REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en génie électrique

Option : Commande et électronique industriel

Thème

Commande d'une machine asynchrone double alimentation alimentée par convertisseur matriciel

Réalisé par :

- ✓ *GUEDDOUCHE Hamza*
- ✓ *SERRAH Mohamed*

Dirigé par le promoteur:

M. BETTACHE Farouk

Co-promoteur

Dr MOUALDIA Abdelhafid

Promotion 2014

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu Allah pour nous avoir donné le courage, la patience et la force nécessaires pour venir au bout de ce travail.

Nous remercions très chaleureusement nos familles pour leur patience et soutien.

Nos vifs remerciements s'adressent tout particulièrement à notre Promoteur monsieur Mr BETTACHE.F et notre co-promoteur Dr.MOUALDIA.A pour leurs precieux conseils, leurs aide et leurs patience durant toute la durée du ce travail.

Nous remercions tous les enseignants du département de génie électrique et informatique.

Nous n'oublierons pas tous ceux nous aidés de près ou de loin tout le long de notre étude.

GUEDDOUCHE Hmaza et SERRAH Mohamed

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour leur encouragement durant la période de mes études,

Toute ma famille,

Tous les camarades du groupe de commande et électronique industriel,

Tous mes amis,

GUEDDOUACHE Hamza

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents,

Toute La famille,

Tous mes amis.

SERRAH Mohamed

ملخص:

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة على دراسة محرك لا تزامني ثنائي التغذية مغذي من طرف محول مصفوفي ومراقب بواسطة تقنية التدفق المغناطيسي الموجه. و لهذا قمنا بتمثيل المحرك الا تزامني ثنائي التغذية و المموج السلسلي على شكل معادلات رياضية, وللحصول علي التردد و الطويلة المرغوب فيهما فقد قمنا باستعمال تقنيتين للتحكم في المموج السلسلي وهما: تقنية التحكم لثلاث مجلات و تقنية التحكم الشعاعي .و أخيرا قمنا بمقارنة بين ثلاثة أنواع من المعدلات في عملية تعديل سرعة المحرك وهم على التوالي: معدل تناسبي تكاملي , معدل تكاملي تناسبي ومعدل ذات البنية المتغيرة.

كلمات مفتاحيه:

محرك لاتزامني ذو ثابتين، محول مصفوفي ، تقنية التحكم لثلاث مجلات، تقنية التحكم الشعاعي، معدل تناسبي تكاملي.

Résumé :

Ce travail a pour but l'étude de la régulation de la vitesse par des régulateurs classiques et structure variables d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur AC/AC et commandée par la technique du flux orienté. Pour cela, nous avons modélisé la machine asynchrone double alimentation, et le convertisseur matriciel. Afin d'obtenir l'amplitude et la fréquence de la tension désirée, nous avons utilisé deux stratégies de commande du convertisseur matriciel, la stratégie de modulation à trois intervalles, la stratégie de modulation vectorielle. Et enfin, pour une étude comparative, les régulateurs PI et à structures variables sont proposés.

Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, Convertisseur matriciel, Stratégie de modulation à trois intervalles, Stratégie de modulation vectorielle, Régulateurs PI.

Abstract:

The purpose of this work is the study of the regulation speed by traditional regulators and to variable structures of an asynchronous machine with double supply supplied with converter AC/AC using direct field oriented control. For that, we modelled the asynchronous machine double supply, and the matrix converter. In order to obtain the amplitude and the frequency of the wished tension, we used two strategies of ordering of the matrix converter, the strategy of modulation with three intervals, the strategy of vectorial modulation. And finally, for a comparative study, regulators PI and with variable structures are proposed.

Key words: Asynchronous machine double supply, Matrix converters, Strategy of PWM with three intervals , Strategy of vectorial modulation, Regulators PI.

SOMMAIRE

Résumé ..... ***i***

Sommaire ..... ***ii***

Liste des figures ..... ***iv***

liste des symboles ..... ***vi***

Introduction générale ***1***

Chapitre I: Etat de l'art des génératrices éoliennes

I.1 Introduction *3*

I.2 La production éolienne *4*

I.3 Définition de l'énergie éolienne *4*

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne *5*

I.5 Les différent type des turbines éoliennes *5*

I.5.1 Les éoliennes à axe vertical 5

I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal 6

I.6 Principaux composants d'une éolienne 7

I.7 Protection contre la corrosion *8*

I.8 Energie cinétique du vent *9*

I.9 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne 12

I.9.1 Types de machines électriques 12

I.10 Energie cinétique du vent *24*

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone double alimentation et convertisseur matriciel

II.1 Introduction *25*

II.2 Modélisation de la MADA *25*

II.2.1 Hypothèses simplificatrice 25

II.2.2 Equations électriques de la machine 26

II.2.3 Equations mécaniques de la machine 27

II.2.4 Les puissances actives et réactives de la MADA 29

II.2.5 Choix du référentiel 30

II.2.6 Mise sous forme d'équations d'états 31

II.3 Résultats de simulation *32*

II.3.1 Fonctionnement moteur à vide 32

II.3.2 Fonctionnement moteur en charge 33
II.3.3 Fonctionnement génératrice 35
II.3.4 Fonctionnement génératrice 36
II.4 Association convertisseur AC/AC – machine asynchrone double alimentation *37*
II.4.1 Introduction 37
II.4.2 Convertisseur matriciel 37
II.4.3 Modulation sinusoïdale des tensions de phase de la charge 45
II.4.4 Stratégies de modulation 47
II.4.5 Simulation et interprétation du convertisseur matriciel seul 51
II.5 Performances de l'association convertisseur matriciel machine asynchrone à double alimentation 52
II.5.1 Résultats de simulation 53
II.5.2 Interprétation des résultats 53
II.6 Conclusion *41*

Chapitre III: Commande vectorielle du générateur éolien avec convertisseur matriciel

III.1 Introduction 55
III.2 Modèle simple 55
III.3 **C**ontrôle directe de puissance 59
III.4 Mise en place de la régulation 59
III.5 Synthèse du régulateur PI 60
III.6 Simulation et interprétation des résultats 62
III.7 Fonctionnement en MPPT 63
II.7.1 Stratégie MPPT 63
III.8 Contrôle indirecte de puissance par le régulateur PID 64
III.8.1 Commande avec boucles de puissance 65
III.8.2 Simulation et interprétation des résultats 66
III.8.3 Interprétation 67
III.9 Conclusion 67

Conclusion générale **68**
Annexe **70**
bibliographie ***71***

Liste des figures

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent 4
Figure I.2 : Eolienne à axe vertical 6
Figure I.3 : Eolienne a axe horizontal 6
Figure I.4 : Eléments constituants une éolienne 7
Figure I.5 : Tube de courant autour d'une éolienne 9
Figure I.6 : Coefficient de puissance 10
Figure I.7 : Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes 11
Figure I.8 : Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent 12
Figure I.9 : Machine synchrone connectée directement au réseau 13
Figure I.10 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance 13
Figure I.11: Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles 15
Figure I.12 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau 15
Figure I.13 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance ……..16
Figure I.14 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA 18
Figure I.15 : Cascade hypo synchrone 18
Figure I.16 : Machine asynchrone à double bobinage statorique 19
Figure I.17 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor ... 20
Figure I.18 : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices 20
Figure I.19 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation 22

Figure II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation 25
Figure II.2 : Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park)……..27
Figure II.3 : Fonctionnement moteur à vide (Cr = 0) 33
Figure II.4 : Fonctionnement moteur en charge (Cr =49 N.m) à l'instant (t= 3s) 34
Figure II.5 : Fonctionnement génératrice…… 36
Figure II.6 : Schéma de principe des convertisseurs matriciels 38
Figure II.7 : Commutateur bidirectionnel équivalent 38
Figure II.8 : Schéma de principe d'une cellule de commutation du convertisseur matriciel 39
Figure II.9 : Exemple pour la définition du vecteur de l'état de commutation de la matrice 40

Liste des figures

Figure II.10 : Modèle du convertisseur matriciel avec circuit intermédiaire fictif..... 41
Figure II.11 : Redressement hypothétique des tensions d'alimentation…….. 42
Figure II.12 : La forme de la tension intermédiaire fictive Uef..... 44
Figure II.13 : PWM à trois intervalles qui commande la phase X de sortie..... 48
Figure II.14 : Structure du PWM à trois intervalles 50
Figure II.15 : Variation du fondamental et du taux d'harmoniques en fonction de r pour (m=21, fs=50Hz) ……50
Figure II.16.a: Caractéristiques des tensions Vx de sortie de convertisseur matriciel commandé par la stratégie de modulation à trois intervalles (m=18, fs= 50 Hz). 50
Figure II. 16.b, c : Caractéristiques des tensions Vx de sortie de convertisseur matriciel commandés par la stratégie de modulation à 3 intervalles (m=21, m=30, fs= 50Hz)…….. 52
Figure II.17 : les résultats de la simulation..... 53

Figure III.1 : Schéma bloc de la MADA 58
Figure III.2 : Schéma bloc de la commande directe 59
Figure III.3 : Système Régule par un PI 60
Figure III.4 : Résultats de la simulation directe de puissance par PI..... 62
Figure III.5 : Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent 64
Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance 65
Figure III.7 : Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance..... 66

Liste des symboles

V1	Vitesse du vent en amont
V2	Vitesse du vent en aval
ρ	La densité d'air
S	La surface active de la voilure
m	La masse d'air en mouvement
Pm	La puissance extraite du vent
Pmt	La puissance totale théorique
Cp	Le coefficient de puissance
$\boldsymbol{\lambda}$	La vitesse relative
P_{max}	La puissance maximale
R	Le rayon de la voilure
Ω_1	La vitesse de rotation avant multiplicatrice
Ω_2	La vitesse de rotation après multiplicateur
Pmg	La puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur
g	Le glissement
p	La puissance transmise entre le stator et le rotor
I_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques
I_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques
I_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d,q)
I_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d,q)
I_{uvr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (u,v)
I_{uvs}	Composantes du courant statorique dans le repère (u,v)
p	Nombre de paires de pôles
V_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques
V_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques
V_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d,q)
V_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d,q)
V_{uvr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (u,v)
V_{uvs}	Composantes de tension statorique dans le repère (u,v)
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor
ω_s	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant
Φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques
Φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques

Φ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d,q)
Φ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère (d,q)
Φ_{uvr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (u,v)
Φ_{uvs}	Composantes du flux statorique dans le repère (u,v)
$P(\theta)$	Transformation de Park directe
MADA	Machine Asynchrone a double alimentation
s, r	Indices respectifs du stator et du rotor
(As,Bs,Cs)	Respectivement indices correspondants au système de phase tatorique.
ar, br, cr	Indices correspondants aux trois phases rotorique
d, q	Axes correspondants au référentiel de Park
rs, rr	Résistances des enroulements statoriques et rotorique de phases
Ls, Lr	Inductance propres de fuite statorique et rotorique de phases
Lm	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor
Ls, r	Inductance mutuelle entre phases du stator
φ_s, φ_r	Flux statorique, rotorique
Tr	Constantes de temps statorique et rotorique
p	Nombre de paire de pôles
Cem	Couple électromagnétique
J	Moment d'inertie
Kf	Coefficient de fortement
Ω	Vitesse mécanique du rotor
m	Indice de modulation
r	Taux de modulation
τ	Fonction de modulation
Ucm	Fonction d'ondulation, de la phase
Ui,Uj	(i =x, y, z), (j =a, b, c): Tensions simples / au neutre du réseau
Vl	(l=x, y, z) : Tension par rapport au neutre de la machine
Kp	Paramètre de l'action proportionnelle
Ki	Paramètre de l'action intégrale
Ueq	Commande équivalente
Un	Commande en relais
K	Gain de commande Un

Introduction générale

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables.

De nos jours, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production éolienne supérieure à 1MW. Pour une même puissance de production, celle-ci permet de réduire la puissance des convertisseurs de puissance tout en générant une puissance de sortie importante par rapport aux autres technologies des machines.

Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisse matricield'électronique de puissance pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienneest contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recher chant chaque fois le point de fonctionnement pour utilise maximum de puissance.

Le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation d'une machines de type asynchrone à double alimentation dans un système éolien.

Dans le premier chapitre nous donnerons un regard générale sur les generatrice éolienne, l'energie éolienne, les type des turbines et aussi les type des machines électriques tout en basant sur la machine asynchrone à double alimentation.

Quant au deuxième chapitre nous allons présenté la modélisation de notre système éolienne (MADA+ le convertisseur matriciel) tout en donnat les résulatats de simulation de ces modèles en fonctionnemnt à vide, en charge et fonctionnement génératrice.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active statorique et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par le convertisseur matriciel qui est entraînée par la turbine éolienne par un régulateur PI.

On achèvera ce travail par une conclusion générale, au cours de laquelle on dressera un bilan sur les travaux déjà réalisés et les développements futurs capables d'étoffer un tel travail.

CHAPITRE I

Etat de l'art des génératrices éoliennes

I.1 Introduction

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

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les déférents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

1.2 La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié 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. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

I.3 Définition de l'énergie éolienne

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

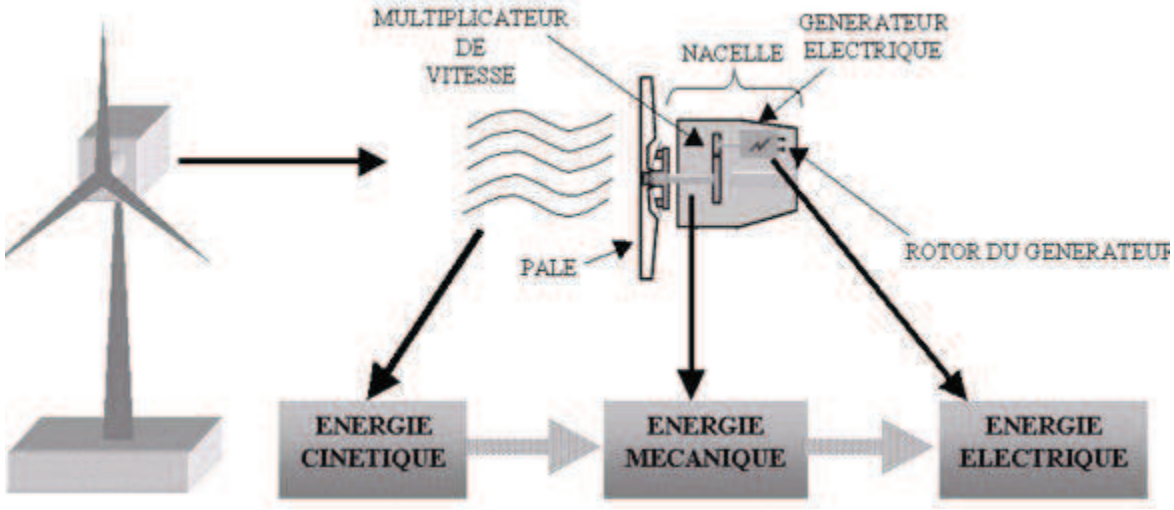


*Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent **[1]***

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences **[2].**

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

I.5 Les différent type des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles **[3],[1]** :

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

I.5.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne (figure I.2) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente 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, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal **[4].**



Figure I.2 : Eolienne à axe vertical ***[5]***

I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (figure I.3) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol **[5].**

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi- pales.



Figure I.3 : Eolienne a axe horizontal ***[5]***

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 W.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice **[5].**

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.1 : la classification des turbines selon la puissance

I.6 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure I.4).

- **le mât**
- **la nacelle**
- **le rotor**

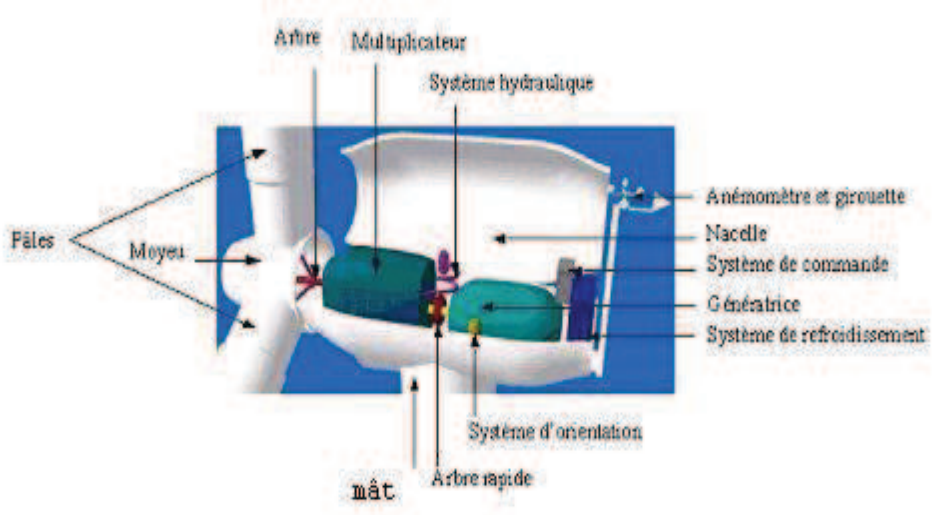


Figure I.4 : Eléments constituants une éolienne

a- Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol **[1].**

b- La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de

refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

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

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

c- Le rotor

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 étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, a pollution visuelle et le bruit **[6].**

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

c-1 Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Ce système allie ainsi simplicité et faible coût **[1].**

c- 2 Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) **[1].**

I.7 Protection contre la corrosion

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le noyau du rotor, sont galvanisés.

