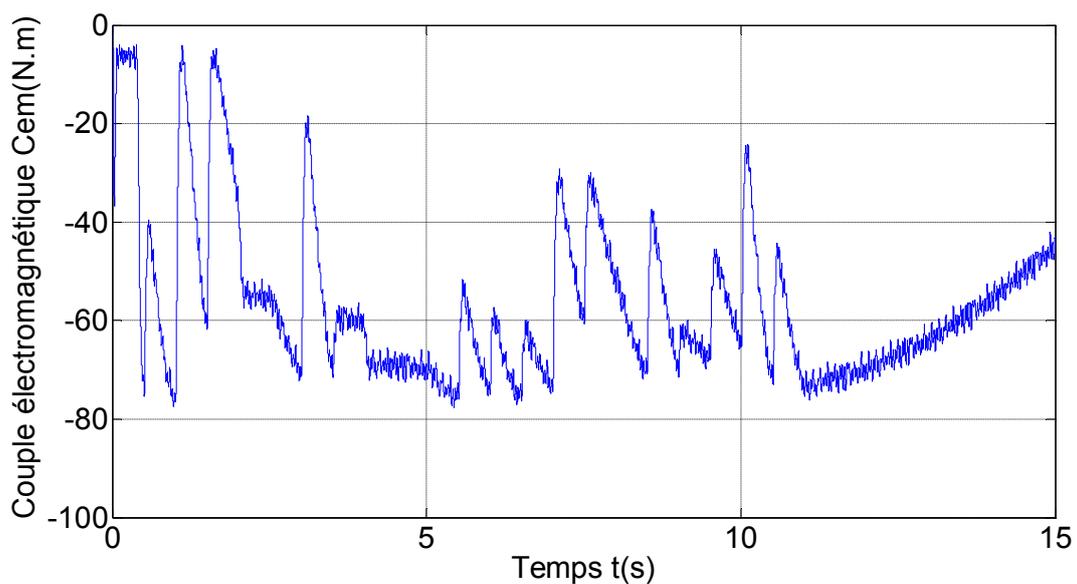


Figure IV.2 : Couple électromagnétique (Cem)

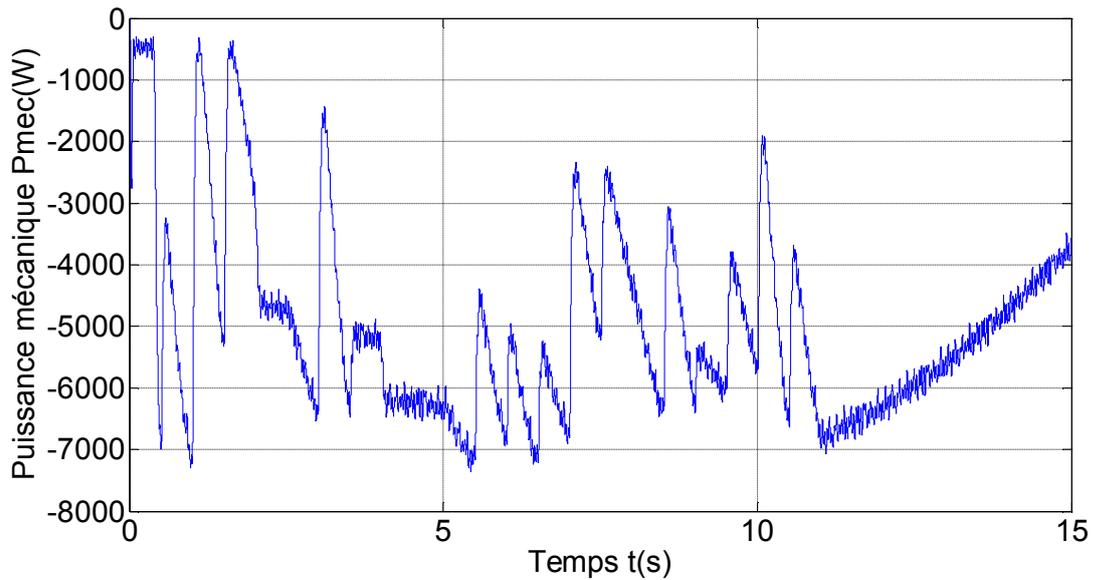


Figure IV.3: Puissance mécanique (P_{mec})

Les figures (IV.2 ; IV.3) montrent que le couple électromagnétique et la puissance mécanique transmis à la génératrice suivent bien le profil du vent appliqué.

