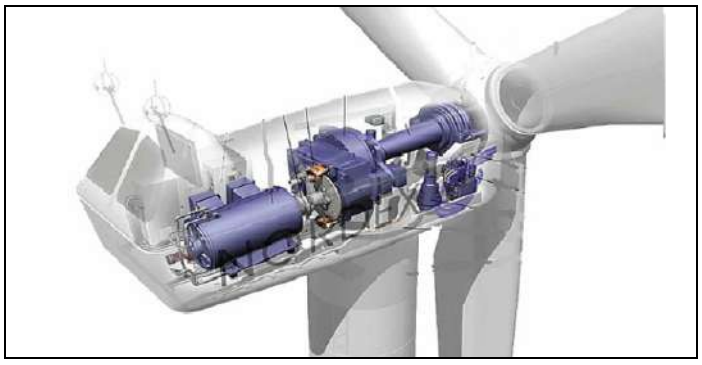
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Dr YAHIA FARES de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département du Génie Electrique et de l'Informatique

Mémoire de fin d'études

Option : Commande et électronique industrielle

Thème :
Commande d'un Générateur éolien associé à un Système Inertiel de Stockage d'Energie



Réalisé par :

- *MEMMI NESRINE.*
- *ZAIDI MOHAMED.*

Proposé et Dirigé par :

– *Dr MOUALDIA ABDELHAFID.*
– *Dr BOUCHHIDA OUAHID*

Promotion 2012-2013

REMERCIEMENTS

Nous formilons notre profonde gratitude à Dieu tout puissant,

qui nous à donné l'énergie nécessaire pour

la réalisation de ce modeste projet.

Nous adressons notre remerciement en plus particulièrement à

Mr ***MOUALDIA ABDELHAFID*** *notre promoteur,*

pour l'atteention et la vigueur avec les quelles

à suivi ce travail.

Nous exprimons nos sinores remercienment

Mr président du jury et Mrs les nombres du jury

qui nous ont homore en ayant accepte d'évaluer

le présent projet de fin d'étude.

Je dédie ce travail aux etre plus chère et plus proche de mon cœur à mes parents mon père et ma mère. Qui m'on boucoup soutenus et aider par leurs pière et leurs si chaleureux et mon chère frères : BACHIRA, HICHEM, TOUNESSE, HASSIBA, KHEIRA, CHERIFA, SARA, BASMA.

A tout ma famille sans oublies perssonnes. Comme je le dédie à mes amis que je considère comme ma deuxième famille : AHLEM, ZOHRA, SAMIRA, RACHIDA, AMINA, MALIKA, MERIEM, DALILA, SIHAM.

Aux étudiants Master II

Commande et electronique industriel.

Promo 2012-2013.

NESRINE

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

Je dédie ce modeste travail à :

Ma femme "Malika"

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille pour son soutien moral.

Et Toute la promotion 2013 d'Electrotechnique.

MOHAMED

Liste des symboles
Liste des figures
Introduction général……..….....1

CHAPITRE 01 : L'état de l'art de la turbine éolienne

1.1- Introduction ……..…..….2
1.2- La production éolienne ……...…….……...2
1.3- Définition de l'énergie éolienne ……...…..2
1.4- Fonctionnement d'une éolienne ……..……...…....3
1.5- Les différents types des turbines éoliennes ……...….....6
1.5.1- Les éoliennes à axe vertical …….....6
1.5.2- Les éoliennes à axe horizontal……..6
1.6- Principaux composants d'une éolienne. ……...……...……..7
1.7- Protection contre la corrosion.……...……...…..8
1.8- Modélisation de la turbine éolienne……..……..….....….8
1.8.1- Modélisation de la turbine...…….…9
1.8.2- Modèle du multiplicateur ……..…...……...……9
1.8.3- L'arbre de transmission…….……....10
1.8.4- Résultats du simulation de la turbine……10
1.9- Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne……10
1.9.1- Types des machines électriques……..10
1.9.1.1- Générateur synchrone (GS)…….……11
1.9.1.2- Générateur asynchrone (GAS).…...……...11
1.9.1.2.a- Machine asynchrone à cage d'écureuil.……12
1.9.1.2.b- Machine asynchrone à double alimentation.……14
a - Structure des machines asynchrones à double alimentation ……..……....…14
a.1- Double alimentation par le stator ……..…15
a.2- Double alimentation par le stator et le rotor ……...…16
b- Applications des machines asynchrones à double alimentation ……...…..17
c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable ……..17
d- Fonctionnement à vitesse fixe ……...……19
e- Intérêt de la MADA ……...……..…19