I.8 Energie cinétique du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active *S* de la voilure **[7].**

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.5 sur lequel on a représenté la vitesse du V1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V2 soit $\frac{V1+V2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho\, S(V_1+V_2)}{2} \qquad \textbf{(I-1)}$$

La puissance *Pm* alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de newton).

$$Pm = \frac{m(V_1^2-V_2^2)}{2} \qquad \textbf{(I- 2)}$$

Soit en remplaçant m par son expression

$$Pm = \frac{\rho\, S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \qquad \textbf{(I- 3)}$$

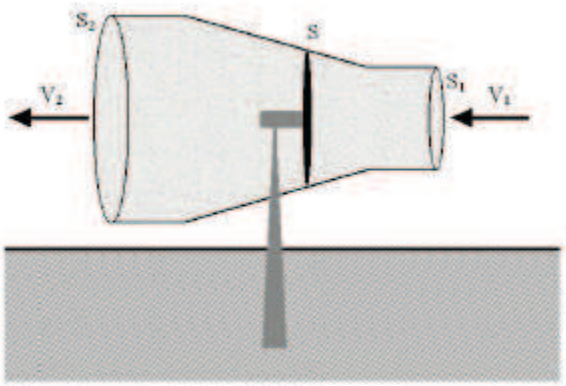


Figure I.5 : Tube de courant autour d'une éolienne ***[7].***

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface *S* sans diminution de vitesse, soit à la vitesseV_1, la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$Pmt = \frac{\rho\, S\, V_1^3}{2} \qquad \textbf{(I- 4)}$$

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

$$\frac{Pm}{Pmt} = \frac{\left(1+\left(\frac{V1}{V2}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V1}{V2}\right)^2\right)}{2} \qquad \textbf{(I- 5)}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure I.6), on s'aperçoit que le ratio $\frac{Pm}{Pmt}$ appelé aussi coefficient de puissance *Cp* présente un maxima de $\frac{26}{27}$ soit 0.59 ; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative $\boldsymbol{\lambda}$ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

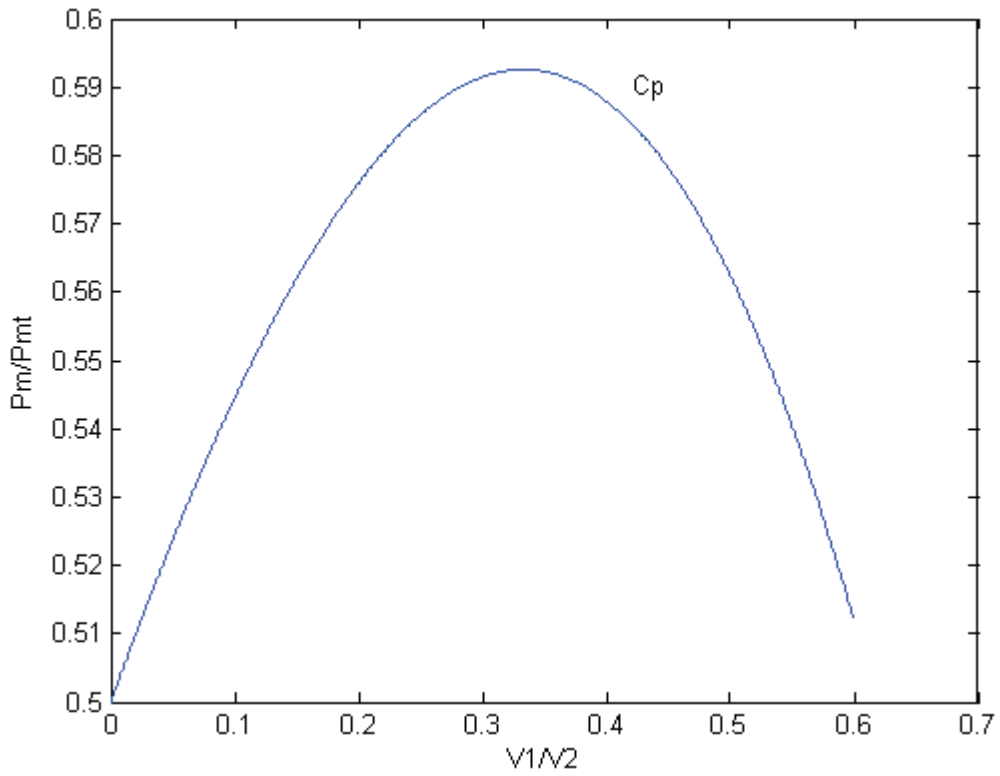


Figure I.6 : Coefficient de puissance

La figure I.7 donne un aperçu sur les coefficients de puissance *Cp* habituels en fonction de la vitesse réduite l pour différents types d'éoliennes.

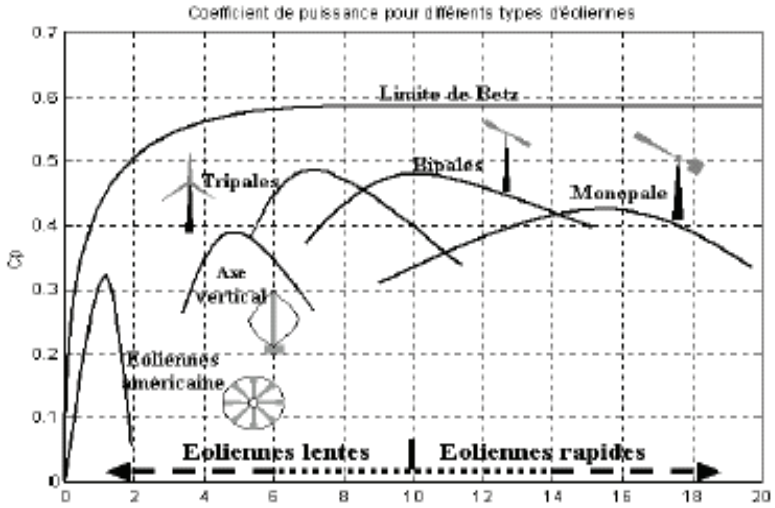


Figure I.7 : Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes ***[7]***

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P\text{max}=\frac{16}{27}Pmt=0.59\ Pmt \qquad \textbf{(I- 6)}$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini **[7]** :

$$C_p^{opt}=\frac{P_{max}}{Pmt}=\frac{2P_{max}}{\rho\, S\, V_1^3}=0.59 \qquad \textbf{(I- 7)}$$

En combinant les équations (I-1),(I- 4) et (I- 5) , la puissance mécanique *Pm* disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$\text{P}m=\frac{\text{P}m}{\text{P}mt}\text{P}mt=Cp\ \text{P}mt=1/2\ Cp(\boldsymbol{\lambda})\ \rho\pi R^2V_1^3 \qquad \textbf{(I- 8)}$$

La figure I.8 présente la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

Avec : $\boldsymbol{\lambda}=\frac{\Omega_1 R}{\text{V1}}$

Ω_1: Vitesse de rotation avant multiplicateur de vitesse K

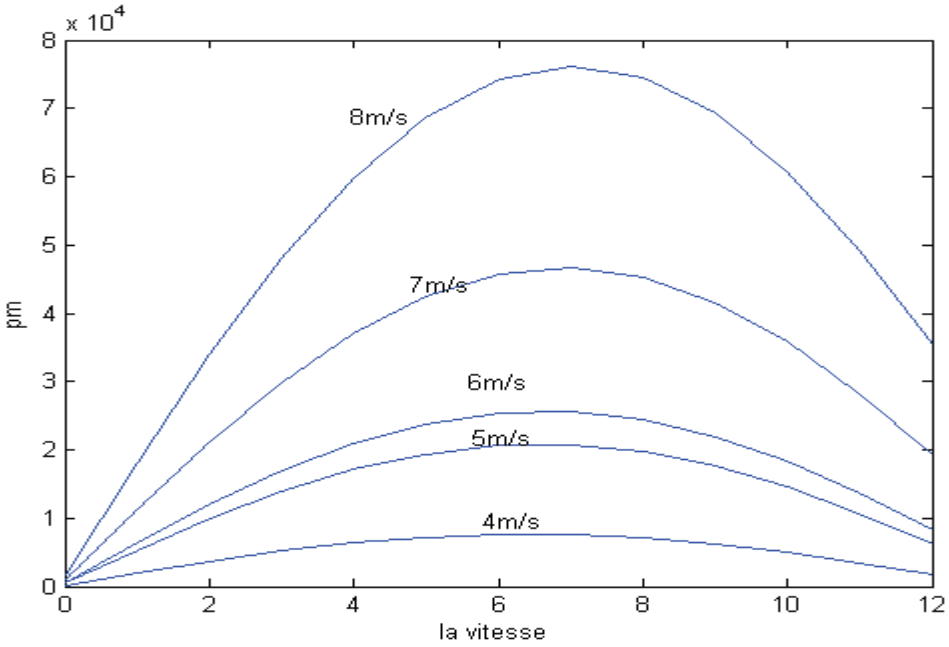


Figure I.8 : Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

La puissance mécanique *Pmg* disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$Pmg=1/2\ Cp\frac{\Omega_2 R}{KV1}\ \rho\pi R^2 V_1^3 \qquad \textbf{(I- 9)}$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur [1], [8], [7].

I.9 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques **[9].** On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

I.9.1 Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.9.1.1 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 grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure I.9), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. 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 du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure I.10).

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 de 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 demande un important travail de maintenance **[10].**

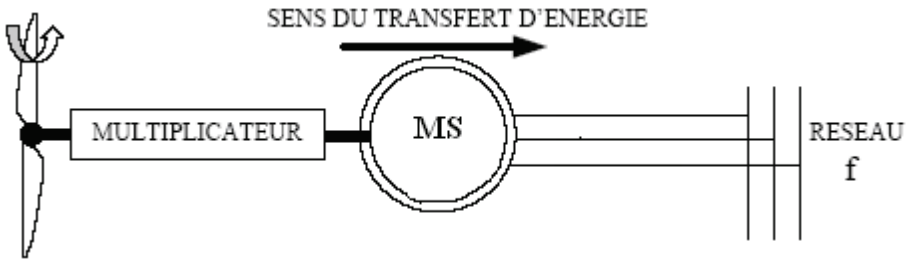


Figure I.9 : 1

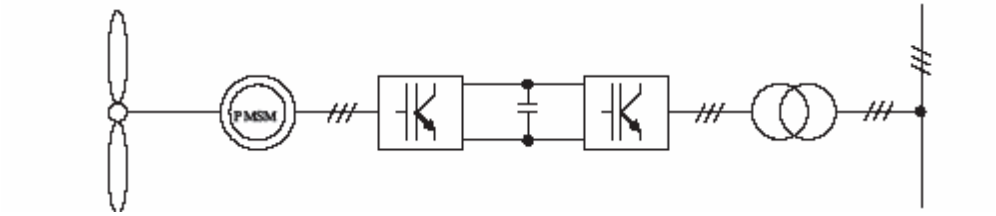


Figure I.10 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

I.9.1.2 Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine et 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.
Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.9.1.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.
Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (I.11) **[1].**

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point g=0), dans le cas de la caractéristique suivante (Fig.I.11), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.
Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure I.12).

La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui–ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la (figure I.12), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

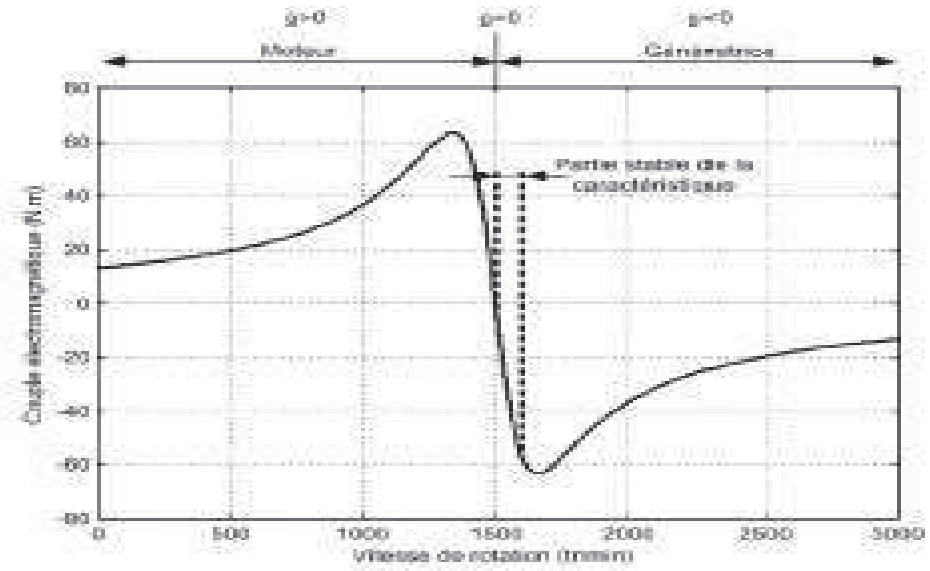


Figure I.11 : Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles ***[11]***

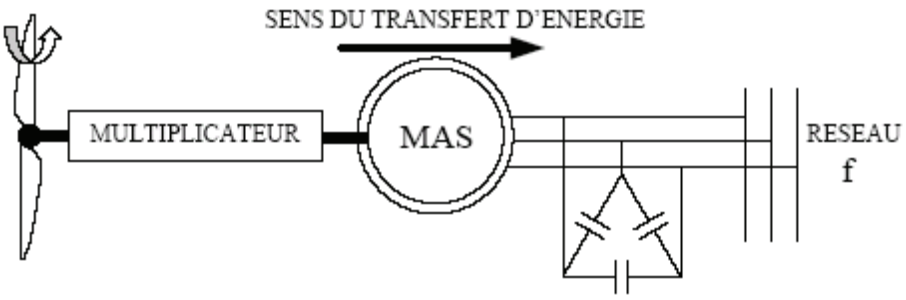


Figure I.12: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau ***[11]***

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure I.13).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée **[11].** Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

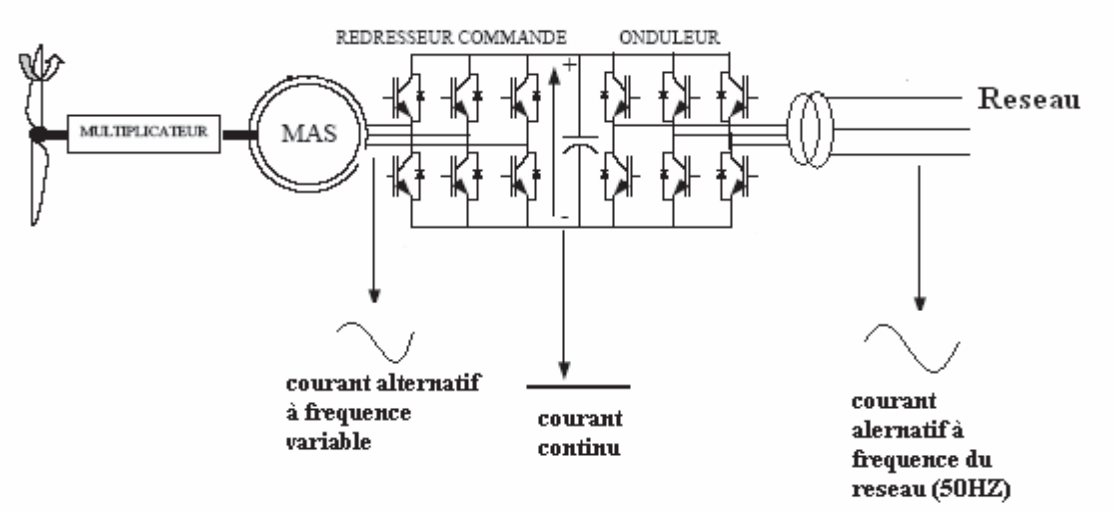


Figure I.13 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance ***[11]***

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I.9.1.2.b Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable **[12].**

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement **[7] [13].**

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice **[7].**

a - Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements **[14].**

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectées en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure I.14)

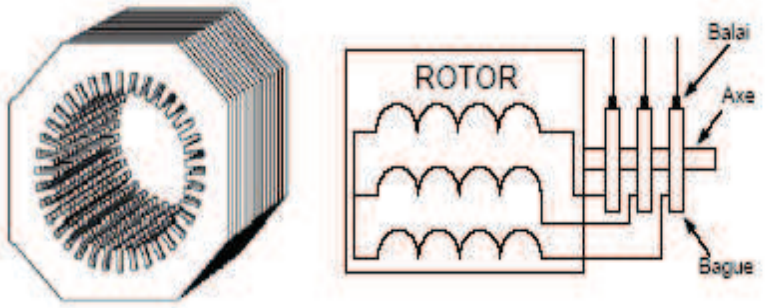


Figure I.14 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA ***[11]***

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone **[1].**

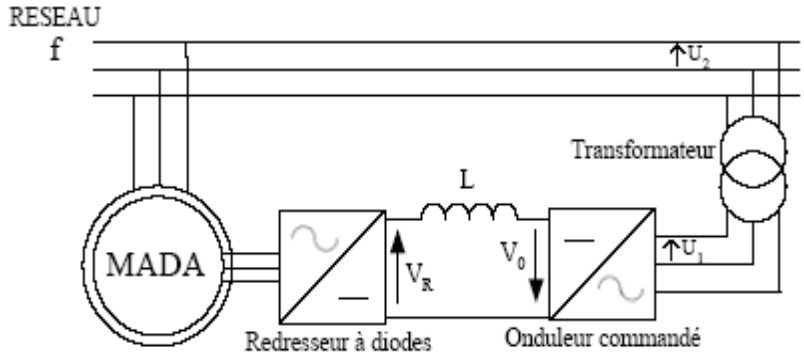


Figure I.15 : Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

a.1- Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure I.16)

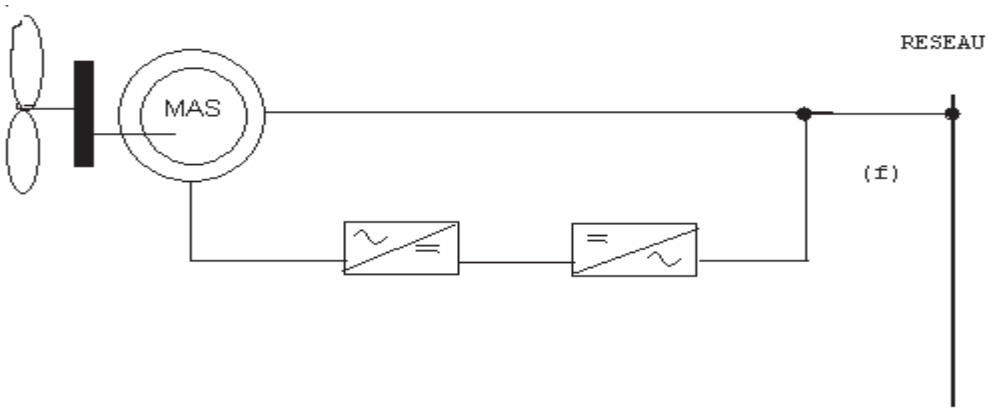


Figure I.16 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de pair de pôles que celui du premier bobinage.

L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

a.2- Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure I-17).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance *p* est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournir, (1- *g*) *p*, est retrouvée sous forme de puissance mécanique; le reste *gp* sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence *g.f*. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur.

Ce réseau reçoit donc (1+ *g*) *p* ; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure I.18). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

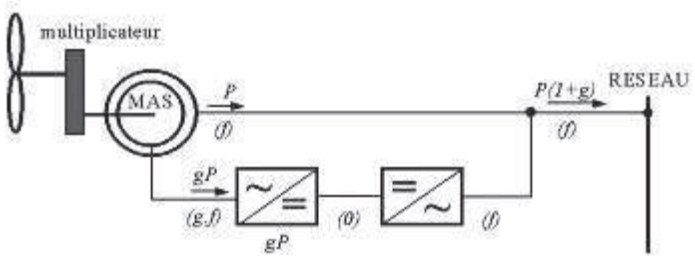


Figure I.17 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

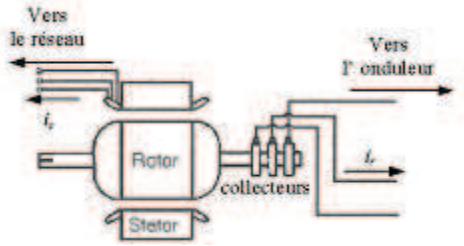


Figure I.18 : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe où vitesse variable dépend de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

b- Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnent à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commande.

Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques **[1].**

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure (I.19) donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius *PWM*), *P RES* est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau , *P S* La puissance transitant par le stator, *P R* la puissance transitant par le rotor , et *P MEC* la puissance mécanique **[1].**

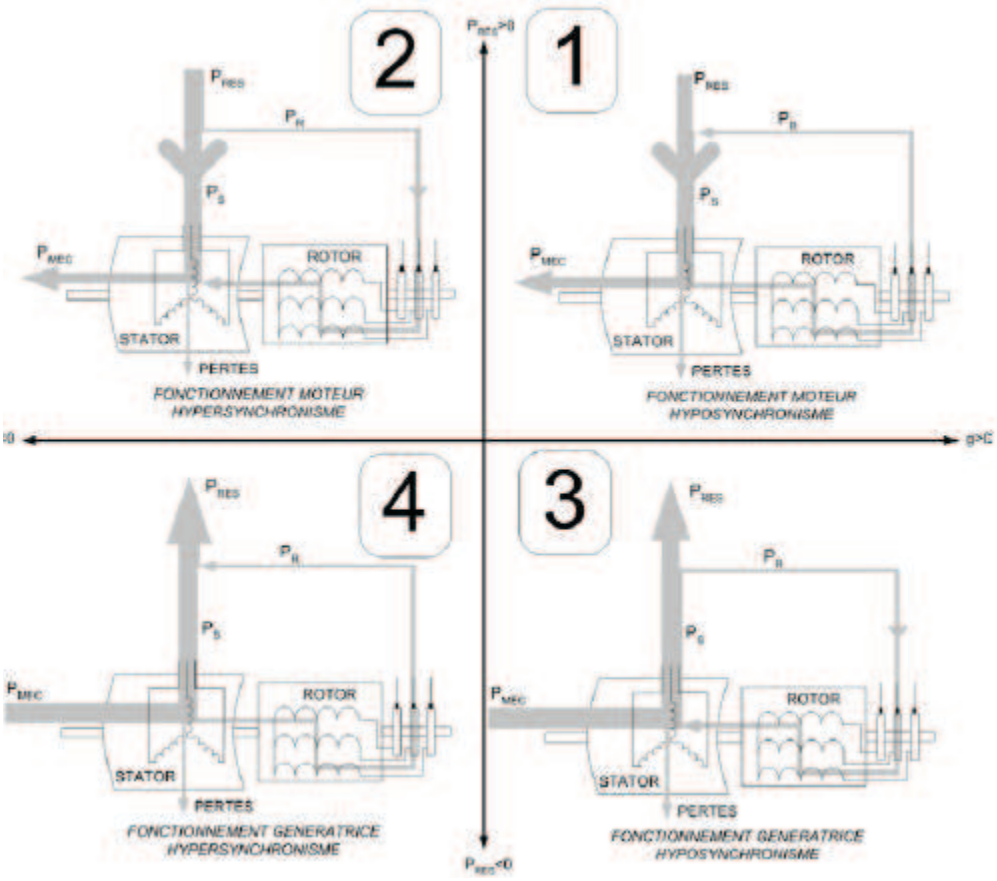


Figure I.19 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation ***[1]***

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone.

En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournir à la machine est transmise au réseau aux pertes près.

Une partie de cette puissance correspondant à g. $PMEC$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ± 30% en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la

puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine **[15].** Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

d- Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple,
- plus grande fiabilité,
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne,
- pas besoin de système électrique de commande,
- moins cher,

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant **[16]:**

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

Tableau I.2 : les types de génératrices

e- Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse

du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible.
L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent **[17] [11].**

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.
A la fin de ce chapitre on présente la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

CHAPITRE II

Modélisation de la machine asynchrone double alimentation et convertisseur matriciel

II.1 Introduction

Un intérêt sans cesse croissant est de plus en plus accordé à la machine asynchrone au détriment des autres machines. En effet, cette machine est devenue le choix par excellence de la majorité des industriels, grâce à son prix et sa robustesse. Cependant, elle a une dynamique très complexe à cause des interactions stator rotor, ce qui rend la modélisation basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant insuffisante pour décrire son comportement dynamique. De nouvelles méthodes tel que la méthode du vecteur spiral et la modélisation dans le repère de Park sont développées et devenus la base pour la modélisation, la simulation et la commande des machines à induction.

Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la modélisation dynamique de la machine asynchrone en double alimentation, et plus précisément la modélisation par la méthode de R.H Park.

II.2 Modélisation de la MADA

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet, la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

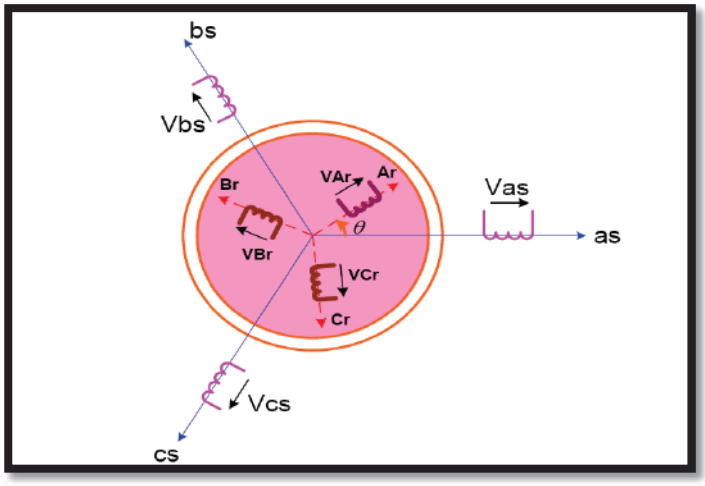


Fig. II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

II.2.1 Hypothèses simplificatrice

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant de sa

configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple **[18].**

- La machine est de constitution symétrique et a entrefer constant.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté, il en résulte que les pertes fer et les pertes par hystérésis sont négligeable et que seul les enroulements sont parcourus par les courant s.
- La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- n'est pas prise en compte, il en résulte que les résistances sont constantes et tous les coefficients L'influence de l'effet de la température sur les résistances ainsi que la saturation sur les inductances d'inductance propre sont constants et les inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

II.2.2 Equations électriques de la machine

Les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases}[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}[\Phi_S] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r]\end{cases} \quad \textbf{(II.1)}$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases}[\Phi_S] = [L_S][I_S] + [M_{Sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s]\end{cases} \quad \textbf{(II.2)}$$

Où :

$$[V_S] = \begin{bmatrix}V_{as}\\V_{bs}\\V_{cs}\end{bmatrix}, [I_S] = \begin{bmatrix}I_{as}\\I_{bs}\\I_{cs}\end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix}V_{ar}\\V_{br}\\V_{cr}\end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix}I_{ar}\\I_{br}\\I_{cr}\end{bmatrix} \quad \textbf{(II.3)}$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix}R_s & 0 & 0\\0 & R_s & 0\\0 & 0 & R_s\end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix}R_r & 0 & 0\\0 & R_r & 0\\0 & 0 & R_r\end{bmatrix} \quad \textbf{(II.4)}$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix}l_s & M_s & M_s\\M_s & l_s & M_s\\M_s & M_s & l_s\end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix}l_r & M_r & M_r\\M_r & l_r & M_r\\M_r & M_r & l_r\end{bmatrix} \quad \textbf{(II.5)}$$

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.6)}$$

En remplaçant (II .2) dans (II .1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}([L_S][I_S]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_r][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_S]) \end{cases} \quad \textbf{(II.7)}$$

La puissance active et réactive statorique peuvent être calculés au moyen des expressions suivantes **[19]** :

$$P_S = \frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \textbf{(II.8)}$$

$$Q_S = -\frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \textbf{(II.9)}$$

II.2.3. Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p(\emptyset_{ds} \times i_{qs} - \emptyset_{qs} \times i_{ds}) \quad \textbf{(II.10)}$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J.\frac{d}{dt}\omega = C_{em} - C_r - f_r.\omega \quad \textbf{(II.11)}$$

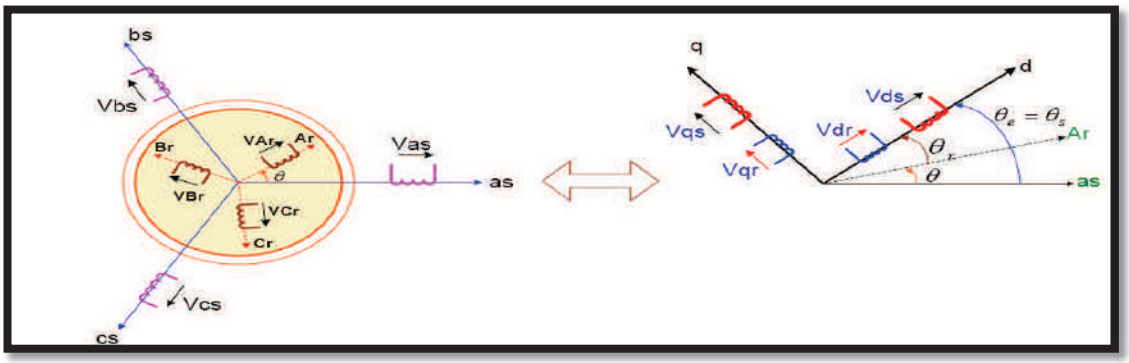


Fig.II.2 : Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park)

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = 2/3\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 2/3 & 2/3 & 2/3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.12)}$$

Cette matrice permet le passage des composantes du système triphasé aux composantes du système biphasées comme indiqué sur la figure II.2 Ainsi, les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

Tension :

$$\begin{cases} [V_{S,dq}] = [P(\theta_s)][V_{S,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad \textbf{(II.13)}$$

Courant :

$$\begin{cases} [I_{S,dq}] = [P(\theta_s)][I_{S,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r,abc}] \end{cases} \quad \textbf{(I.14)}$$

Flux :

$$\begin{cases} [\Phi_{S,dq}] = [P(\theta_s)][\Phi_{S,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad \textbf{(II.15)}$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{(II.16)}$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \textbf{(II.17)}$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations des tensions rotoriques et statoriques, écrites dans repères de Park, sont données par le système ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II.18)}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II.19)}$$

Avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \theta_s = \theta_r + \theta \quad \textbf{(II.20)}$$

II.2.4 Les puissances actives et réactives de la MADA

Les puissances actives et réactives côté stator :

$$P_s = \frac{3}{2}\left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}\right) \quad \textbf{(II.21)}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}\right)$$

Les puissances actives et réactives côté rotor est :

$$P_r = \frac{3}{2}\left(V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}\right) \quad \textbf{(II.22)}$$

$$Q_r = \frac{3}{2}\left(V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}\right)$$

II.2.5 Choix du référentiel

II.2.5.1 Référentiels lie au stator

$$\theta_s = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot I_{\alpha s} + \frac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot I_{\beta s} + \frac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot I_{\alpha r} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\beta r} + \frac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot I_{\beta r} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\alpha r} + \frac{d\Phi_{\beta r}}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II.23)}$$

II.2.5.2 Référentiels lie au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot I_{xs} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ys} + \frac{d\Phi_{xs}}{dt} \\ V_{ys} = R_s \cdot I_{ys} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{xs} + \frac{d\Phi_{ys}}{dt} \\ V_{xr} = R_r \cdot I_{xr} + \frac{d\Phi_{xr}}{dt} \\ V_{yr} = R_r \cdot I_{yr} + \frac{d\Phi_{yr}}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II.24)}$$

II.2.5.3 Référentiels lie au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par$\omega = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont continués en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit **[20]**:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s\Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s\Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(II.25)}$$

II.2.6 Mise sous forme d'équations d'états

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr},V_{qr}comme variables de commande [10].

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{ds} + \omega_s.\Phi_{qs} + \alpha_s.M.i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{qs} - \omega_s.\Phi_{ds} + \alpha_s.M.i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r.i_{dr} + (\omega_s - \omega).i_{qr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{ds} - \beta.p.\omega.\Phi_{qs} - \beta.V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r.i_{qr} - (\omega_s - \omega).i_{dr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{qs} + \beta.p.\omega.\Phi_{ds} - \beta.V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = p.\frac{\mu}{\mathrm{J}}\left(\Phi_{qs}.i_{dr} - \Phi_{ds}.i_{qr}\right) - \frac{1}{\mathrm{J}}.C_r - \frac{\mathrm{f}_r}{\mathrm{J}}.\omega \end{cases} \quad \textbf{(II.26)}$$

Avec :

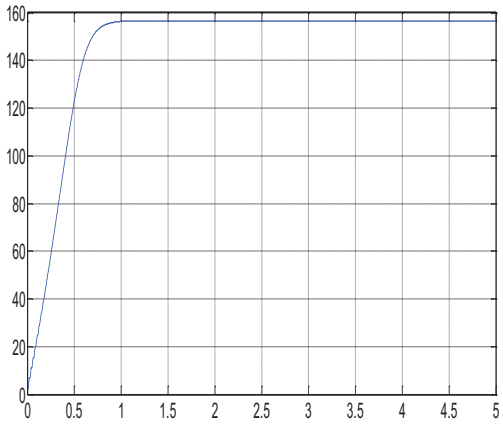
$$\alpha_S = \frac{R_s}{L_s} \;;\; \sigma_r = L_r.\left(1 - \frac{M^2}{L_s.L_r}\right) \;;\; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s.M^2}{{L_s}^2.\sigma_r} \;;\; \beta = \frac{M}{L_s.\sigma_r} \;;\; \mu = \frac{3.M}{I.L_s}$$

II.3 Résultats de simulation

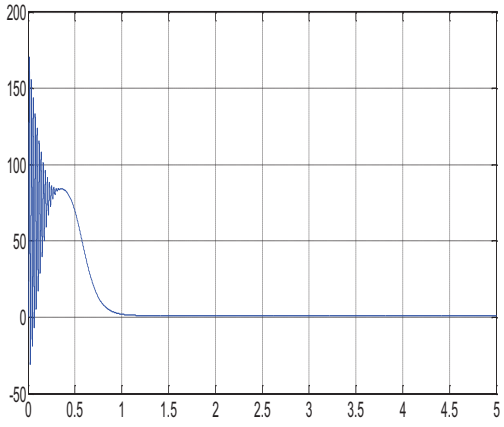
II.3.1 Fonctionnement moteur à vide

Dans ce fonctionnement on applique une couple résistant nulle (Cr=0 N.m)

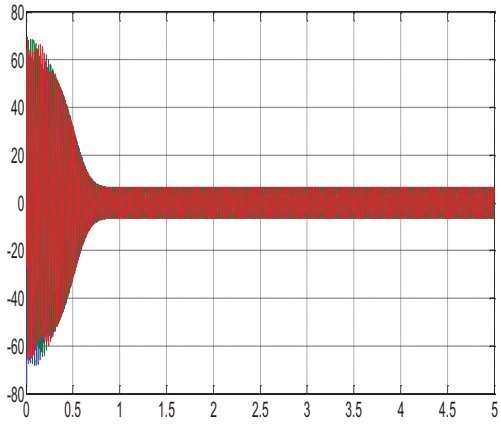
vitesse (rad/s)



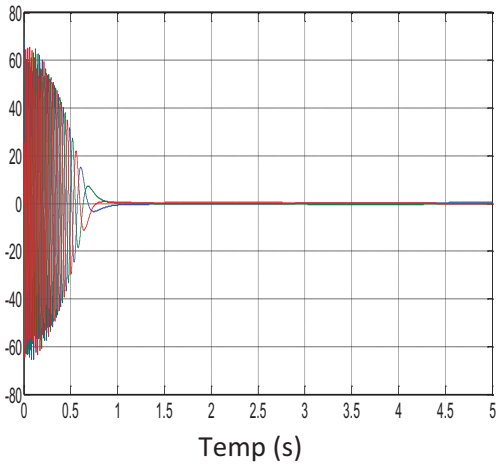
Cem (N.m)



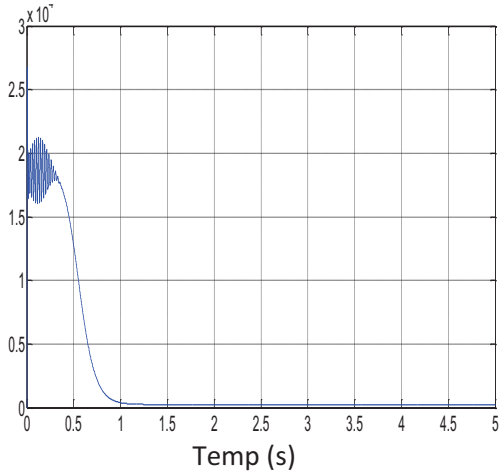
Is (A)



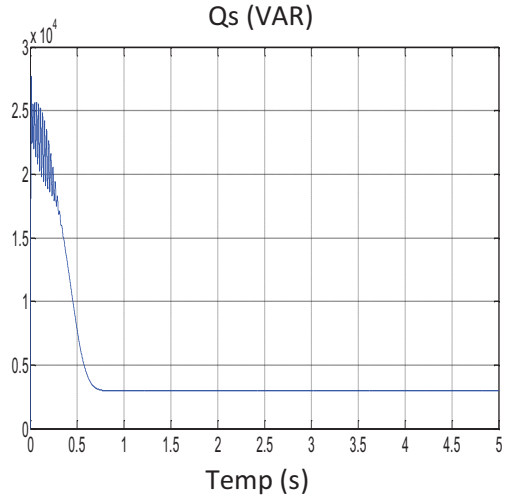
Ir (A)



Ps (W)



Qs (VAR)