L'application du contrôle vectoriel permet de maintenir le flux rotorique constant est presque égal à sa valeur de référence, est de générer des courants de référence d'allures sinusoïdales et dont l'évolution suit bien la variation du vent (fig IV.4 et fig.IV.5).

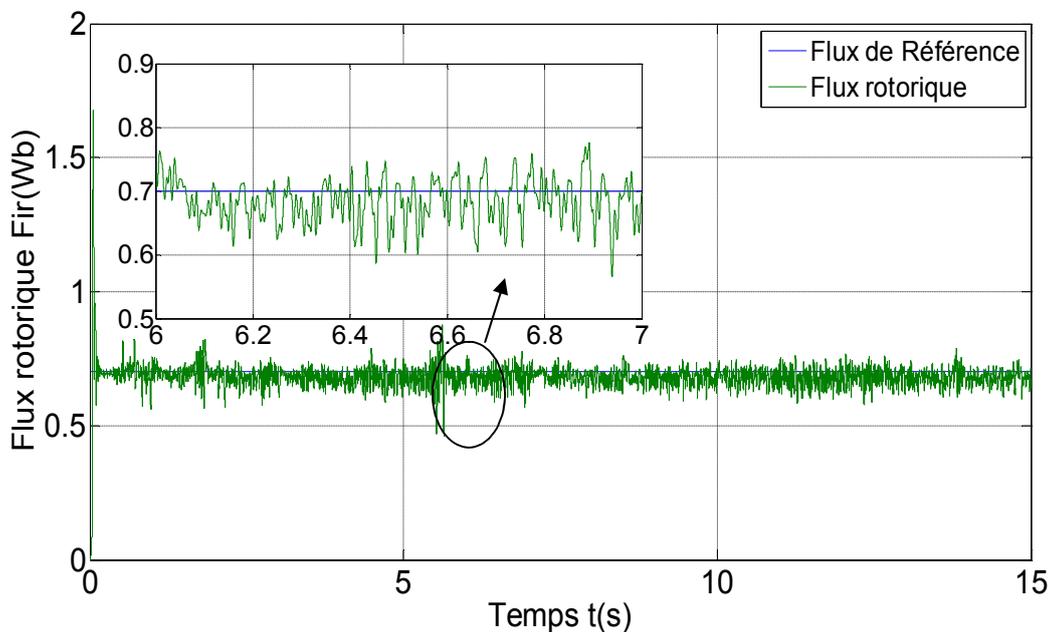


Figure IV.4 : Flux rotorique