Conclusion.…….……19

CHAPITRE 02 : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

2.1- Introduction ……...……...……20
2.2- Principe fonctionnement de la MADA ……...……20
2.3- Modèle mathématique de la MADA ……...……...……21
2.3.1- Hypothèses simplificatrices ……..……...…22

2.3.2- Les équations de la machine asynchrone en régime Quelconque……..…22
2.3.3- Equations mécaniques de la MADA ……...24
2.4- Transformation de Park ……..24
2.5- Transformation de Park à la MADA.……..….25
2.6- Le couple électromagnétique ……..…..…26
2.7- Choix du référentiel ……..……..…27
2.7.1- Référentiel lié au stator…….…….....…27
2.7.2- Référentiel lié au rotor…….....…27
2.8- Résultats de simulation…….....28

Conclusion……...…....30

CHAPITRE 03 : La commande vectorielle de la MADA

3.1- Introduction ……..……..……31
3.2- Recherche du rendement maximum MPPT ……..……...…31
3.1.1- Résultat de simulation..……32
3.3- Principe de la commande vectorielle …….....……32
3.4- Modèle pour le contrôle indépendant des puissances ……..……..33
3.5- Types de commande vectorielle ……..…....….34
3.5.1- Commande vectorielle directe ……..…34
3.5.2- Commande vectorielle indirecte ……...…36
3.5.2.1- Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance……....37
3.5.2.2- Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance……...37
3.6- Association onduleur MLI à la machine…….……..…38
3.7- Modélisation de l'onduleur ……38
3.8- Stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoidale …….……...40
3.9- Résultats de simulation de la MADA avec onduleur……...41
3.10- Résultats de simulation de la MADA par la commande vectorielle…….…....43
3.11- Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau……..43
3.11.1- Modèle du bus continu……44
3.11.2- Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park……45
3.12- Architecture du dispositif de commande……45
3.13- Commande du convertisseur côté réseau……46
3.13.1- Contrôle des courants transitant dans le filtre RL……...47
3.13.2- Contrôle de la tension du bus continu……48
3.14- Résultats de simulations……50

Conclusion ……...…52

CHAPITRE 04 : Système Inertiel de Stockage d'Energie SISE

4.1- Introduction……..……...…53
4.2- Description du système étudié.....…53
4.3- Le Système Inertiel de Stockage d'Energie SISE...…….54
4.4- Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien……...……55
4.5- Constitution de la machine asynchrone…...…….……56
4.6- Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire……...59
4.6.1- Equations générales de la machine……59
4.6.2- Modèle diphasé de la machine asynchrone…..……...…….60
4.6.3- Choix du référentiel……...……...…..…61
4.6.4- Equations de Puissance et de Couple…….……...…61
4.7- Contrôle en vitesse pour le SISE et contrôle vectoriel pour la MAS……...62
4.7.1- Calcul de la vitesse de référence du volant...……..……..62
4.7.2- La transmission mécanique……...64
4.7.3- Modèle de la machine asynchrone avec orientation du flux……..64
4.7.4- Calcul du flux de référence de la MAS…….65
4.7.5- Le convertisseur……65
4.7.6- Calcul du courant de référence de la MAS……...……65
4.8- Résultats de la simulation de l'échange d'énergie entre le SISE et le réseau…..66
Conclusion …….....67

Conclusion général…….……68

ANNEXES

A.1. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation..…..……69
A.2. Paramètres de la turbine éolienne…...……..…....69
A.3. Paramètres du réseau ……..……69
A.4- Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil……69
A.5.Calcul des régulateurs……..……..……..…70