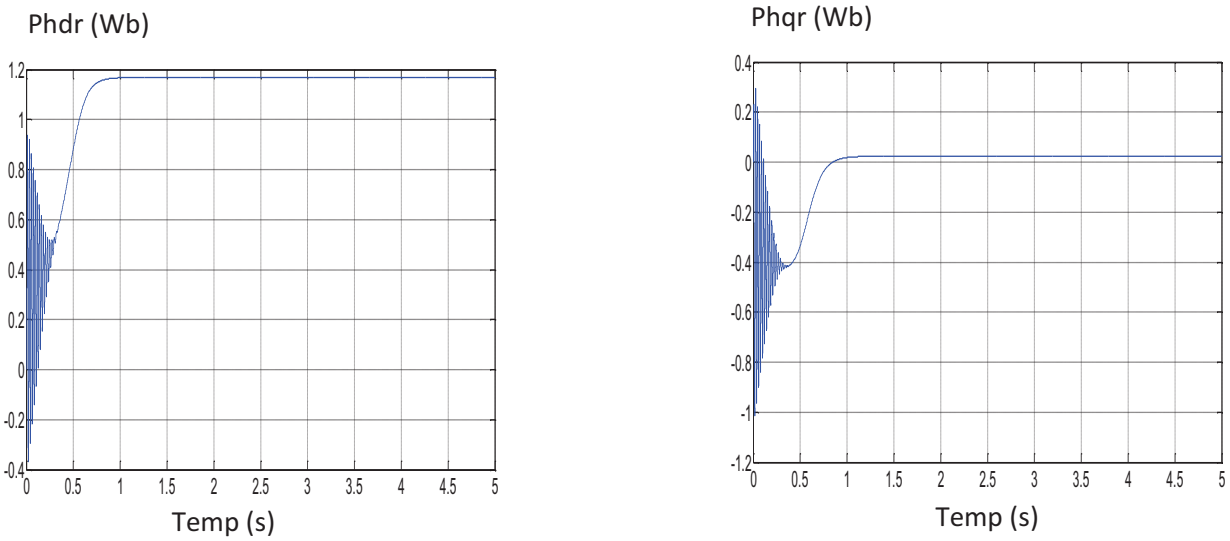
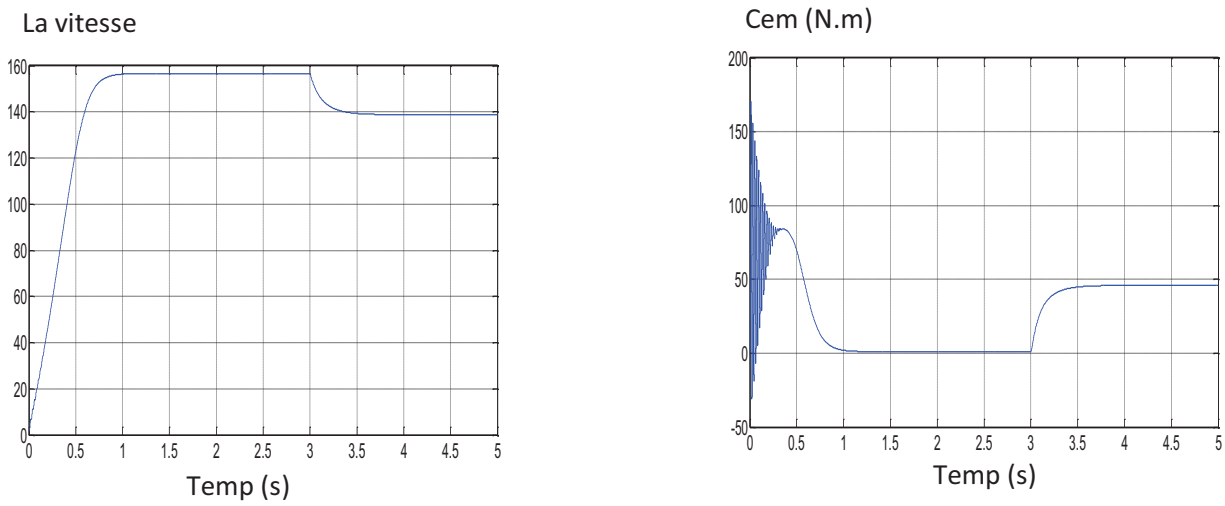


Fig.II.3 : Fonctionnement moteur à vide (Cr = 0)

II.3.2 Fonctionnement moteur en charge

Dans ce fonctionnement on applique une couple résistant positive (Cr=49N.m) à l'instant (t=3s).



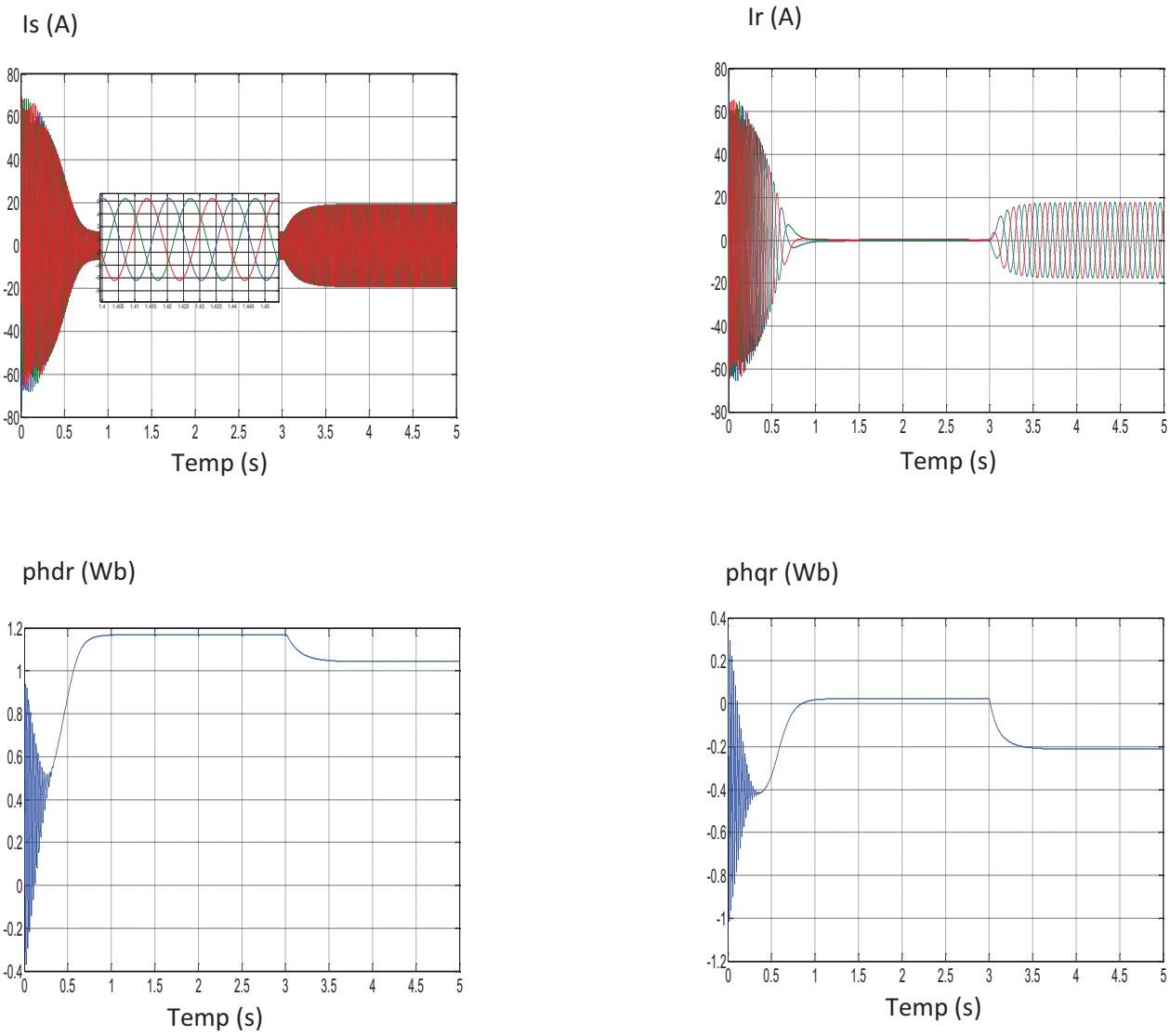
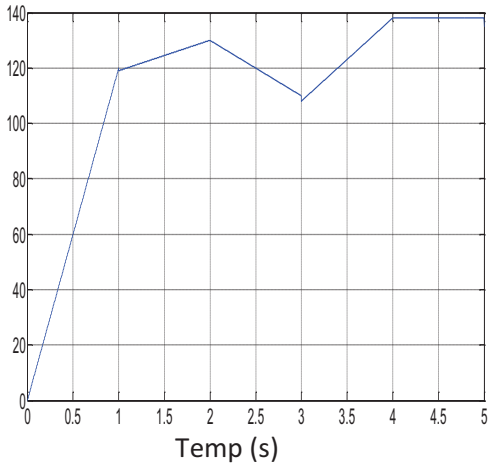


Fig.II.4 : Fonctionnement moteur en charge (Cr =49 N.m) à l'instant (t= 3s)

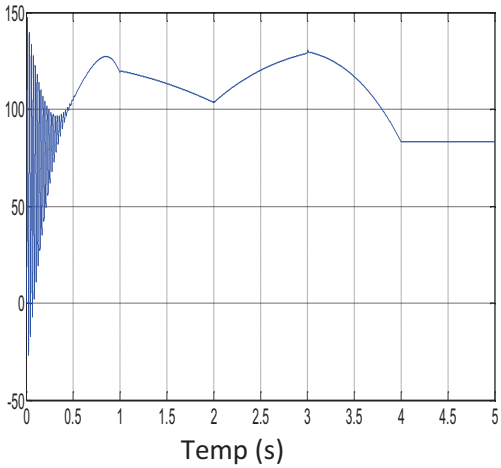
II.3.3 Fonctionnement génératrice

Dans ce fonctionnement on applique une vitesse de vent variable.

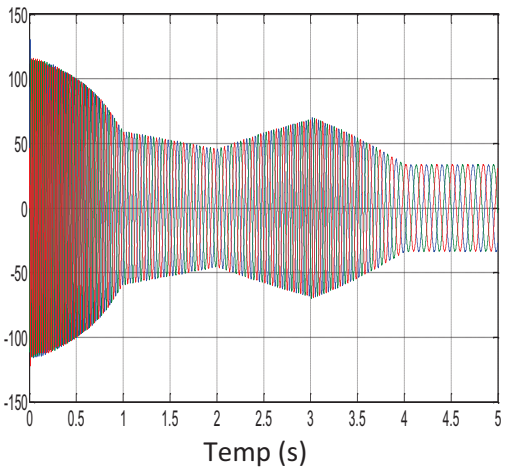
vitesse (rad/s)



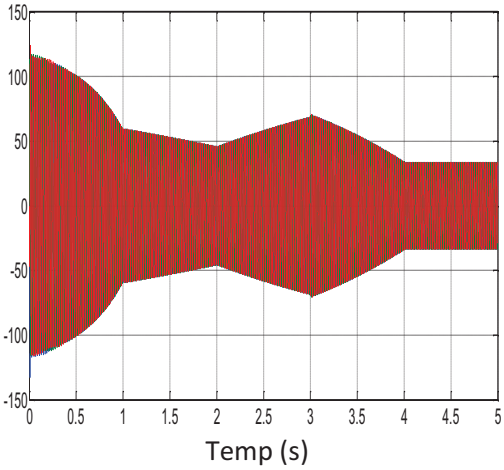
Cem (N.m)



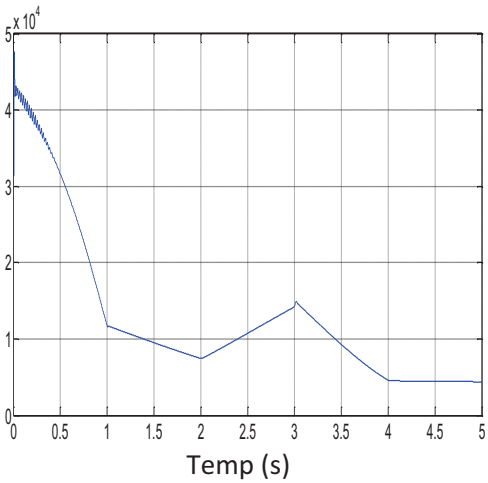
Ir (A)



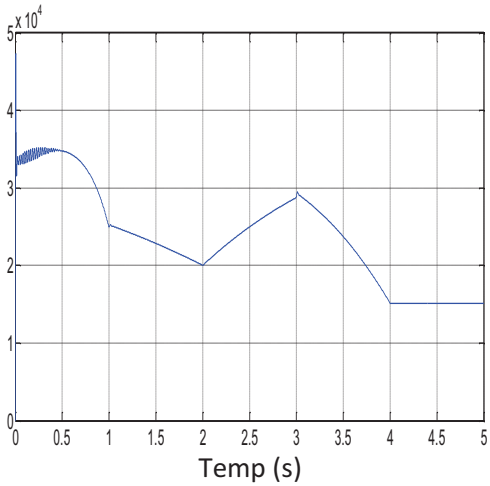
Is (A)



Ps(VAR)



Qs (W)



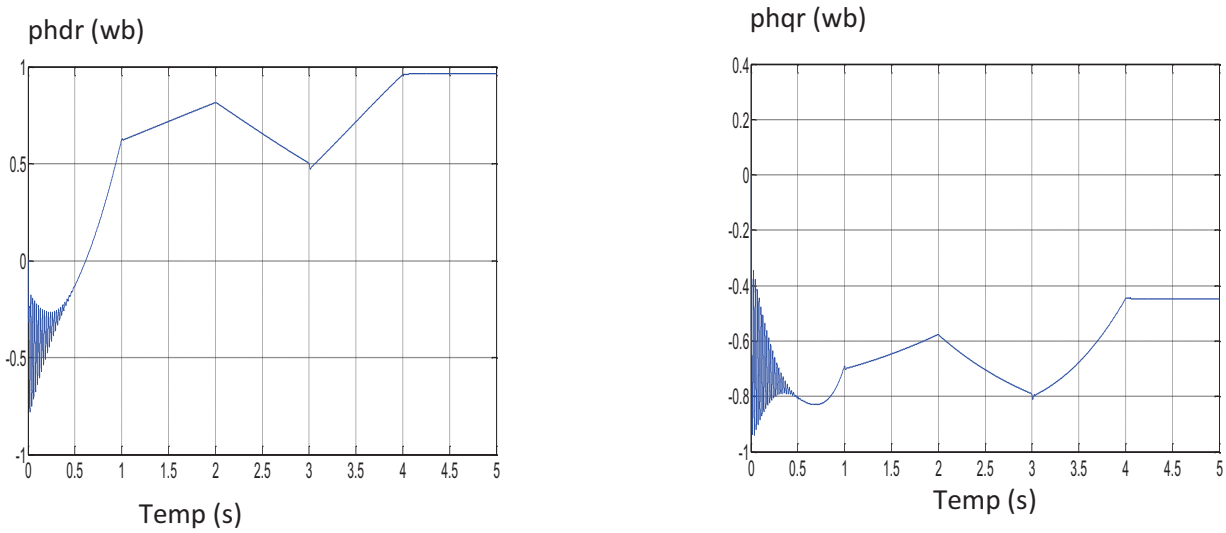


Fig. II.5 : Fonctionnement génératrice.

II.3.4 Interprétations des résultats de simulation

Les résultats de la figure (II.3) et (II.4) montrent successivement le mode de fonctionnement en mode moteur à vide et en charge, on peut constater les remarques suivantes :

- on remarque au démarrage que le régime transitoire est oscillatoire par toutes les grandeurs de la machine (elle fonction comme une machine asynchrone classique).
- Apres l'introduction de la charge a l'instant (t=3 s) on a une augmentation du couple électromagnétique a fin de compensée le couple de charge (Cr), cela cause une domination de vitesse qui implique une augmentation des courants et des flux rotoriques, qui confirmé le couplage naturelle qui existant entre le flux et le couple.

Les résultats de la figure (II.5) montrent le mode de fonctionnement en mode générateur, on peut constater les remarques suivantes :

On remarque que la vitesse de la MADA de turbine et c'est l'image de la vitesse du vent, les courants statoriques (Ids, Iqs) varie suivante la variation du la vitesse du vent.

II.4 Association convertisseur AC/AC – machine asynchrone double alimentation

II.4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a élaboré le modèle en tension de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation par un convertisseur statique.

Dans ce chapitre, on associe la machine asynchrone double alimentation à un convertisseur statique à structure matricielle qu'on appelle « convertisseur matriciel » permettant la conversion directe alternative - alternative sans circuit intermédiaire continu caractérisant le convertisseur conventionnel (redresseur - onduleur).

Pour réaliser cette conversion, on adopte la conversion indirecte de fréquence par une tension intermédiaire fictive. Et afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale, on propose deux stratégies pour la commande de convertisseur matriciel, l'analyse de ces stratégies sera basée sur les performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée alimentée par convertisseur matriciel, sur la bande de réglage et le taux d'harmoniques des tensions de sortie de ces convertisseurs.

II.4.2 Convertisseur matriciel

II.4.2.1 Principe du convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel est un convertisseur de fréquence direct. Il permet donc d'obtenir un système triphasé (**x, y, z**) de tension variable en fréquence et en amplitude à partir d'un système de tension fixe du réseau d'alimentation industriel. (**a, b, c**).

Ceci est réalisé par une matrice de neuf commutateurs de puissance reliant chaque phase d'entrée (**a, b, c**) à chaque phase de sortie (**x, y, z**). Le schéma de principe du ce convertisseur matriciel est montré à la (figure II.6) :

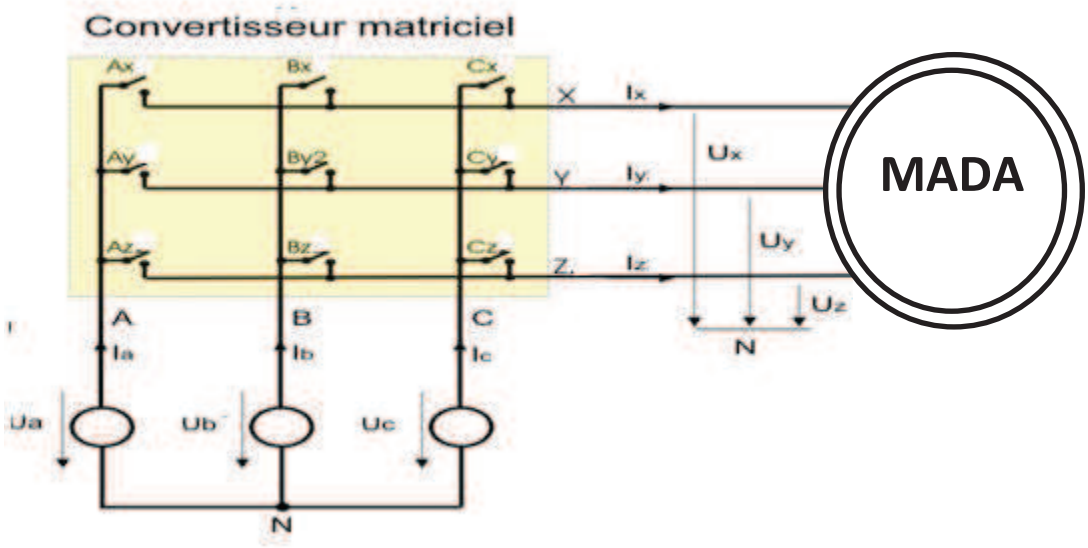


Figure II.6 : Schema de principe des convertisseurs matriciels

Les commutateurs de puissances de la matrice sont bidirectionnels, c'est-à-dire, ils permettent de conduire le courant symétriquement dans les deux sens ainsi que de bloquer les tensions de deux polarités. **[21]**

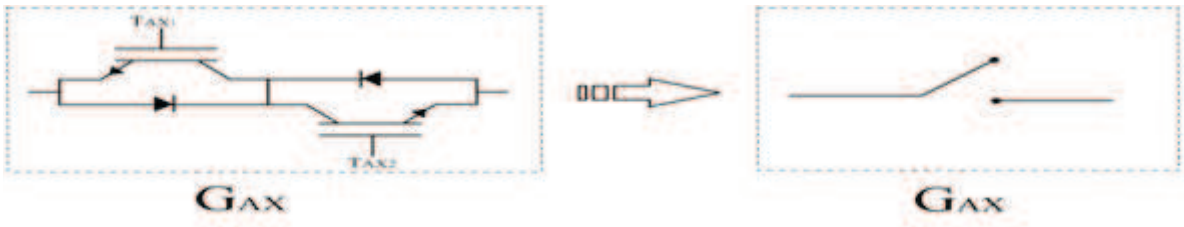


Figure II.7 : Commutateur bidirectionnel équivalent.