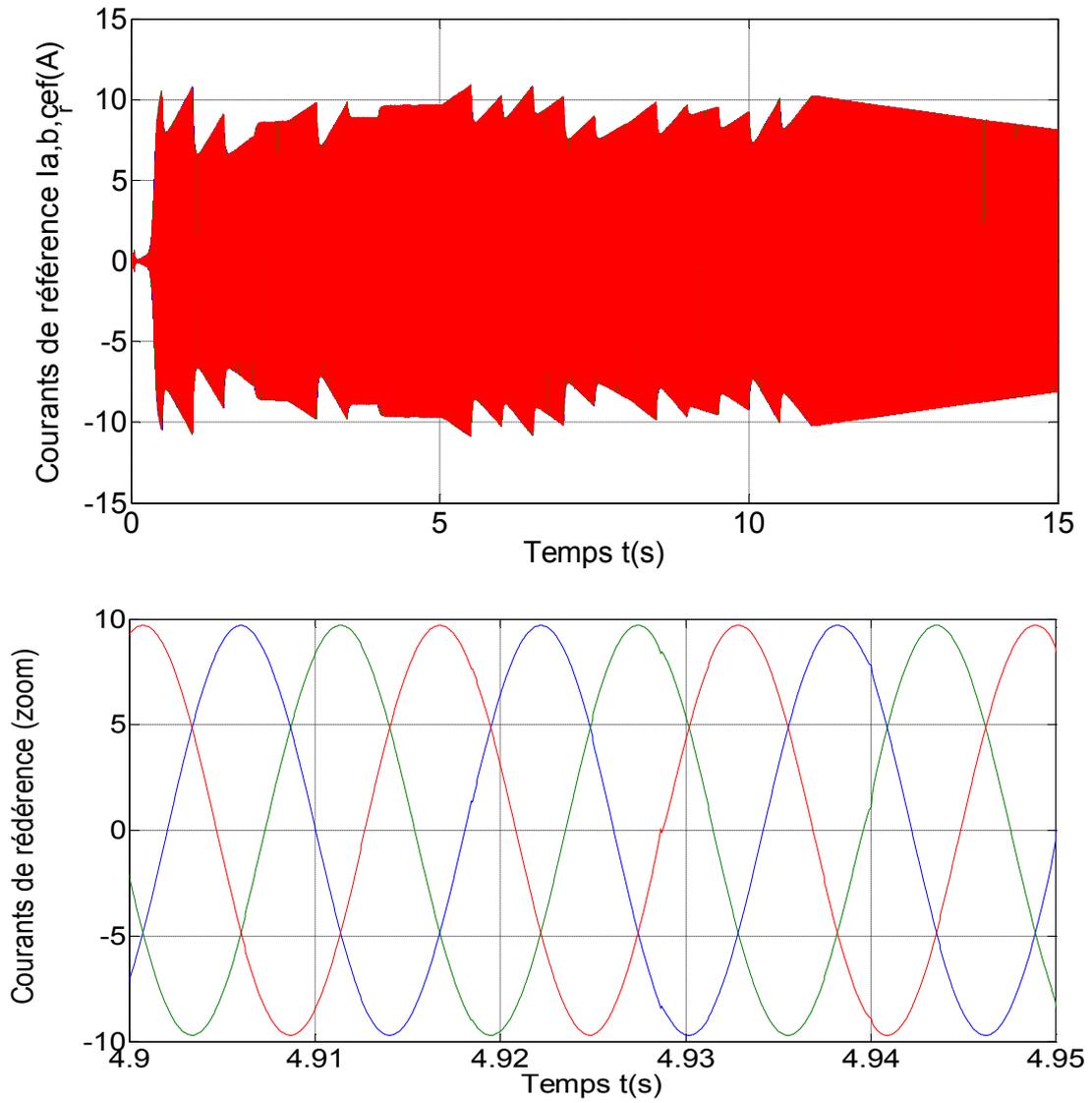


Figure IV.5 : les courants de référence ($I_{abc-ref}$)

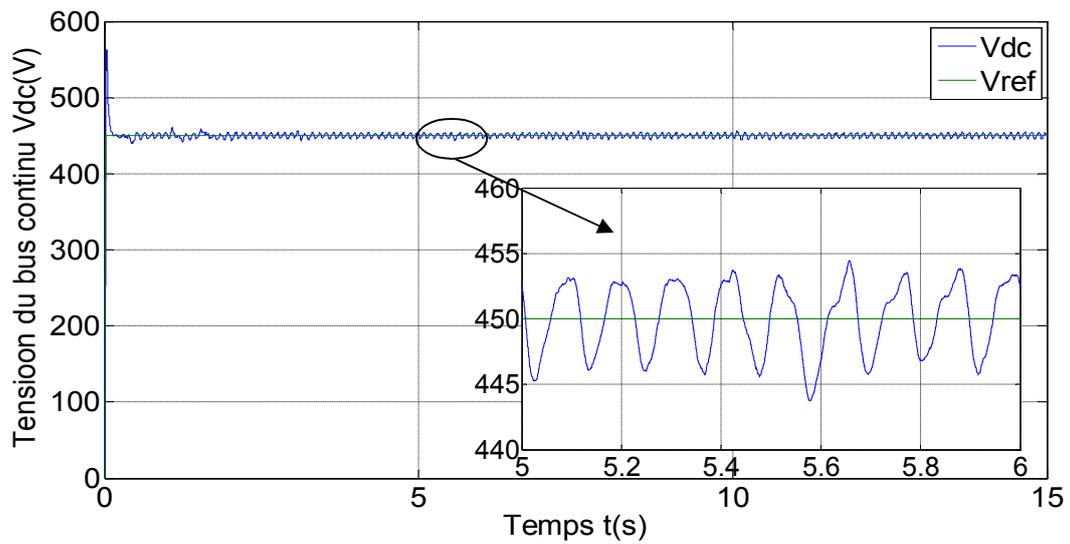


Figure IV.6 : Tension de bus continue (Vdc)

La tension du bus continue (Vdc) est maintenue constant autour de sa valeur de référence se qui permet d'avoir les tensions de phases constante a la sortie de l'onduleur