Références bibliographiques……...…….……..…..74

Chapitre 01

Figure (1-1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent……..….3
Figure (1-2) : Principe de fonctionnement d'une éolienne……..4
Figure (1-3) : Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse. …….5
Figure (1-4): Eolienne à axe vertical de type Darrieus……6
Figure (1-5) : éolienne à axe horizontal……...7
Figure (1-6) : les composants d'une éolienne……...7
Figure (1-7) : Schémas d'une turbine éolienne……9
Figure (1-8) : coefficient de puissance……...……..10
Figure (1-9) : Machine synchrone connectée directement au réseau…….……..11
Figure (1-10) : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance……..11
Figure (1-11) : Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles……...……13
Figure (1-12): Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau……13
Figure (1-13) : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance……...14
Figure (1-14) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA……15
Figure (1-15) : Cascade hypo-synchrone……15
Figure (1-16) : Machine asynchrone à double bobinage statorique…….……15
Figure (1-17) : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor……...16
Figure (1-18) : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices……17
Figure (1-19) : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [1].....…...18

Chapitre 02

Figure (2-1): Différents modes de Fonctionnement de la MADA [3]…...……..21
Figure (2-2) : Représentation schématique de la MADA [4]……..22
Figure (2-3) : Courbes de simulation de la MADA……29

Chapitre 03

Figure (3-1) : Les résultats de simulation par MPPT……..32
Figure (3-2) : Principe de la commande vectorielle…….……33
Figure (3-3) : Schéma bloc de la commande directe……...36
Figure (3-4) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance……...37
Figure (3-5) : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance……...……38
Figure (3-6) : Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux……39
Figure (3-7) : Schéma d'un bras de l'onduleur……....39
Figure (3-8): Représentation un signal de tension rotorique……41
Figure (3-9): Représentation un signal de l'entré de la commande MLI…….……41

Figure (3-10): Représentation un signal de sortie de la commande MLI……..……41
Figure (3-11) : Courbes de simulation de la MADA avec onduleur……42
Figure (3-12) : Les résultats de simulation par la commande indirecte avec boucle de puissance…….……..…....43
Figure (3-13) : Connexion du CCR au réseau électrique……44
Figure (3-14) : Architecture de commande du système éolien……46
Figure (3-15) : Principe de la commande du CCR……..47
Figure (3-16) : Contrôle des courants circulant dans le filtre RL……48
Figure (3-17) : Boucle de régulation de la tension du bus continu……..49
Figure (3-18) : Commande du CCR……50
Figure (3-19) : Courbes de simulation de la MADA..…….....51

Chapitre 04

Figure (4-1) : Schéma global du système étudie……..……...…….54
Figure (4-2) : Structure du système de stockage……..…55
Figure (4-3) : Principe du contrôle de SISE associe au générateur éolien……...55
Figure (4-4) : Eléments principaux constituant une machine asynchrone à cage d'écureuil...56
Figure (4-5) : Tôle constituant le circuit magnétique du stator…..……..57
Figure (4-6) : Stator de machines asynchrones……..……..57
Figure (4-7) : Tôle du circuit magnétique rotorique d'une machine asynchrone à cage d'écureuil…….....58
Figure (4-8) : Rotor à cage d'écureuil……..……58
Figure (4-9) : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil……..……...60
Figure (4-10) : Représentation de la machine dans le repère diphasé……....61
Figure (4-11) : Schéma de contrôle en puissance pour le SISE et contrôle vectoriel pour la MAS…….…66
Figure (4-12) : Vitesse de la MAS……..…….66
Figure (4-13) : Energie stocké du SISE…….……..67
Figure (4-14) : Vitesse du volant d'inertie……..…….67
Figure (4-15) : les puissances actives Pgref et Pmecref…....……67

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى عرض دراسة آلة لاتزامنية ثلاثية الطور مضاعفة التغذية ، ذو عضو دوار ملفوف و آلي التحكم الشعاعي غير المباشر له ، حيث تتم تغذية العضو الدوار بواسطة مموج ثلاثي الأطوار ثنائي المستوى يتم التحكم فيه بالتيار ، مقوم ثلاثي الأطوار ثنائي المستوى مشكل من ثنائيات المساري مصفاة لترشيح الجهود الكهربائية عالية التواتر. بغية التحكم في هذه الآلة نستعمل منظم تناسبي و تكاملي ذو نمط كلاسيكي و العضو الساكن مغذى بالشبكة.