Chaque matrice est alimentée par les trois tensions de phase ($\mathbf{U_a}$, $\mathbf{U_b}$, $\mathbf{U_c}$), la machine asynchrone double alimentation de charge est connectée à la sortie. Les tensions de sortie sont dénotées par ($\mathbf{U_x}$, $\mathbf{U_y}$, $\mathbf{U_z}$).

On parle d'une conversion directe de fréquence parce que la conversion est réalisée sans circuit intermédiaire servant à un stockage d'énergie **[22]**. Dans le cas idéal, les tensions aux bornes de la charge correspondent à chaque instant à une des trois tensions d'alimentation.

En pulsant les neuf commutateurs selon une séquence de pulsation adéquate et avec une fréquence de pulsation fixe, la conversion de fréquence est réalisée.

On peut diviser la matrice du convertisseur en trois cellules de commutateurs. Chaque cellule comprend les trois commutateurs qui sont connectés à la même phase de sortie. Les cellules définis ainsi possèdent une symétrie fonctionnelle, d'où une symétrie par rapport à la commande et aussi par rapport aux circuits électriques. Les cellules seront dénotées par leur phase de sortie associée (cellule **X**, cellule **Y**, cellule **Z**).

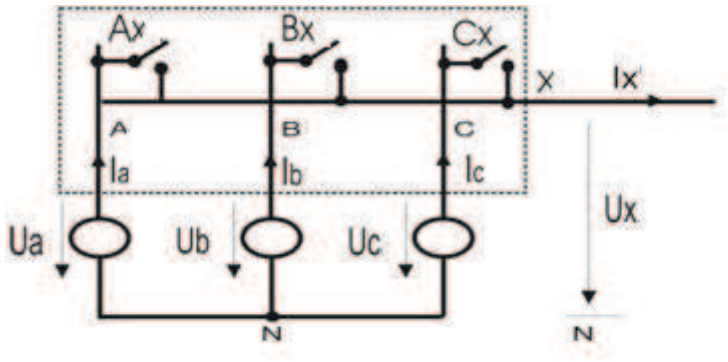


Figure II.8 : Schéma de principe d'une cellule de commutation du convertisseur matriciel.

II.4.2.2 Vecteurs de commutation admissibles

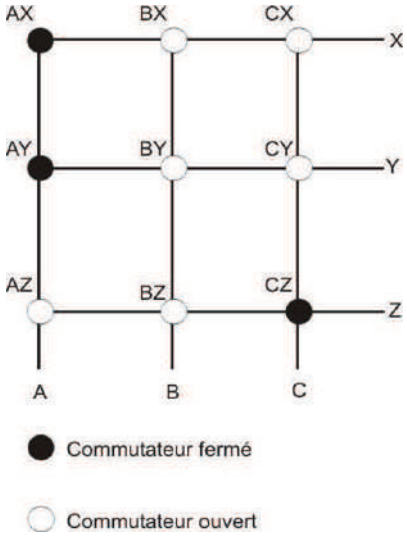
A priori, on a 2^9=512 différentes combinaisons pour l'état des commutateurs de la matrice à disposition.

Il est évident qu'on ne peut pas les appliquer toutes parce qu'il existe les deux contraintes pratiques fondamentales suivantes : **[23] [24]**

- Il ne faut jamais fermer plus qu'un seul commutateur par cellule d'une phase de sortie. Dans ce cas, deux tensions d'alimentation seraient court-circuitées. Les courants circulants résultants détruiraient les commutateurs.

- Il n'est pas admissible non plus d'ouvrir tous les commutateurs d'une cellule d'une phase de sortie parce que dans ce cas le courant serait interrompu dans cette phase. A cause de la charge inductive, la continuité du courant de sortie doit toutefois être assurée à chaque instant.

En respectant les règles énoncées ci-dessus, le nombre de combinaisons possibles se réduit à 3^3=27.dans ce cas, un vecteur d'ordre 3 est suffisant pour décrire l'état de commutation de la matrice complète. La figure (**II.9**) montre la convention adoptée dans le rapport présent.



Vecteur Correspondant

$$\begin{bmatrix} A \\ A \\ C \end{bmatrix}$$

Figure II.9 : Exemple pour la définition du vecteur de l'état de commutation de la matrice

II.4.2.3 Commande du convertisseur matriciel

Le problème de la commande du convertisseur matriciel consiste à trouver les séquences de pulsation pour que la moyenne glissante des tensions de phase à la sortie soit modulée sinusoïdalement. L'amplitude et la fréquence de l'onde fondamentale des tensions doivent être variables. Afin de réaliser ceci, on va proposer la conversion indirecte de fréquence par une tension intermédiaire fictive.

II.4.2.4 Conversion indirecte de fréquence par une tension intermédiaire fictive

Le principe de la conversion indirecte de fréquence par une tension intermédiaire fictive est caractérisé par la répartition de la conversion en deux étapes, le redressement des tensions d'alimentation et la modulation sinusoïdale des tensions de phase de la charge. Ceci peut être considéré comme analogie à la conversion de fréquence avec une structure redresseur onduleur conventionnel (figure II.10). **[24]**

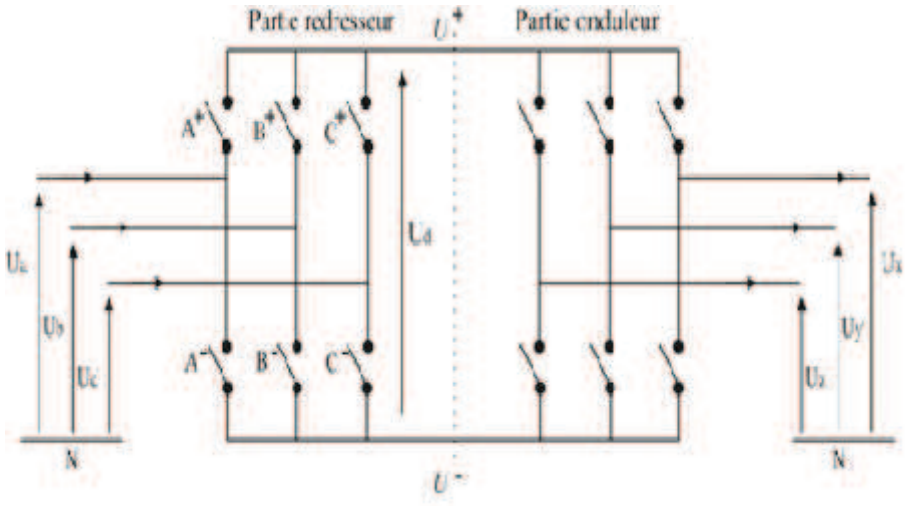


Figure II.10 : Modèle du convertisseur matriciel avec circuit intermédiaire fictif.

Compte tenu de la topologie du convertisseur matriciel, on ne peut pas réaliser physiquement cette répartition à cause de l'absence du circuit intermédiaire continu.

Comme le convertisseur matriciel possède neuf interrupteurs alors sa commande nécessite neuf fonctions de modulation et celle-ci impose directement la tension de sortie. **[25] [24]**

Le but de l'introduction de la tension intermédiaire fictive est de pouvoir analyser et optimiser séparément le redressement et l'ondulation, et par suite le développement séparé des algorithmes de commande. **[23] [26]**

II.4.2.5 Définition de la tension intermédiaire fictive

L'étape de redressement est basée sur le fait que pour chaque angle de phase de la tension d'alimentation, il existe au moins une phase qui est momentanément positive et au moins une qui est momentanément négative par rapport au point neutre de l'alimentation.

Par conséquent, il est possible de définir par hypothèse à chaque instant une tension $\mathbf{U}_{ef}$ continue, égale à la tension entre la phase positive U^+ et la phase négative U^- (figure II.11)

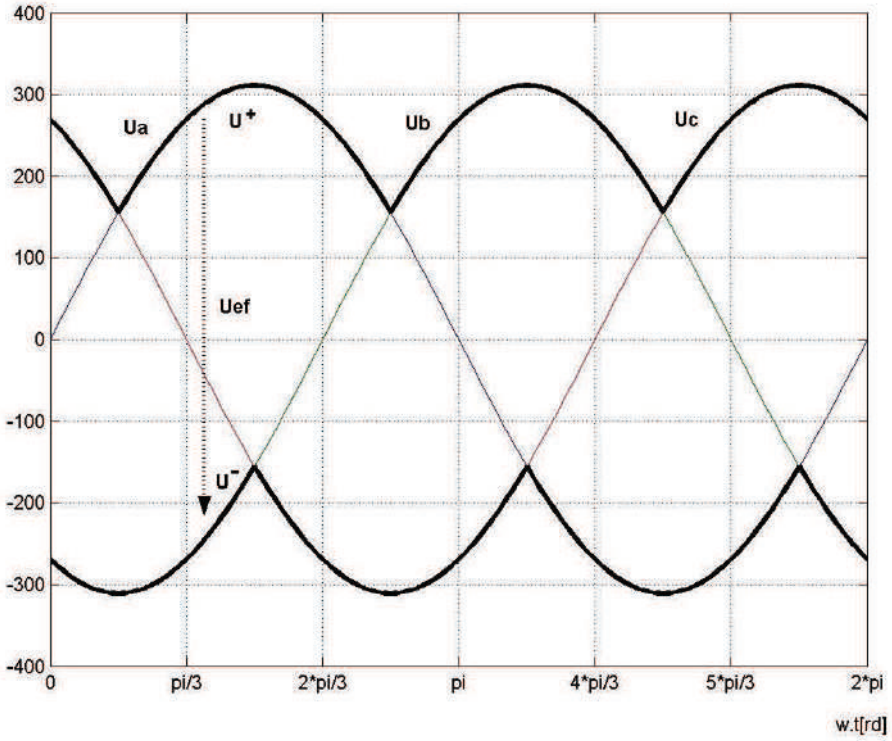


Figure II.11 : Redressement hypothétique des tensions d'alimentation

Nous avons donc : $$U_{efk} = U^{+} - U^{-} \quad \textbf{(II.27)}$$

Les tensions d'alimentation triphasées de convertisseur matriciel sont définies par

$$\begin{cases} U_a = U_{im} \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ U_b = U_{imk} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c = U_{imk} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad \textbf{(II.28)}$$

Et d'après: **[4] [10]**

$$\begin{cases} U^{+} = A^{+}U_a + B^{+}U_b + C^{+}U_c \\ U^{-} = A^{-}U_a + B^{-}U_b + C^{-}U_c \end{cases} \quad \textbf{(II.29)}$$

Sur l'intervalle $\pi/3 \le \omega \cdot t \le 2\pi/3$:

$$\begin{cases} A^{+} = 1 \\ B^{+} = 0 \\ C^{+} = 0 \\ A^{-} = 0 \\ B^{-} = 1 - \tau \\ C^{-} = \tau \end{cases} \quad \textbf{(II.30)}$$

τ : représente le rapport cyclique qui sera imposé par une modulation par largeur d'impulsion (PWM) afin de produire une tension dont la moyenne temporelle est une valeur entre les deux tensions de référence, permettant ainsi de rendre la forme du courant d'entrée sinusoïdale en gardent constante la puissance équivalente transmise par le circuit intermédiaire fictif. **[23] [25]**

La fonction de modulation τ est donnée par **[26]** :

$$\tau = \frac{\cos(\phi - \pi/3)}{\cos(\phi)} \quad \textbf{(II.31)}$$

avec : $\phi = (\omega \cdot t)_{\mathrm{mod}(\pi/3)} - \pi/6$ et $0 \le \tau \le 1$

La symétrie des cinq intervalles par rapport à l'intervalle $\pi/3 \le \omega \cdot t \le 2\pi/3$ permet d'y étendre le résultat trouvé dans cet intervalle sur toute la période.

	$0 \quad \pi/3$	$\pi/3 \quad 2\pi/3$	$2\pi/3 \quad 3\pi/3$	$3\pi/3 \quad 4\pi/3$	$4\pi/3 \quad 5\pi/3$	$5\pi/3 \quad 2\pi$
A^{+}	τ	**1**	$1-\tau$	**0**	**0**	0
B^{+}	**0**	**0**	τ	**1**	$1-\tau$	0
C^{+}	$1-\tau$	**0**	**0**	**0**	τ	1
A^{-}	**0**	**0**	**0**	τ	**1**	$1-\tau$
B^{-}	**1**	$1-\tau$	**0**	**0**	**0**	τ
C^{-}	0	τ	1	$1-\tau$	0	0

Tableau II.1 : Valeurs des fonctions de redressement sur toute la période.

En écrivant les équations (**II.30**) sous forme matricielle, il apparaît la matrice :

$$\begin{bmatrix} U^+ \\ \\ U^- \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A^+ & A^- \\ B^+ & B^- \\ C^+ & C^- \end{bmatrix}^T}_{F_r} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.32)}$$

La tension intermédiaire fictive $\mathbf{U_{ef}}$ sur toute la période est donnée par : **[23] [24]**

$$U_{ef} = \frac{3 \cdot U_{im}}{2 \cdot \cos(\phi)} \qquad \textbf{(II.33)}$$

La forme de la tension intermédiaire fictive U_{ef} sur une période est donnée par la (figure II.12):

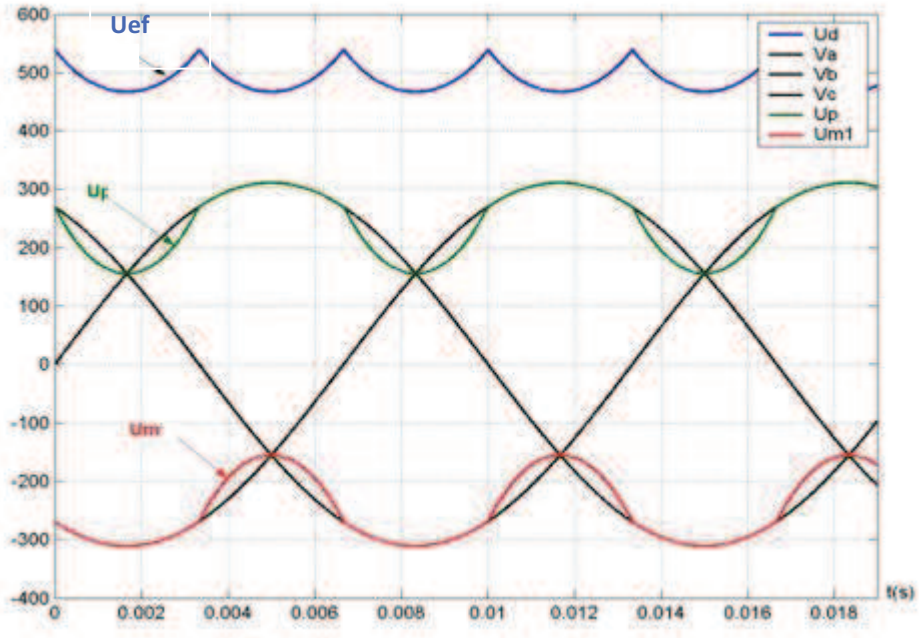


Figure II.12 : La forme de la tension intermédiaire fictive U_{ef}

II.4.3 Modulation sinusoïdale des tensions de phase de la charge

II.4.3.1 Fonctions de modulation

En se basant sur l'équation (**II.32**), on introduit alors la partie onduleur avec les fonctions de modulation u_{cmi} qui peuvent prendre les valeurs continues 0 et 1 **[26] [23]**.

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} u_{cm1} & (1-u_{cm1}) \\ u_{cm2} & (1-u_{cm2}) \\ u_{cm3} & (1-u_{cm3}) \end{bmatrix}}_{F_0} \cdot \begin{bmatrix} U^+ \\ \\ U^- \end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.34)}$$

En tenant compte du redressement, on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} u_{cm1} & (1-u_{cm1}) \\ u_{cm2} & (1-u_{cm2}) \\ u_{cm3} & (1-u_{cm3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A^+ & B^+ & C^+ \\ & & \\ A^- & B^- & C^- \end{bmatrix}}_{F=F_0 \cdot F_r} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.35)}$$

La multiplication des matrices de la modulation des tensions de phase F_0 et du redressement F_r^T fournit finalement la matrice F définissant l'algorithme complet de la conversion de fréquence. **[21]**

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{AX} & \tau_{BX} & \tau_{CX} \\ \tau_{AY} & \tau_{BY} & \tau_{CY} \\ \tau_{AZ} & \tau_{BZ} & \tau_{CZ} \end{bmatrix}}_{F} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.36)}$$

Ses éléments peuvent être interprétés comme des fonctions de transfert permettant de former les tensions de sortie à partir des tensions d'entrées. La somme des éléments de chaque ligne de la matrice **F** doit toujours être é gale à1 pour obtenir une transformation réalisable par des modulations PWM.

Le calcul des courants d'entrée à partir des courants de la charge peut se faire également à l'aide de la matrice F. On a alors :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{AX} & \tau_{AX} & \tau_{AX} \\ \tau_{BY} & \tau_{BY} & \tau_{BY} \\ \tau_{CZ} & \tau_{CZ} & \tau_{CZ} \end{bmatrix}}_{F^T} \cdot \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.37)}$$

L'identification entre les équations (II.35) et (II.36) permet de définir les éléments de la matrice de conversion comme suit :

$$\begin{cases} \tau_{Ax} = A^+ \cdot u_{cm1} + A^-(1-u_{cm1}) \\ \tau_{By} = B^+ \cdot u_{cm1} + B^-(1-u_{cm1}) \\ \tau z = 1-(\tau_{AX} + \tau_{BX}) \end{cases} \quad \textbf{(II.38)}$$

II.4.3.2 Modulation de la tension intermédiaire fictive :

Tout d'abord, nous définissons les tensions de référence de phase de ortie comme suit :

$$\begin{cases} U_{x\,ref} = U_m \cdot \sin(\omega_s t) \\ U_{y_{ref}} = U_m \cdot \sin(\omega_s t - 2\pi/3) \\ U_{z\,ref} = U_m \cdot \sin(\omega_s t - 4\pi/3) \end{cases} \quad \textbf{(II.39)}$$

Avec : $\omega_s = 2\pi f_s$ où f_s : est la fréquence de la tension de référence.