L'utilisation du contrôle vectoriel et de la régulation de la tension du bus continu permet d'avoir une tension constante à la sortie de l'onduleur. Cela est illustré sur la figure suivante :

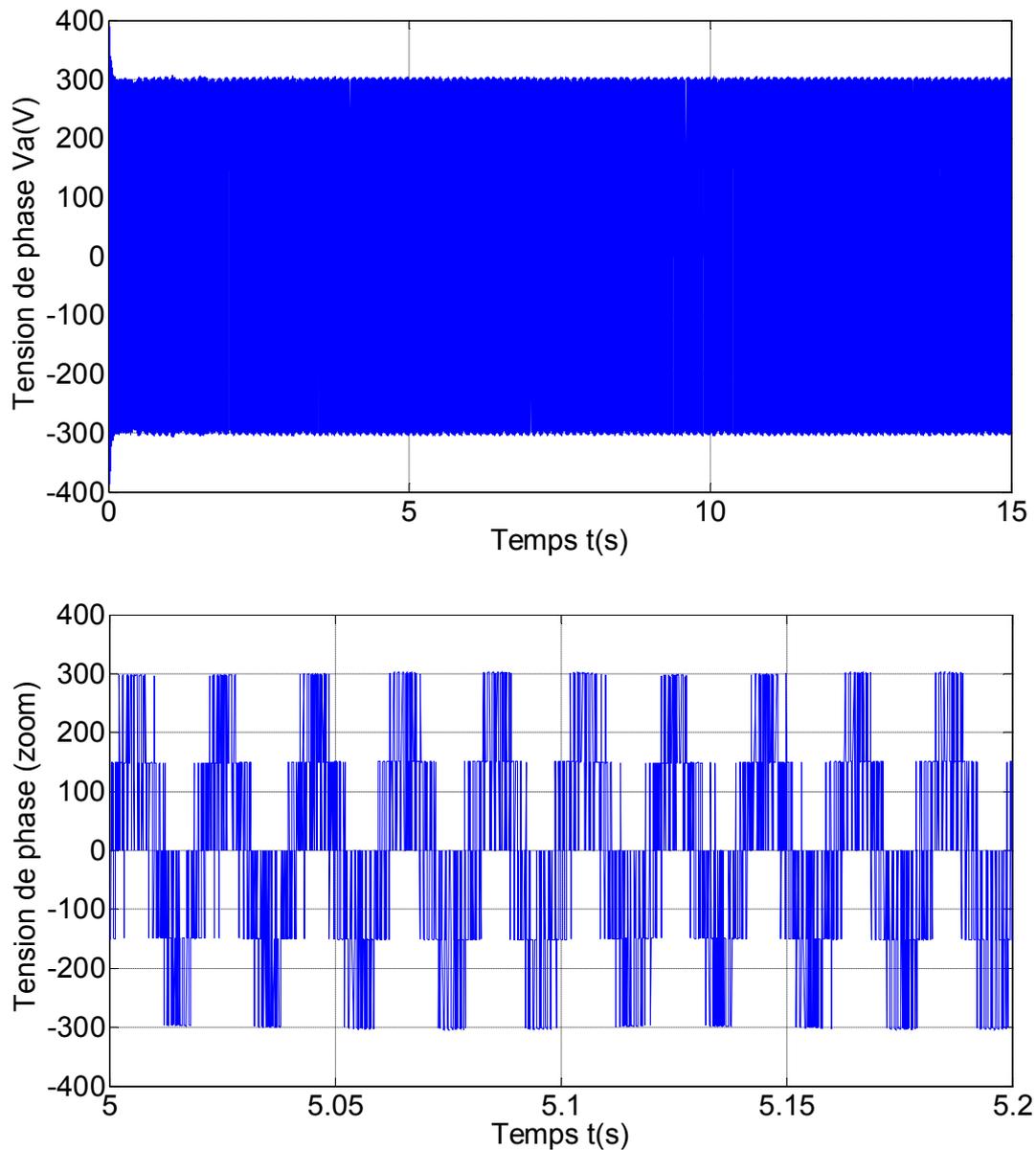


Figure IV.7 : tension de phase (Va)

La puissance active transmise au réseau est donnée par la figure IV.8 suivante :