من أجل هذا، عرضنا أولا لما قد خصت به هذه الآلة من قبل باحثين في هذا المضمار، ثم انتقلنا بعد ذلك إلى إعطاء نموذج رياضي للآلة. اتبعناه بمحاكاة، و بما أن تغذية الآلة تتم عبر مموج ذي مستويين، فقد قمنا كذلك بإعطاء نموذجه الرياضي و طريقة التحكم فيه. أما فيما يتعلق بالتفكيك بين التدفق و العزم ، فقد استعملنا التحكم الشعاعي الذي يوجه فيه التدفق وفق العضو الدوار. وبينت نتائج المحاكاة أن الفصل بين التدفق و العزم قد تم فعلا.

كما تعرضنا لمشكلة عدم استقرار التوتر بين الخاصين بمدخل المموج عند تغذيته بمقوم ذي مستويين، و لهذا الغرض اقترحنا معدلات للتحكم الخطي و التي أعطت نتائج جيدة، يخص التحكم في القيمة المتوسطة لتوتري مدخل المموج.

و في الأخير قمنا بتقنية تخزين الطاقة المتحصل عليها من قبل هذه الآلة باستعمال آلة لاتزامنية ذو قفص السنجاب ثلاثية الطور مغذاة بمموج ثلاثي الطور ذي مستويين مع استعمال تقنية التحكم الشعاعي غير مباشر.

كلمات مفتاحية : مموج ثلاثي الأطوار ثنائي المستوى ، مقوم ثلاثي الأطوار ثنائي المستوى ، التحكم الشعاعي.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude et la commande vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) ; alimentée au rotor par un onduleur de tensions triphasé à deux niveaux à Modulation de Largeur d'Impulsion indépendants, un redresseur triphasé à deux niveaux à diodes et un filtre passe-bas. Pour commander la machine, on a utilisé un régulateur de vitesse de type PI classique, et le stator alimenté par le réseau.

Pour ce faire, nous avons d'abord dressé un état de l'art de la machine étudiée, puis nous avons présenté son modèle mathématique que nous avons simulé en utilisant MATLAB. L'alimentation de la MADA est assurée par un onduleur triphasé à deux niveaux pour lequel nous avons donné son modèle de connaissance ainsi que sa stratégie de commande. Le problème de découplage entre le flux et le couple à été également étudié. Les résultats de simulation montrent que l'objectif assigné à été atteint.

L'asservissement des tensions d'entrée de simulation montre que les tensions V_{dc} suivent bien la référence V_{dcref} .

Mots Clés : Onduleur triphasé à deux niveaux, redresseur triphasé à deux niveaux, commande vectorielle.

Abstract

In this work, a study of a vector control of a doubly fed induction machine (DFIM), by a three phase two level converter connected to a rotor has been undertaken a Pulse Width Modulation voltage source inverters, a three phase rectifier of diodes, and a low-pass filter. Two speed regulators are used to control the speed of this machine. One is a conventional PI regulator, and stator directly to the network.

For this purpose, a state of the art of the studied machine has been carried out. A mathematical model of the machine is then presented using MATLAB.

The DFIM which is fed by a three phase tow level PWM converter has been modeled and its control approach has been given.

Also, the problem of decoupling between the flux and the torque has been treated. The simulation results show that the assigned objective has been reached.

Furthermore, the fed back input inverter voltage control shows that the input voltage V_{dc} of the converter follow the reference voltage V_{dcref} .

Keywords: Three phase two level converter, three phase two level rectifier, vector control.