La détermination des fonctions d'ondulation (fonctions de référence normalisée) consiste en la modulation de la tension intermédiaire fictive donnée par l'équation (II.33) selon : **[23]**

$$u_{cm\,i} = \frac{U_m}{\underbrace{U_{efk\,min}}_{r}} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin\left(\omega_s \cdot t - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \quad \textbf{(II.40)}$$

avec :

$u_{cm\,i}$: Fonctions de modulation

U_m : Valeur crête des tensions de référence de phase de sortie.

$r = \dfrac{U_m}{U_{ef\,\min}}$: Le taux de modulation

ω_s : Pulsation des tensions de référence de phase de sortie.

$\phi = (\omega \cdot t)_{\mathrm{mod}(\pi/3)} - \pi/6$, i=1, 2,3,

II.4.4 Stratégies de modulation

II.4.4.1 Modulation par PWM à trois intervalles :

II.4.4.1.1 Principe:

Le principe de cette stratégie de commande est le suivant :

Pour chaque phase, on compare deux signaux de commande τ_{x1} et τ_{x2} avec une porteuse en dents de scie, et par suite on obtient deux signaux X1 et X2 par phase. **[27] [23]**

Remarque : Comme le convertisseur matriciel étudié est constitué de convertisseur matriciel triphasé identique ayant à la sortie un systèmes triphasé, déphasé entre eux de l'angle $\pi/6$, alors l'équation de la porteuse pour le convertisseur matriciel est donnée comme suit :

$$U_p = \frac{1}{T_p} \cdot t \quad 0 \le t \le T_p \qquad \textbf{(II.41)}$$

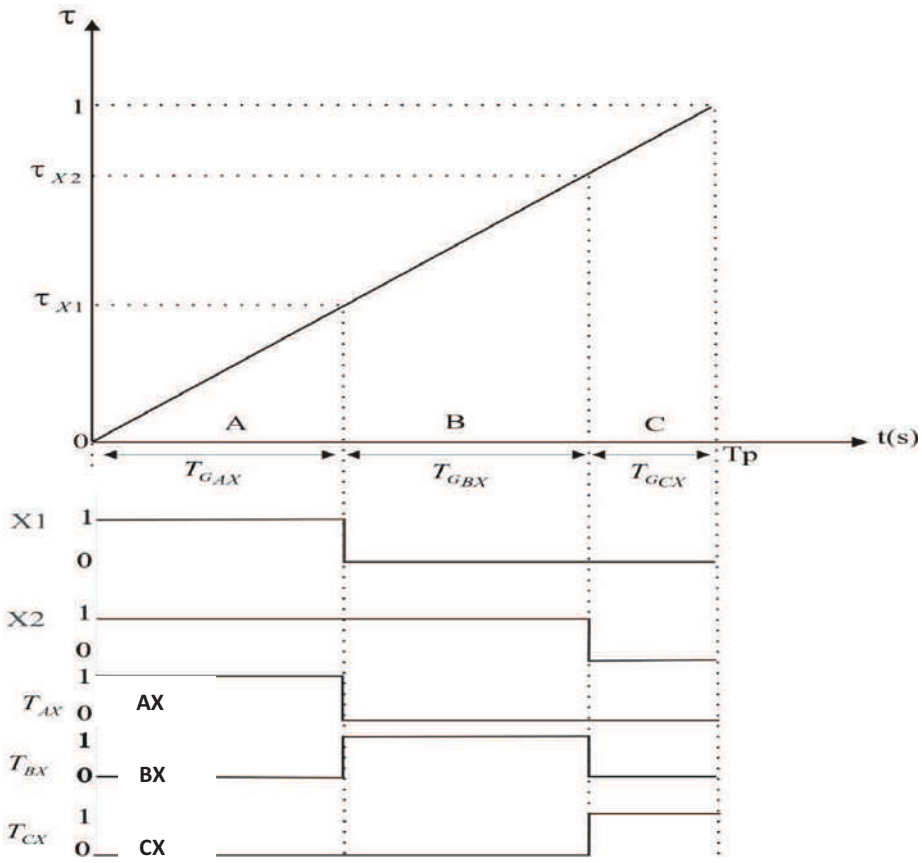


Figure II.13 : PWM à trois intervalles qui commande la phase X de sortie.

La période de pulsation est divisée en trois intervalles correspondants aux trois intervalles d'enclenchement des commutateurs AX, BX et CX.

Cette stratégie de commande est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation ***m*** : c'est le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence $\mathbf{f_s}$ de la tension de référence. ***(m*=$\mathbf{f_p/f_s}$*)***.
- Le taux de modulation ***r*** : c'est le rapport de l'amplitude maximale de la tension de référence $\mathbf{U_m}$ à la valeur minimale de la tension redressée fictive $\mathbf{U_{dmin}}$ **(*r*=$\mathbf{U_m/U_{dmin}}$)**.

L'intérêt de la stratégie de modulation à trois intervalles est que :

- Elle repousse les harmoniques de la tension de sortie du convertisseur vers les fréquences élevées afin de faciliter leur filtrage.
- Elle permet de faire varie l'amplitude du fondamental de la tension de sortie.

Les signaux de commande des commutateurs de puissance se décodent à partir des signaux de sortie du modulateur **PWM**, X_1 et X_2. Ils s'obtiennent à l'aide d'une logique simple selon

$$\begin{cases} AX = X_1 \\ BX = X_2 \,\&\, \overline{X_1} \\ CX = \overline{X_2} \end{cases} \quad \textbf{(II.42)}$$

Les deux signaux binaires de sortie X_1, X_2 du modulateur PWM sont donnés par **[10]** :

$$X_1 = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad \tau_{X1} > U_p \\ 0 & \text{si} \quad \text{non} \end{cases} \quad \textbf{(II.43)}$$

$$X_2 = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad \tau_{X2} > U_p \\ 0 & \text{si} \quad \text{non} \end{cases} \quad \textbf{(II.44)}$$

A partir des équations (II.12), on définit les signaux de référence τ_{X1}, τ_{X2} comme suit :

$$\begin{cases} \tau_{X1} = \tau_{AX} = A^+ \cdot u_{cm1} + A^- (1 - u_{cm1}) \\ \tau_{X2} = \tau_{BX} = B^+ \cdot u_{cm1} + B^- (1 - u_{cm1}) \end{cases} \quad \textbf{(II.45)}$$

Il est à noter que la condition $\tau_{X2} > \tau_{X1}$ doit toujours être remplie car l'état X_1=1 et X_2=1 n'est pas défini.

A partir de l'équation (II.40), la fonction d'ondulation u_{cm1} pour la phase X s'écrit comme suit :

$$u_{cm1} = \frac{U_{xref}}{U_{d\min}} \cdot \cos(\phi) + \frac{1}{2} \quad \textbf{(II.46)}$$

La structure de ce modulateur **PWM** à trois intervalles est montrée par la (figure II.14) :

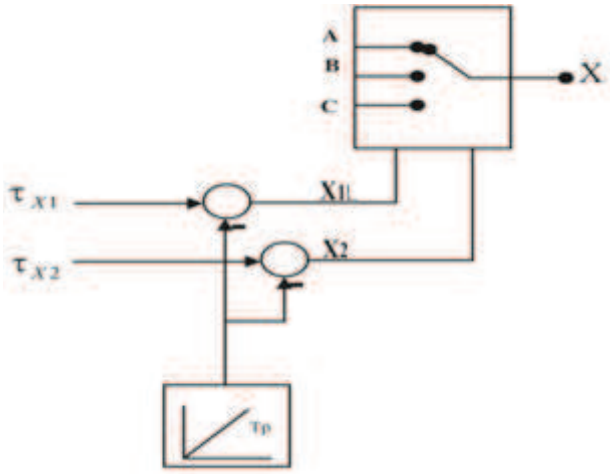


Figure II.14: Structure du PWM à trois intervalles.

II.4.4.1.2 Caractéristique de réglage :

La caractéristique de réglage de l'amplitude du fondamental est linéaire de ***r*** = 0 à 0.5 et le taux d'harmonique décroît avec ***r*** (figure II.15).

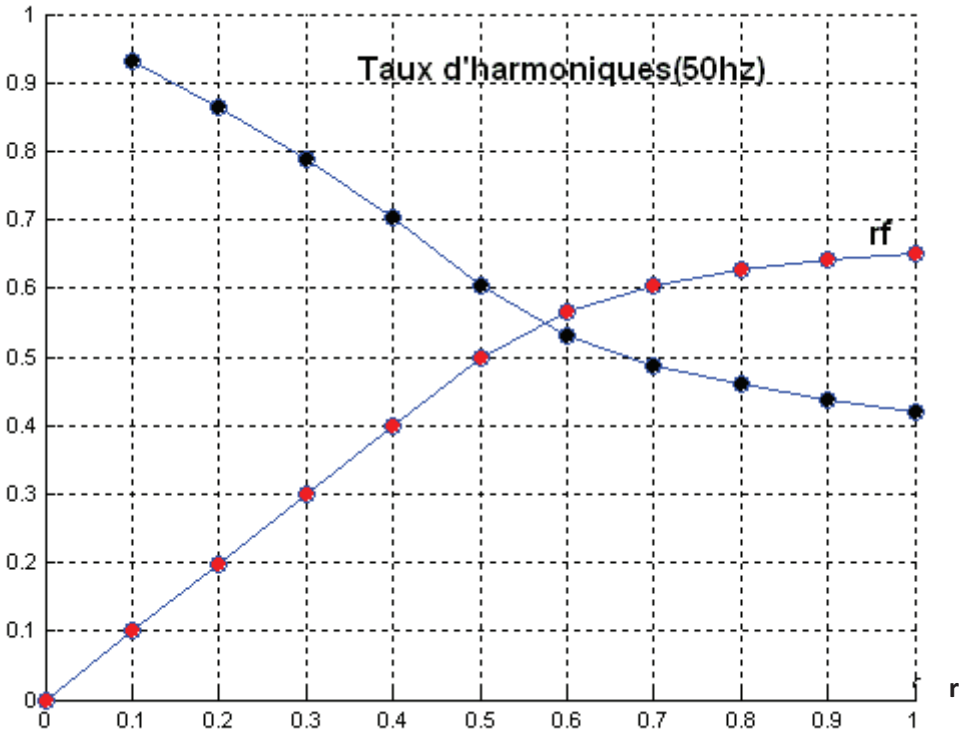


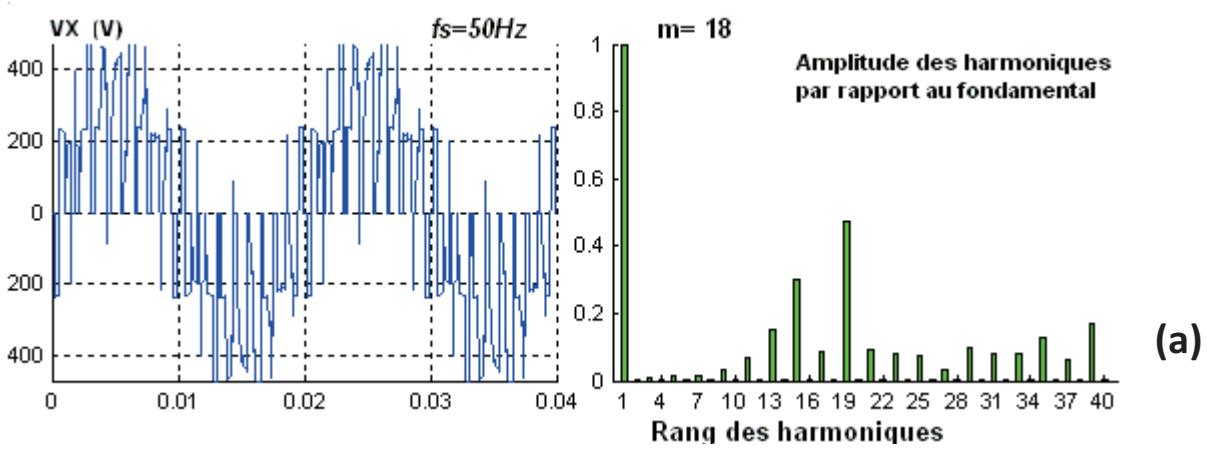
Figure II.15 : Variation du fondamental et du taux d'harmoniques en fonction de r pour (m=21, f_s=50Hz)

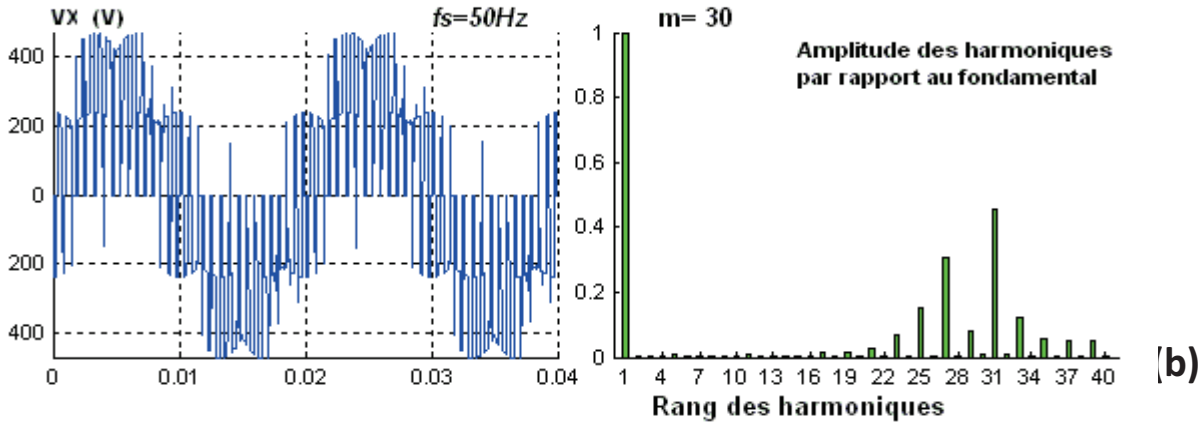
II.4.5 Simulation et interprétation du convertisseur matriciel seul

- **Performances de la stratégie de modulation trois intervalles**

Pour cette stratégie de commande, on simule les tensions V_x de la phase X

(Tensions par rapport au neutre de la machine asynchrone à double étoile) délivrée par le convertisseur matriciel ainsi leur spectres d'harmoniques pour la fréquence $\mathbf{f_s}$**= 50 Hz**. tel que, on fixe le taux de modulation **r** à la valeur 0.5 (Voir : figure II.16) puis on fait varie l'indice de modulation **m** (m=18, 21et 30).





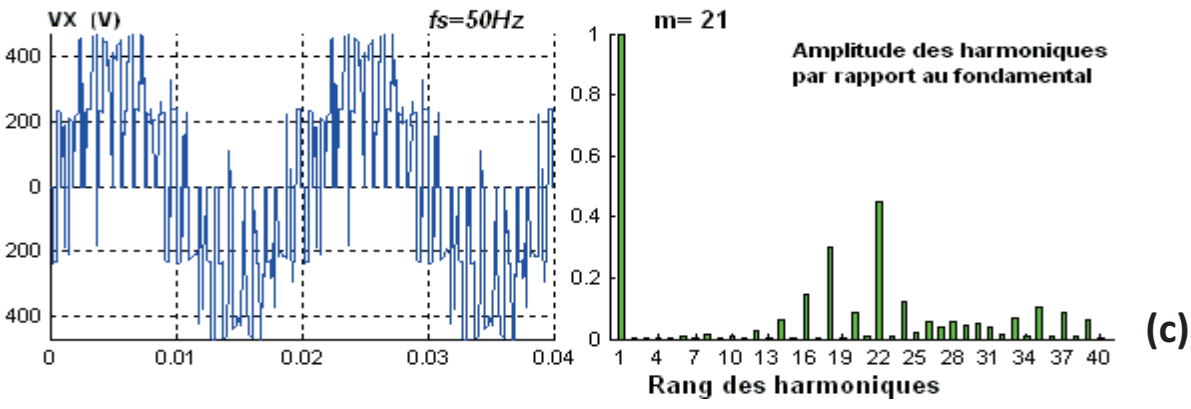


Figure II.16. a,b et c : Caractéristiques des tensions V_x de sortie de convertisseur matriciel commandés par la stratégie de modulation à 3 intervalles (m=21, m=30,m=18, f_s= 50Hz)

II.5 Performances de l'association convertisseur matriciel machine asynchrone à double alimentation

Pour avoir en sortie de convertisseur matriciel des tensions telle que l'amplitude maximale de leur fondamentale égale à $220\sqrt{2}\,(V)$ en fixant r=0.5, il faut avoir à l'entrée de convertisseur matriciel de tension d'amplitude maximale égale à $290\sqrt{2}\,(V)$.