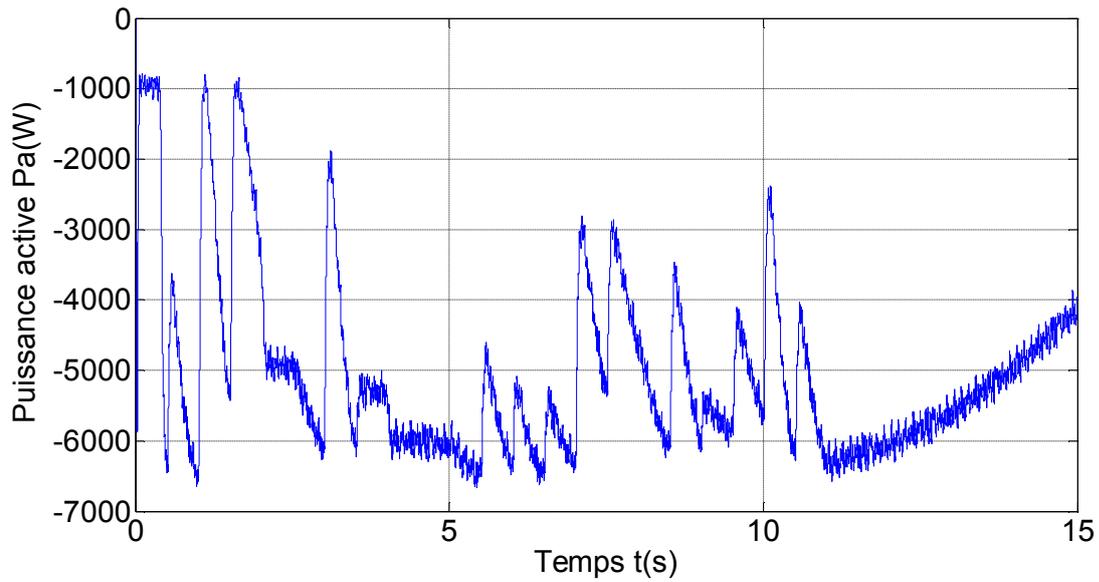


Figure IV.8 : puissance active (Pa)

Le transit de la puissance réactive entre le réseau est la génératrice prend l'allure de la figure suivante :

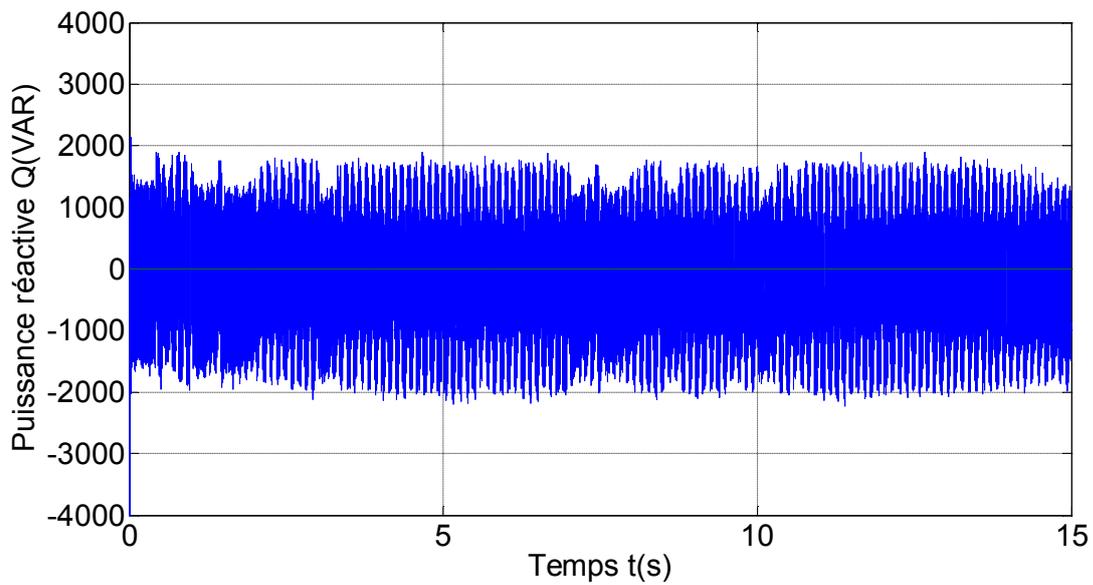


Figure IV.9 : Puissance réactive (Q)

Le courant envoyé au réseau suit bien la variation du vent tout en étant de forme sinusoïdale comme le montre la figure IV.10 suivante :