Introduction générale

Les éoliennes représentent une part importante de la production d'énergie renouvelable. Suite à la crise pétrolière européenne des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est de plus en plus performante et l'industrie éolienne à connu un essor considérable lors de la dernière décennie. Les turbines éoliennes sont de plus en plus puissantes, les rendements et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens sont de plus en plus grands.

La consommation énergétique mondiale est en constante augmentation. Dans le but de limiter le réchauffement climatique, la plupart des gouvernements européens ont entrepris des démarches visant à réduire l'émission de dioxyde de carbone. Il est aujourd'hui acquis que ces objectifs ne seront atteints que par réduction des consommations énergétiques et par la mise en place de structures d'exploitation des énergies renouvelables de grande envergure.

Dans ce contexte, les turbines éoliennes présentent une alternative sérieuse. Plusieurs pays européens ont des projets de développement éoliens impressionnants pour les années à venir. Certains gouvernements favorisent ce type d'actions via des aides financières (réduction de taxes ou investissements).

Les pays d'Europe du nord bénéficiant de grandes surfaces côtières fortement ventées et de réseaux électriques puissants et finement maillés offrent des opportunités prometteuses aux investisseurs et aux entrepreneurs de parcs éoliens.

Ce mémoire est constitue d'une introduction générale, quatre chapitres, une conclusion générale et une bibliographie. Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les éoliennes, suivies par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés. Dans le deuxième chapitre, on présente une étude sur la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. Sa mise en équation permettra de simuler son modèle, en l'alimentant par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites ; l'une au niveau du stator et l'autre au niveau du rotor qui est entrainée a une vitesse fixe. Le troisième chapitre consiste en application de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique à la machine asynchrone à double alimentation. Le stator de la MADA est alimenté par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasée à MLI à deux niveaux, commandée par la stratégie triangulo-sinusoïdale. L'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Est complément de la partie précédente, ou on se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasée à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Le dernier chapitre on utilisera le système inertiel de stockage « SISE » pour stocké l'énergie, est constitue d'une machine asynchrone à cage lié avec volant d'inertie au niveau du l'arbre, et le stator alimenté par le deuxième l'onduleur triphasé à MLI à deux niveau, commandée par la stratégie triangulo-sinusoïdale. Avec l'alimentation constante.

1.1- Introduction

Une éolienne à 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 des certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est crée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

Après avoir pendent long temps été oublié, cette énergie pourtant exploité depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment duaux premiers chocs pétroliers.

1.3- 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.

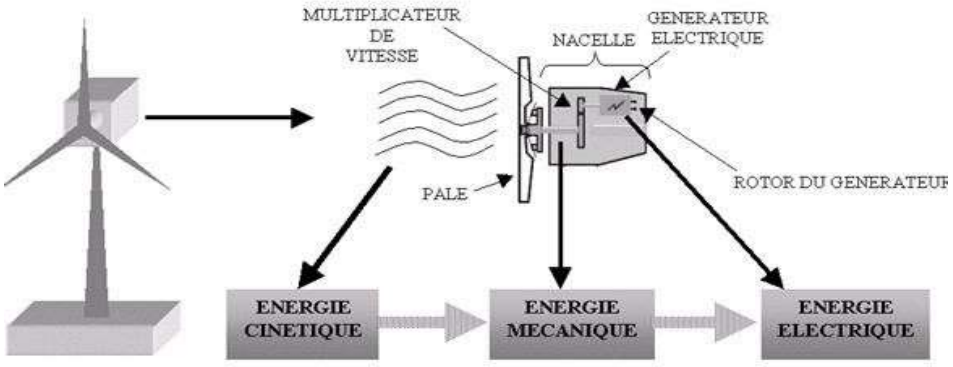


Figure (1-1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

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. 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 [1].

1.4- Fonctionnement d'une éolienne

a. Principe

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent}. Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse de seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placée avec l'angle de calage éolien et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [2].