Nous fixons (m=21, r =0.5, $U_{im} = 290\sqrt{2}\,(V)$), nous simulons pour différents valeurs de la fréquence de sortie de convertisseur matriciel (f_s= 25 Hz) les grandeurs suivantes :

- Le couple électromagnétique C_{em} (N.m)
- Le courant statorique i (A) de phase de la MADA.
- Le courant i_a (A) de la phase du réseau.
- La vitesse angulaire $\omega_r\,(\mathrm{rd/s})$ de la MADA

- Pour f_s = 25 Hz, les courbes sont montrées à la figure (**II.17**)

II.5.1 Résultats de simulation

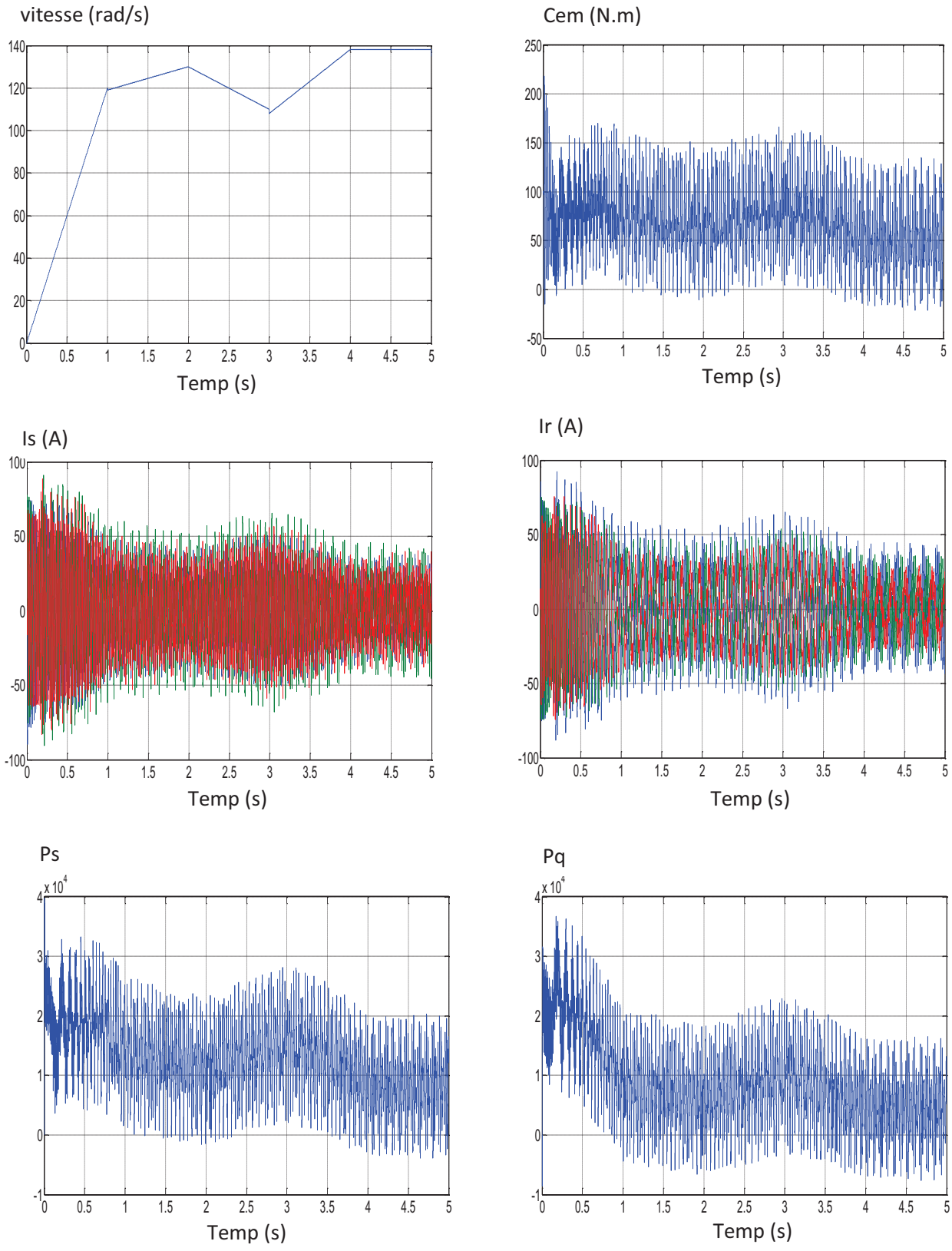


Figure II.17 : les résultats de la simulation

II.5.2 Interprétation des résultats

- Les harmoniques de tensions se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de celle de la porteuse (fp= m.fs).
- La première famille centrée autour de la fréquence m.fs est la plus importante du point de vue amplitude.
- Le taux de modulation r permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de r=0 à r=0.5 (figure II.15).
- Le taux d'harmonique diminue quand le taux de modulation r augmente.
- En régime permanent, la fréquence du couple électromagnétique est égale à la fréquence des tensions V_x délivrée par le convertisseur matriciel.
- Lorsqu'on augmente (ou on diminue) la fréquence fs des tensions, la durée du régime transitoire de la machine étudiée augmente (diminue), et les courants absorbés au démarrage diminuent (augmentent).
- Les courants absorbés par la machine asynchrone double alimentation sont presque sinusoïdaux.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélise la turbine éolienne et la machine asynchrone à double alimentation dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park, l'insertion de la charge engendre une variation de la vitesse (diminution en fonctionnement moteur) et montre le fort couplage qui existe entre les deux axes (d q) ce qui rend le contrôle sépare très difficile.

Pour la commande des convertisseurs matriciels, on a étudié la stratégie de modulation PWM « Pulse Width Modulation » à trois intervalles et la stratégie de modulation par injection de l'harmonique trois. On a remarqué que la zone linéaire de réglage de tension est limitée jusqu'à r = 0.5 pour la stratégie à trois intervalles.

Nous proposons dans le chapitre suivant la technique de la commande vectorielle.

CHAPITRE III

Commande vectorielle du générateur éolien avec convertisseur matriciel

III.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d, q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner .

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

III.2. Modèle Simple

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en et établissant les équations quillent les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques **[28], [29], [30],[31], [32], [33].** Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statoriqueφs.

$$\emptyset_s = 0 \text{ Et } \emptyset_{qs}=0 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Le couple électromagnétique de l'équation III.7s'écrit alors:

$$C_{em} = p\frac{M}{L_s} I_{qr} \emptyset_{ds} \qquad \textbf{(III.2)}$$

Et l'équation des flux III.8devient:

$$\begin{cases} \emptyset_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple Vs, cela conduit à un Flux statorique $\emptyset s$ constant.Cette considération associée à l'équation III.9 montrequele couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadratureI_{qr}.

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

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\emptyset_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \emptyset_s \end{cases} \quad \textbf{(III.4)}$$

Avec : ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques. Et l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad \textbf{(III.5)}$$

A l'aide de l'équation III.10, on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L} I_{dr} + \frac{\emptyset_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L} I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{(III.6)}$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent:

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \textbf{(III.7)}$$

Ou bien encore, d'après l'équation III.12par:

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \textbf{(III.8)}$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace Dans l'équation précédente les courants par l'équation III.13:

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\emptyset_s}{L_s} \end{cases} \quad \textbf{(III.9)}$$

A partir des équations III.11 et III.12, nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante:

$$\emptyset_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \textbf{(III.10)}$$

L'expression des puissances(III.11) peut donc se simplifié de la manière suivante :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad \textbf{(III.11)}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation III.18Fait apparaître que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadratureI_{qr}.

De plus, la puissance réactive Q est proportionnelle au courant rotorique directeI_{dr},à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$. Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux III.5les courants statoriques par l'expression III.13 On obtient :

$$\begin{cases} \emptyset_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \emptyset_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{(III.12)}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente III.19 par leurs expressions dans l'équation III.3onobtient:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad \textbf{(III.13)}$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc régulé par la suite.

En examinant les équations III.18 et III.20, on peut établir le schéma bloc de la figure III.7qui comportée entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

On remarque que les puissances set les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Déplus, daufait delà faible valeur du glissement g, il sera possibled'établir sans difficulté une commande de vectorielle car les influences découplages resteront faibles et les axes d et q pour rond donc être command dés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine **[34]**

La première méthode consiste à négliger les termes découplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôle indépendamment les puissances Actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de Puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

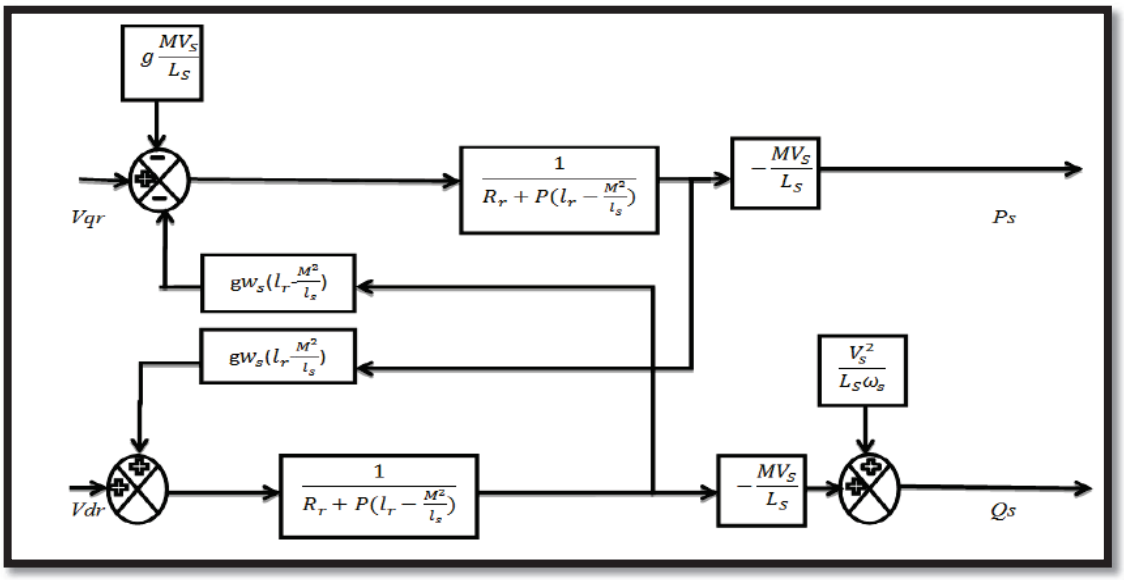


Fig.III.1. : Schéma bloc de la MADA.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissance set les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirect découle directement des équations III.18 et III.20, Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que Présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de raire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est plus Complexe à mettre en œuvre.

III.3. Contrôle directe de puissance

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précèdent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension Vqr et d'autre part lapuissance réactive et la tension Vdr

III.4. Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure III.7 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$.

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure III.7 **[35], [19].** Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la (fig.III.3)

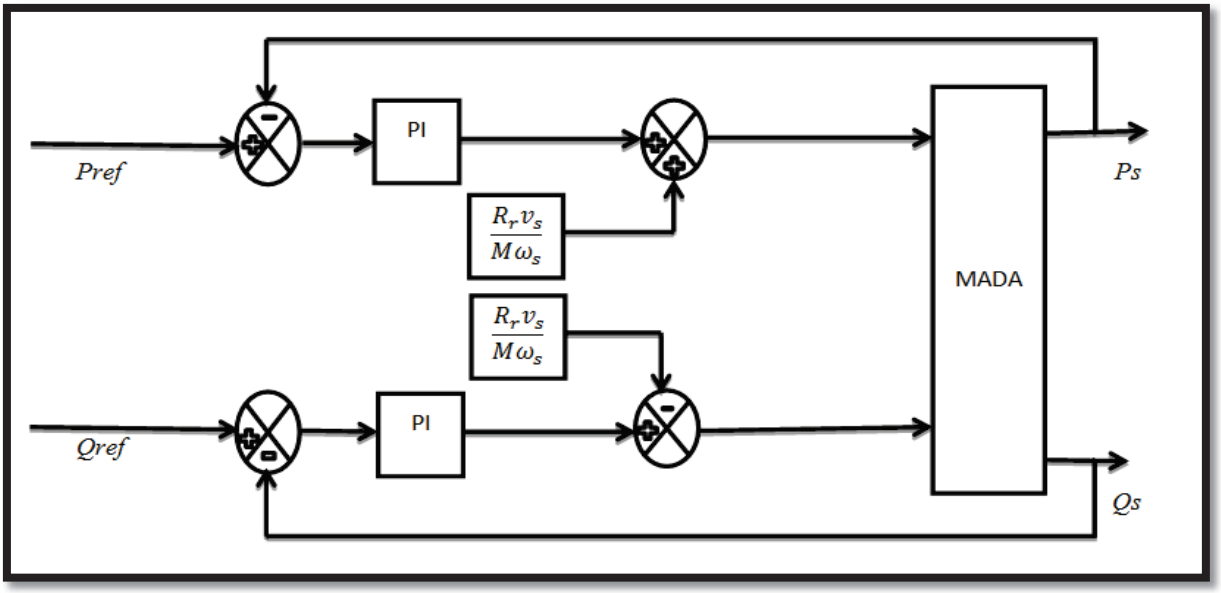


Fig.III.2. : Schéma bloc de la commande directe.

III.5 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur proportionnel intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice est simple et rapide à mettre tout en offrant des performances acceptables **[19]** c`est pour cela qui il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La figure III.9 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur P Id ont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{P}$correspondant aux deux régulateursutilisés dans la figure III.8.

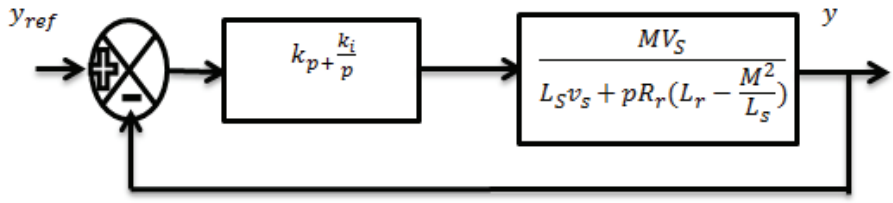


Fig.III.3. : Système Régule par un PI.

La fonction de Transfert en boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p+\frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} * \frac{\frac{MV_S}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_S})}}{p+\frac{L_S R_r}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_S})}} \qquad \textbf{(III.14)}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_S R_r}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_S})} \qquad \textbf{(III.15)}$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si l'on effectue la compensation, on obtient la **FTBO** suivante:

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_S}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_S})}}{p} \qquad \textbf{(III.16)}$$

ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1+\tau_r p} \qquad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p}\frac{L_s(L_r-\frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \tag{III.17}$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondantà une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provocant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse:

$$K_p = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s(L_r-\frac{M^2}{L_s})}{MV_s} K_i = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s R_r}{MV_s} \tag{III.18}$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI. Cette même méthode de synthèse de correcteurs sera applique pour détermine les gains des correcteurs des autres types de commandes étudiées à la section III.8.

III.6 Simulation et interprétation des résultats

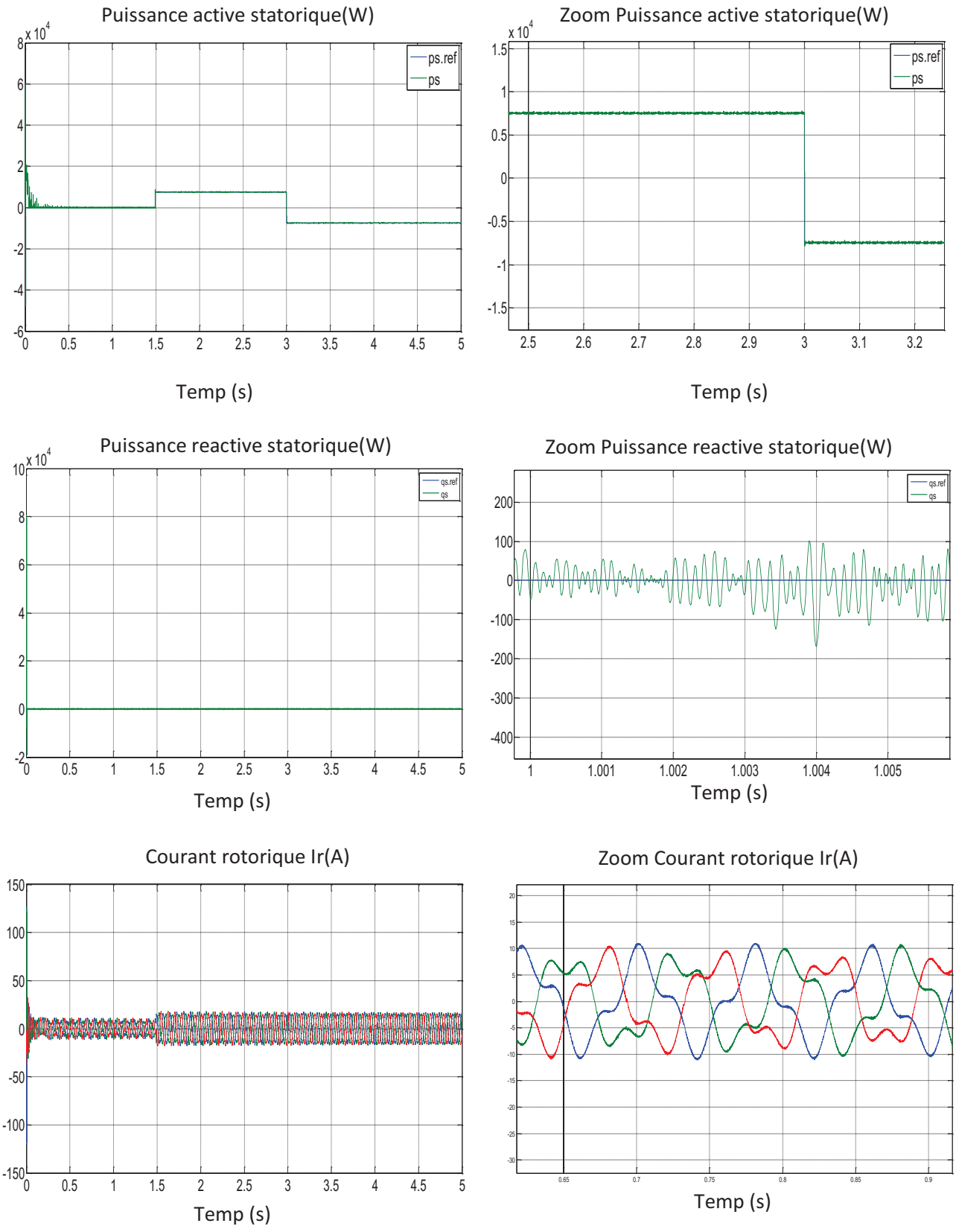


Fig. III.4. : Résultats de la simulation directe de puissance par PI.

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive.

Enfin, le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive nulle.

III.7 Fonctionnement en MPPT

III.7.1 Stratégie MPPT

La vitesse du vent étant difficilement mesurable, une stratégie MPPT sans cette mesure est présentée. Nous supposons que la vitesse du vent est constante sur la période d'étude, la vitesse de rotation de la turbine est supposée constante au regard de l'inertie importante de celle-ci. Si nous négligeons le coefficient de frottement de l'arbre mécanique, on peut écrire selon l'équation (I.20)

$$C_g = C_{em} \qquad \textbf{(III . 19)}$$

Tel que C_g : est le couple exercé sur l'arbre après le multiplicateur.