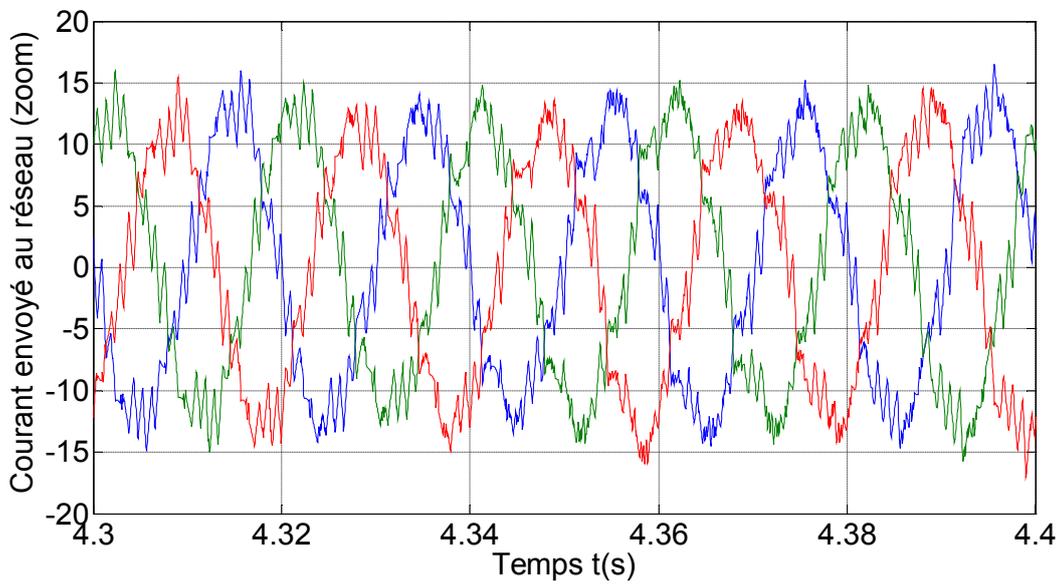
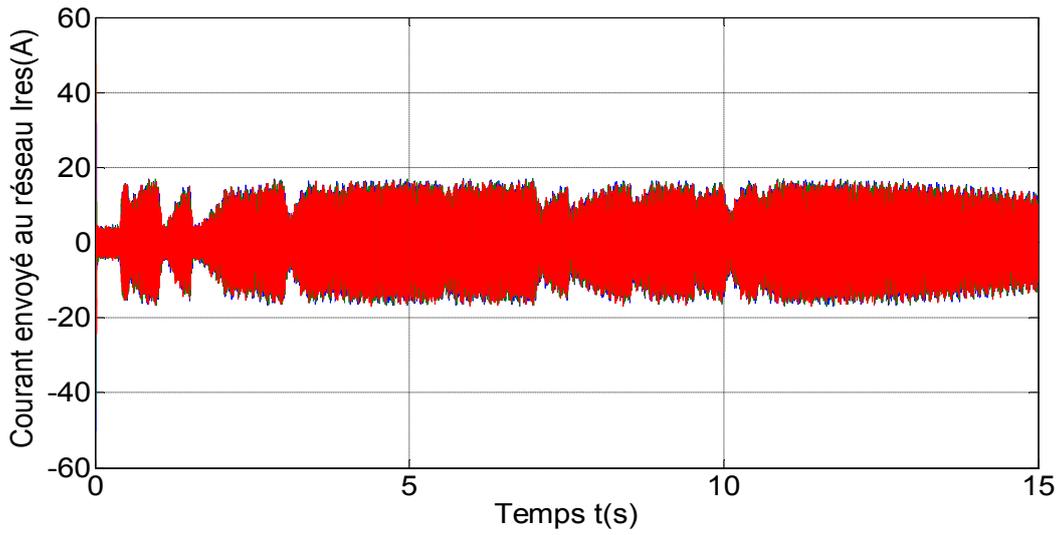