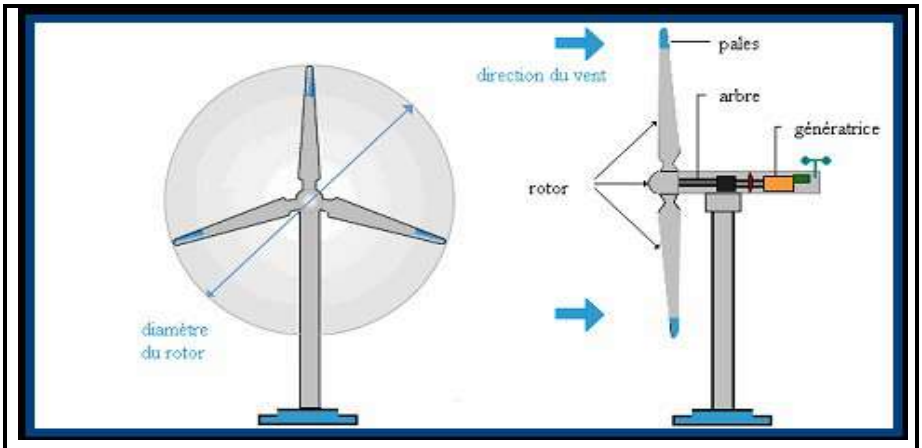


Figure (1-2) : Principe de fonctionnement d'une éolienne.

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon *R,* est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V_{vent}^3 \quad (1\text{-}1)$$

Cette puissance ne peut être totalement captée, cela voudrait dire que la vitesse du vent est nulle en aval des pales, on exprime alors la puissance captée par une éolienne [3] :

$$P_{cap} = C_p(\lambda) P_{vent} \quad (1\text{-}2)$$

C_p : Coefficient de puissance ou coefficient de performance.

b. Le coefficient de puissance

Le C_p représente le rapport de la puissance récupéré sur la puissance récupérable. Ce coefficient qui ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de **Betz** qui est 16/27 soit 0.5926 [4], [5] c'est cette valeur qui fixe la puissance extractible pour une vitesse de vent donnée. Sa relation s'exprime comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S_t V^3} \quad (1\text{-}3)$$

Avec :

- P_t : puissance de la turbine éolienne ;
- $S_t = \pi R^2$: surface balayée par la turbine éolienne.

Le C_p est en fonction du rapport λ entre la vitesse linéaire des extrémités des pales sur la vitesse du vent, il est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (1\text{-}4)$$

Où Ω_t est la vitesse du rotor à faible vitesse, sachant que la vitesse Ω_r du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \tag{1-5}$$

Où G représente le rapport de la vitesse du multiplicateur. On peut donc exprimer le rapport λ en fonction de la vitesse de la machine par :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{G V_{vent}} \tag{1-6}$$

Ce rapport λ s'appelle rapport de vitesse en bout de pales ou rapport d'avance. La puissance mécanique transmise au rotor égale à la puissance captée, et s'écrit :

$$P_{tr} = P_{cap} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \tag{1-7}$$

L'allure de la variation du C_p en fonction du rapport de vitesse est illustrée sur la figure (1-3) [6] :

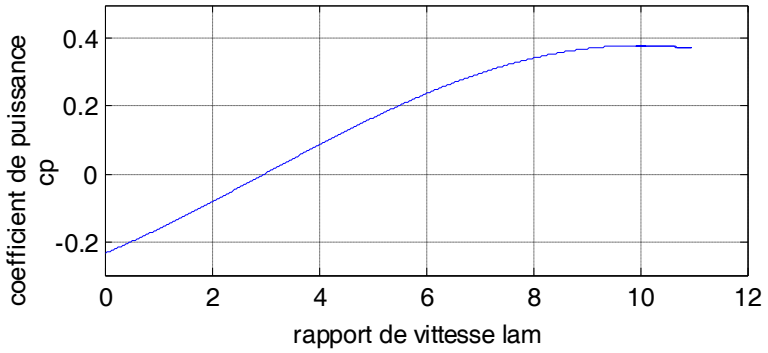


Figure (1-3) : Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse.

c. Le coefficient du couple

Le coefficient de couple C_m est essez proche du coefficient de puissance. Il est très utile afin d'estimer la valeur des couples aux différents points de fonctionnement. Sa valeur est déterminée par la relation suivante [5], [7], [8] :

$$C_m = \frac{C_t}{\frac{1}{2}\rho S_t R V^3} \tag{1-8}$$

Avec :

- C_t : couple de la turbine éolienne ;
- R : rayon de la turbine éolienne.