Alors, la référence du couple électromagnétique est obtenue à partir du couple de la turbine :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer}}{G} \qquad \textbf{(III . 20)}$$

Afin d'atteindre la valeur optimale de la vitesse de rotation rotorique lorsque la vitesse du vent est modifiée, le coefficient de puissance doit être maintenu à sa valeur maximale

($C_{p-\max}$). Alors, le couple aérodynamique absorbé est exprimé par [3]:

$$C_{aer} = \frac{1}{2.\Omega_t} C_{p-\max} \rho.S.V^3 \qquad \textbf{(III . 21)}$$

La vitesse de rotation de la turbine est estimée à partir de la vitesse de la génératrice par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \qquad \textbf{(III . 22)}$$

Pour une valeur constante de l'angle d'incidence de la pale β et du rapport de vitesse λ égale à sa valeur optimale λ_{opt}, la vitesse du vent peut être estimée :

$$V = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{opt}} \qquad \textbf{(III . 23)}$$

Alors, le couple électromagnétique de référence est obtenu par [3]:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt} G^3} C_{p-\max} \rho \pi R^2 \Omega^2 \qquad \textbf{(III . 24)}$$

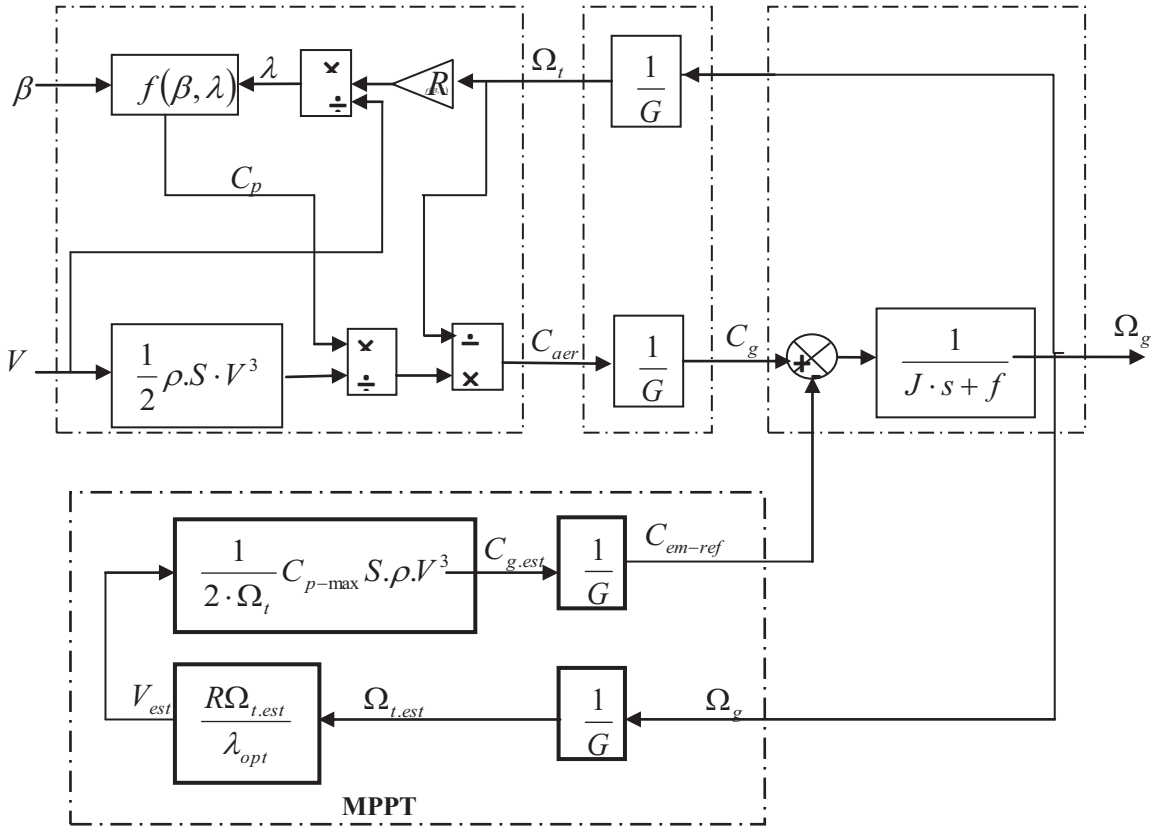


Fig.III.5: Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

III.8 Contrôle indirecte de puissance par le régulateur PI

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler **[28], [29], [19], [30], [22].** On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

III.8.1 Commande avec boucles de puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure III.13 sur lequel on distingue bien les Deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

La simulation est faite avec les paramètres suivants, les mêmes que pour la commande Directe à l'exception des correcteurs:

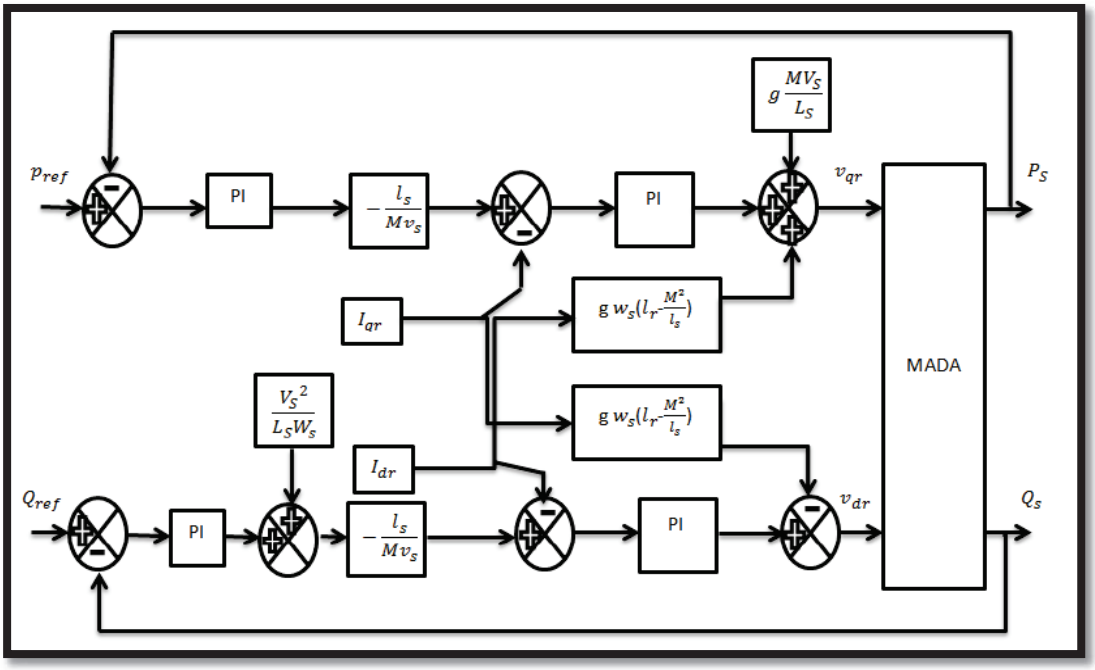


Fig.III.6 Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance.

III.8.2 Simulation et interprétation des résultats

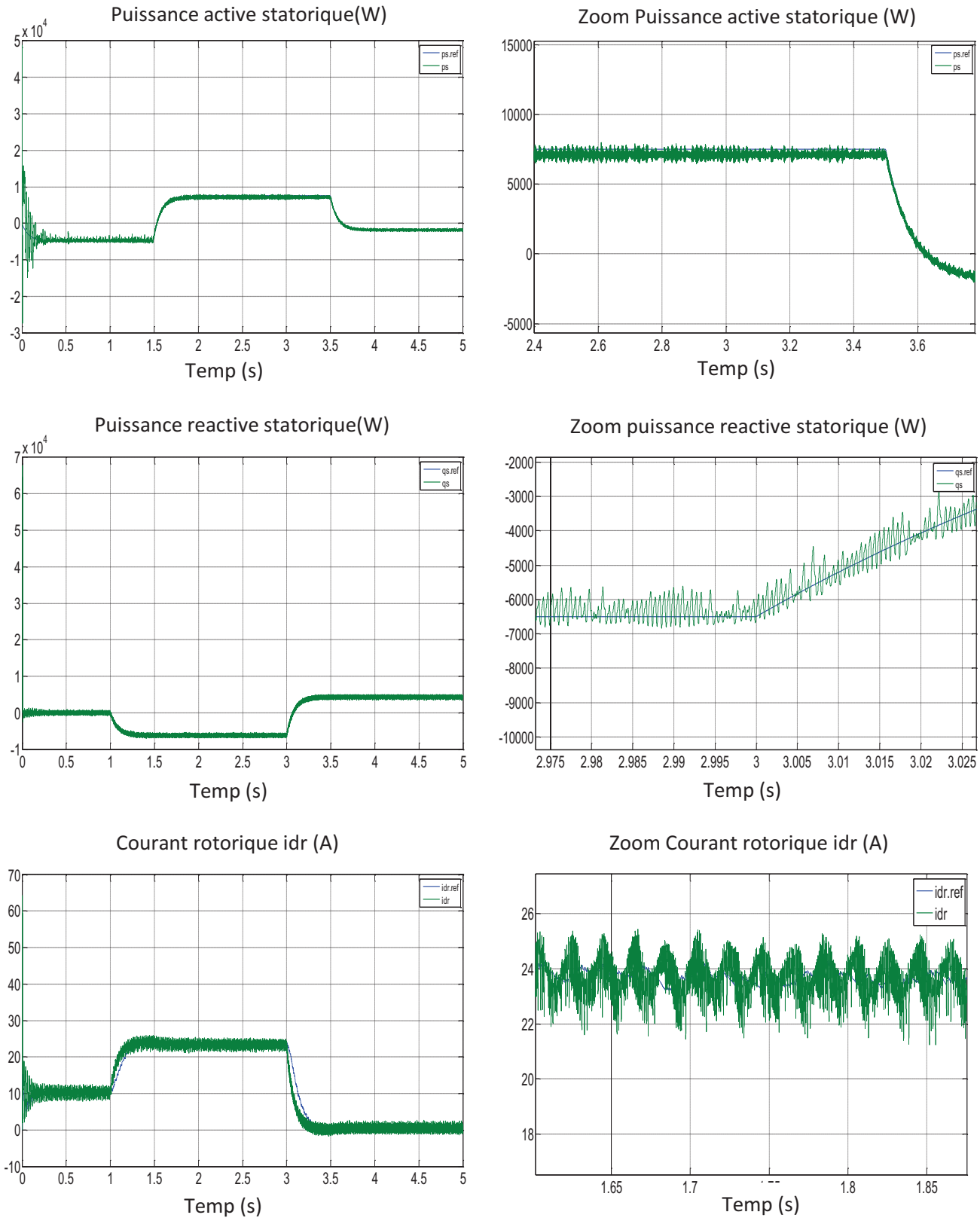


Fig.III.7 : Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance.

III.8.3 Interprétation

On remarque que notre système présente une dynamique très important et une erreur statique nulle. Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit lente et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances, le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle machine. Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances. Nous allons donc retenir la commande indirecte avec boucles de puissances. De plus, elle permet de pouvoir limiter simplement les courants rotoriques de la machine en fixant une limite dans la boucle de courant. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance pour l'unité de stockage.

III.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation alimenteé par le convertisseur matriciel. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la synthèse de la commande de la machine asynchrone à double alimentation par deux techniques différentes, à savoir la commande linéaire classique avec de type de régulateur PI, et l'autre par le convertisseur matriciel

Afin d'aborder cette étude, nous avons vu au premier chapitre une généralité sur les génératrices éoliennes et les machines asynchrones à double alimentation.

Le deuxième chapitre, nous avons réalisés un modèle mathématique de la machine asynchrone double alimentation en vue de son alimentation par le convertisseur matriciel l'association convertisseur matriciel AC/AC machine asynchrone double alimentation et on a adopté la conversion indirecte de fréquence par une tension intermédiaire fictive pour réaliser la conversion de fréquence. Ainsi, on a développé par analogie au convertisseur conventionnelle à travers une tension intermédiaire fictive deux parties:

- La partie redressement.
- La partie ondulation

On a développé deux stratégies de commande MLI du convertisseur matriciel :

- La stratégie de modulation à trois intervalles.
- La stratégie de modulation par injection de l'harmonique trois.

Les caractéristiques de réglage (donnant la variation du fondamentale de la tension délivrée par le convertisseur en fonction du taux de modulation r) de cette stratégie est linéaire jusqu'à :

- r = 0.5 pour la stratégie de modulation à trois intervalles.

Le taux d'harmoniques décroît généralement quand r augmente, ainsi l'augmentation de la valeur de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les hautes fréquences, qui seront facilement filtrés. Les harmoniques se rangent en familles centrées autour des fréquences multiples de (fp=m.fs).

Nous avons montré que la modulation par injection de le l'harmonique trois nous permet d'élargir la zone linéaire de réglage de la tension de sortie du convertisseur matriciel, sans toutefois modifier les performances de la conduite de la machine asynchrone double alimentation.

Vu que les régulateurs classiques dépendent fortement des paramètres de la machine et pour remédier à cet inconvénient nous avons introduit la

L'application de la commande par le convertisseur matriciel à la machine asynchrone à double alimentation a permis de diminué les harmoniques et l'encombrement.

ANNEXE

Les paramètres de la turbine utilisées dans la simulation

Paramètre	Signification
V = 5 m/s	La vitesse du vent
β = 0 °	Angle de calage
ρ = 1.29 Kg/m^3	Masse volumique de l'aire
R = 35.25 m	Rayon de la pale
G = 90	Rapport de transmission du multiplicateur
kf=0.0024 N.m /rad /s	Coefficient de frottement visqueux du générateur

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Paramètre	Signification
P = 4.5MW	puissance nominal consommé
Ω =1500 tr/m	Vitesse nominale
p =2	Paire de pôles
V = 690 V/50 Hz	Tension d'alimentation /fréquence
Rs =1.2Ω	Resistance statorique
Rr =1.8Ω	Resistance rotorique
Ls =0.1554H	Inductance statorique
Lr =0.1568H	Inductance rotorique
M = 0.15H	Inductance Mutuelle
J = 0.3126 Kg.m^2	Inertie du rotor
kf = 0.00673N.m.s/rad	Coefficient de frottement

Bibliographie

[1] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003,

[2] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

[3] Krishna Vasudevan and P.Sasidhara Rao « A Modular Approach to the Simulation of Doubly –fed Induction Machine Systems » Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Mdras 600036, INDIA

[4] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de génie mécanique, pp. BM 4 640 21.

[5] MENY IVAN, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004.

[6] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne, http://www.windpower.org/fr/core.htm.

[7] Adam MIRECKI, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse,

[8] M. Machmoum , F. Poitiers, L. Moreau et M.E. .Zaïm, R. le Doeuff, « Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) » LARGE-GE44, Bd de l'université, Bp 406, 44602 Saint Nazaire Cedex. E-mail : mohamed.Machmoum@polytech .uni-nantes.fr.

[9] A.H. Al-Bahrani, « Analysis of Self-excited induction generators under unbalanced conditions», Electric Machines and power systems, 24, 1996, pp.117-129.

[10] Haritza camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers , soutenue le 18 /12/2003.

[11] Salama et Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),

[12] Paul Gipe, collaborateur régulier des revues Independent Energy et Windstats. Et l'autreur des ouvrages Wind Power for Home & Busines et Wind energy comes of age. «Á l'étape de la maturité : L'énergie éolienne », http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA /aletape html

[13] H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « Stady state Analysis of A Doubly .
FED induction generator under synchronous operation» national Technical University of Athens, Départment of éléctrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol .4, NO.3, September 1989.

[14] Milutin G. Jovanovid* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191- 2273016,
Fax: +44-191-2273684 ,EMail: milut in. j ovanovic(0unn. ac . uk University of Newcastle, NSW 2308, Australia

[15] G.M BROWN « Hybrid control of a cycloconverter for Double –Fed motors in traction drivers » M.eng thesis , Mc Mster university , Hamilton , ontario 1984 en VIANT

[16] J.G. Slootweg' H. Polinder Member IEEE, W.L. Kling, « Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator », Electrical Power Systems, 2Electncat Power Processing, Faculty of Information Technology and Systems.

[17] H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « Transient State Analysis of A Doubly .
FED induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens.

[18] J. Chatelain, « Machine Electrique Traité d'électricité », Edition Dunod,Tome1,1983, France.

[19] M. V. Kazemi, A. S. Yazdankhah, H. M. Kojabadi, « Direct power control ofDFIG based on discrete space vector modulation, » Elsevier, RenewableEnergy, vol. 35, no. 5, pp. 1033-1042, May 2010

[20] Rachid. Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone àdouble alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux », Mémoirede Magister en Génie Electrique, Universite M'hamedBougara des Hydrocarbure et de Chimie, Algérie, 2008.

[21] Dahmane.K, « Contribution à la Modélisation et la Commande de la Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée par Convertisseurs Matriciels » Thèse de Magister, ENP, Alger (2004).

[22] Schuster.A, « A Drive System with a Digitally Controlled Matrix Converter Feeding an AC-Induction Machine », Proceedings of PEVD, Nottingham, pp.378-382, (1996).

[23]Buche.G, « Commande Vectorielle de Machine Asynchrone en Environnement Temps Réel Matlab/Simulink », P.F.E, CUEFA, (2001).

[24] Dahmane.K, Berkouk.EM, Mahmoudi. MO, « La Stratégie de Modulation Calculée du Convertisseur Matriciel. Application à la Conduite d'une Machine asynchrone Double Etoile », Conférence sur le Génie Electrique, CGE/04, EMP, Bordj el Bahri, Algérie, (12-13 Avril 2005).

[25] Berkouk.E.M, «Contribution à la Conduite des Machines Asynchrones Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects : Application aux Gradateurs et Onduleurs Multi niveaux » Thèse de Doctorat, CNAM Paris (1995).

[26]Huber.L , Borojevic.D, « Space vector modulated Three-Phase to Three-phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction », IEEE Trans. Ind. Elect, Vol.31, N° 6, pp.1234-1246, (1995).

[27] Neft.C, Schauder.C.D, «Theory and Design of a 30-hp Matrix Converter», IEEE

Truns. Ind. Elect, Vol.28, N° 3, pp.546-551, (1992).

[28] Lie Xu and Phillip Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for wind Energy Generation", IEEE TRANSACTIOINS ON ENERGY CONVERSIO,VOL. 21 NO:3 SEPTEYMBER 2006

[29] Hans verscth R st en, Tore M. Undeland, Terje Gjengedal, "DOUBLY FED INDUCTION Generator A WIND TURBINE"

[30] IoanSerban, FredeBlaabjerg, Ion Boldea, Zhe Chen « A Study of the Doubly-Fed Wind Power Generator Under Power System Faults » , EPE 2003 - Toulouse, ISBI : 90-75815-07-7.

[31] IoanSerban, FredeBlaabjerg, Ion Boldea, Zhe Chen « A Study of the Doubly-Fed Wind Power Generator Under Power System Faults » , EPE 2003 - Toulouse, ISBI : 90-75815-07-7.

[32] A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, J.J. Molina, J.R. Saenz, WINDEFARM MODELLING AND SIMULATION »

[33] J. Rosner, H. P. Beck, C Sourkounis, "Wind Energy converter with Asynchronous Machines and Three-Phase AC Controller in Generator Mode", ETEP Vol. 10, NO:4 July/August 2000.

[34] Zadeh, L. A, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338, 1965.

[35] J. Yan, M. Ryan & J. Power, "Using fuzzy logic", Prentice Hall International (UK), 994.

[36] E. Mamdani, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controllers", nter. Jour. on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 1-13, 1975.