Figure IV.10 : Courant envoyé au réseau

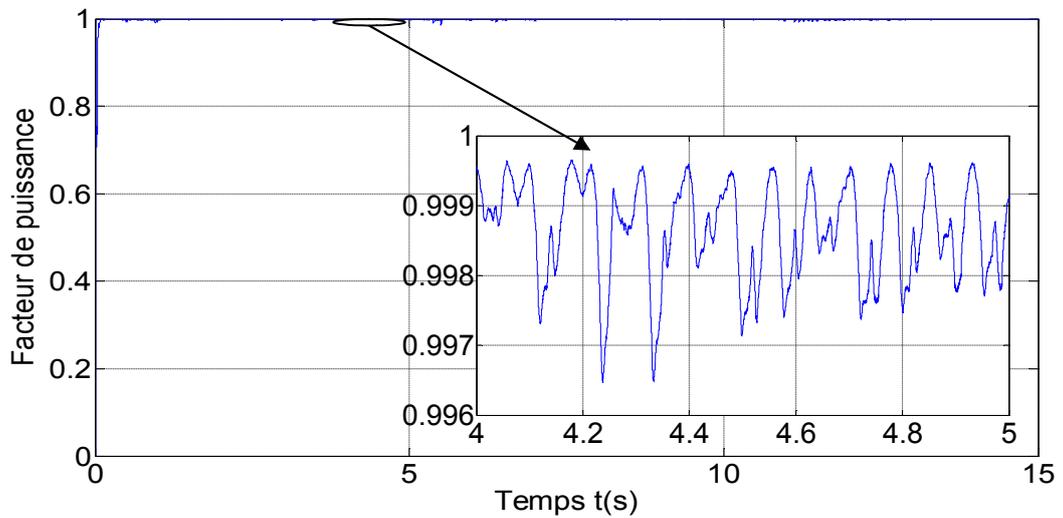


Figure IV.11 : Facteur de puissance ($\cos\varphi$)

CONCLUSION

A travers cette étude, on a montré l'intérêt de la commande vectorielle à flux rotorique orienté, qui offre une proportionnalité entre le couple de référence et le courant I_{sq} . Cette commande, nous a permis de simplifier le modèle de la machine asynchrone et aussi d'offrir un certain découplage de la régulation du couple, rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée

Les résultats obtenus par la commande utilisée (commande vectorielle pour la machine et régulation de puissance pour le réseau) montrent une bonne régulation de la puissance active envoyée au réseau avec une bonne régulation du couple électromagnétique et du flux rotorique. Ceci nous permet d'avoir un facteur de puissance pratiquement unitaire ce qui est l'objectif recherché par cette commande. Ces résultats montrent aussi la robustesse de la commande vis-à-vis de la variation de vitesse du vent qui est aléatoire.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la commande d'un système de conversion éolien basé sur une génératrice asynchrone à cage.

Dans le but de concevoir le principe de régulation de la vitesse mécanique, une étude aérodynamique de la pale a été faite. Un état de l'art a été présenté des différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Parmi les topologies citées, notre choix s'est porté sur l'aérogénérateur asynchrone à cage à vitesses variables avec redresseur et onduleur commandés par MLI.

Enfin, une modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne a été élaborée selon une structure de conversion d'énergie choisie, constituée d'une génératrice asynchrone à cage, pilotée par le stator par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu placé en aval de ce convertisseur, garde par un contrôle adéquat sa tension constante. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un autre convertisseur contrôlé par MLI, un filtre de lissage, et un transformateur.

Compte tenu de la complexité du système étudié, deux dispositifs de commande, complètement séparés ont été développés. Le premier dispositif est basé sur la commande vectorielle de la génératrice pour pouvoir extraire la puissance maximale du vent, alors que le deuxième est consacré au contrôle de la liaison au réseau, avec la régulation du bus continu. Cette commande a pour but de réguler la puissance générée et de garder le facteur de puissance pratiquement unitaire quel que soit les variations de la vitesse du vent.

En vue de contribuer dans le domaine du développement des énergies propres et durables et afin de terminer le travail théorique proposé, il serait intéressant d'implanter la méthode de commande proposée ainsi que d'autres méthodes plus prometteuses comme la commande par logique floue, contrôle direct du couple et les réseaux de neurone,....etc.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE

- [1] F. Poitiers , "étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, à l'école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [2] A. mirecki – « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.
- [3] K. Idjdarene <<Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes>>] Thèse de doctorat, Université Abderrahmane MIRA – Béjaia (Algérie),2010
- [4] H. Camblong, « minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » ,thèse de doctorat ,école national supérieure d'arts et métiers ,centre de bordeaux, France,18 décembre 2003
- [5] S. Hamour «Modélisation et simulation des différentes techniques d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone dédié à l'éolienne » projet de fin d'études, université A. Mira de Bejaia, 2006
- [6] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [7] B. Robyns (responsable) et S. Labrique (réalisation), site: www.e-lee.net –« Composants classiques d'une éolienne », consulté juin ; 2009
- [8] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne,"<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [9] L. Chang – « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review – summer / pp. 1-5/ Eté 2002,.

REFERENCE

- [10] 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 I, 11 décembre 2006.
- [11] J. Martin – « Energies éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, vol. B 1360, 1990.
- [12] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [13] Gabriel O. Cimuca, "Système Inertiel de Stockage d'Energie Associe a des Générateur Éoliens", Thèse de Doctorat, Ecole national d'arts et Métiers Centre de Lille, France. 2005.
- [14] A.M. Andreica ; « Système aérogénérateur synchrone couple au réseau », Thèse de Master de l'institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [15] L. BAGHLI ; «Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone», cours IUFM de Lorraine – UHP, 2005
- [16] : S. El Aimani «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans Un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, France 2004.
- [17].R.abdelli,D.rekioua,T,reakioua ;international conférence on electronic and electrotechnic and automatic, campus targa ouzmour université de Bejaia ;02et03 novembre2010.
- [18] J. CHATELAIN, "Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X", Presse Polytechniques romandes, édition GEORGI, 1983.
- [19]T.RIADE, contribution a la commande directe du couple de la machine asynchrone, thèse de doctorat, université mentour_consttantene, 2008

REFERENCE

[20] A. SAKI, M. BELAIDI, "Etude d'un générateur asynchrone dans La production d'énergie électrique par éolienne", projet de fin d'études, ENSP, Juin 2006.

[21] L. BAGHLI<< Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques>>Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999

[22] A. Faidallah – « Contribution à l'identification et à la commande vectorielle des machines asynchrones », Thèse de doctorat, l'I.N.P de Lorraine, Nancy, France, 1995.

[23] J. P.; Hautier, *Modélisation et commande de la machine asynchrone*, Ed Technip, 1995.

[24] T. Boutabba « Commande vectorielle en temps discret d'une Machine à induction », Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2008.

[25] G. Buche « Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/Simulink », Mémoire d'ingénieur C.N.A.M. Conservatoire National des Arts et Métiers. Centre régional associé de Grenoble (C.U.E.F.A), France, 2001.

[26] :J. Laroche«électronique de puissance», Dunod, France 2005.

[27] : B. François, B. Robyns, E. Dejaeger «Solutions pour la connexion et l'apport aux services "système" d'éoliennes connectées au réseau de moyenne tension», journée SEE-SRBE : « Eoliennes et réseaux : Enjeux », Lille, France 2005.

ANNEXE

ANNEXE**Paramètres de la turbine**

La puissance nominale : $P_t = 7.5 \text{ kW}$

Rayon : $R_t = 3,24 \text{ m}$

La vitesse nominale : $\Omega_t = 296 \text{ tr/mn}$

Vitesse moyenne du vent : $V_v = 9.25 \text{ m/s}$

Le multiplicateur : $G = 3,1475$

Paramètres de la machine asynchrone

Les caractéristiques électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn
- $R_s = 1.07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $L_s = 0.1137 \text{ mH}$
- $L_r = 0.1096 \text{ mH}$

Les paramètres mécaniques

- $J = 0,230 \text{ kg.m}^2$
- $f = 0,0025 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$

Paramètres de simulation

Les paramètres du bus continu

- Générateur de tension continu de 450 V
- Capacité du bus continu $C = 1000 \mu\text{F}$

Régulateurs

Régulateur du flux et du couple PI : $K_i = 20$ et $K_p = 17$

Régulateur de la tension continue PI : $K_i = 1$ et $K_p = 0.908$

Pas de simulation est de 0.00001s

RESUME

Ce travail présente l'étude et la commande de la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne. Pour cela, un modèle est établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, MAS et redresseur –onduleur) et une commande vectorielle de la machine est effectuée. La technique de commande par MLI triangulo-sinusoidale est appliquée à l'onduleur et le redresseur est commandé par la technique de la MLI vectoriel pour la dégradation du réseau. Cette étude est conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous pouvons ainsi constater la capacité de la MAS à intégrer ce genre d'application.

Mots clés : Machine asynchrone à cage, éolienne, modélisation, onduleur, redresseur, commande vectorielle.