1.5- Les différents types 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:

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

1.5.1- Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne (figure (1-4)) 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 .



Figure (1-4): Eolienne à axe vertical de type Darrieus.

1.5.2- Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (figure (1-5)) beaucoup plus largement employée, 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. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi- pales.



Figure (1-5) : éolienne à axe horizontal.

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

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 KW.
- 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.

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

1.6 -Principaux composants d'une éolienne

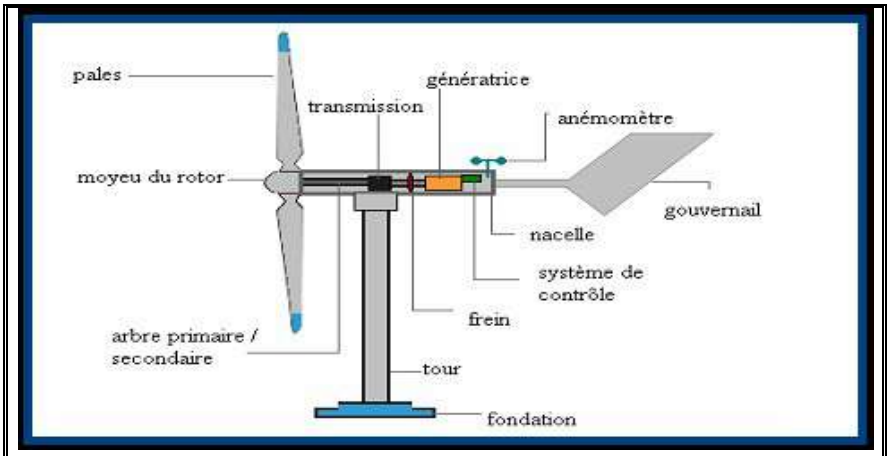


Figure (1-6) : les composants d'une éolienne.

- **Pales :** Les pales captent l'énergie du vent et la transfèrent au moyeu du rotor.

- **Moyeu du rotor :** Il transmet le mouvement de rotation à l'arbre de transmission qui lui est solidaire.
- **Arbre de transmission :** Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique.
- **Transmission :** Appelée aussi multiplicateur, elle adapte la vitesse de rotation au fonctionnement de la génératrice. (Elle n'est pas nécessaire dans les petites éoliennes).
- **Frein :** Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **Génératrice :** Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur, dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique.
- **Système de contrôle :** Il surveille le fonctionnement de l'éolienne, signale et commande l'arrêt de l'éolienne en cas de défaillance.
- **Anémomètre :** Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).
- **Nacelle :** C'est le coffret qui se trouve en haut du mât. IL contient et protège les différents composants de l'éolienne (la transmission, la génératrice, le système de contrôle, etc.).
- **Gouvernail :** C'est le système d'orientation pour les petites éoliennes; Il sert à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent afin de tirer le maximum d'énergie.
- **Mât et fondation :** Sont les éléments qui supportent la nacelle et le rotor; ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes dues aux conditions du site. Plus le mât est haut, plus les pales captent du vent (la vitesse du vent augmentant avec l'altitude).

Dans le cas des éoliennes domestiques de petites puissances on utilisera des mâts haubanés car ils sont économiques et faciles à installer. Cependant leur installation demande beaucoup d'espace et les haubans constituent un inconvénient majeur s'ils sont mal ancrés ou s'ils viennent à se casser.

1.7- 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 moyeu du rotor, sont galvanisés.

1.8- Modélisation de la turbine éolienne

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur *R*, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, qui entrainera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G.

1.8.1- Modélisation de la turbine

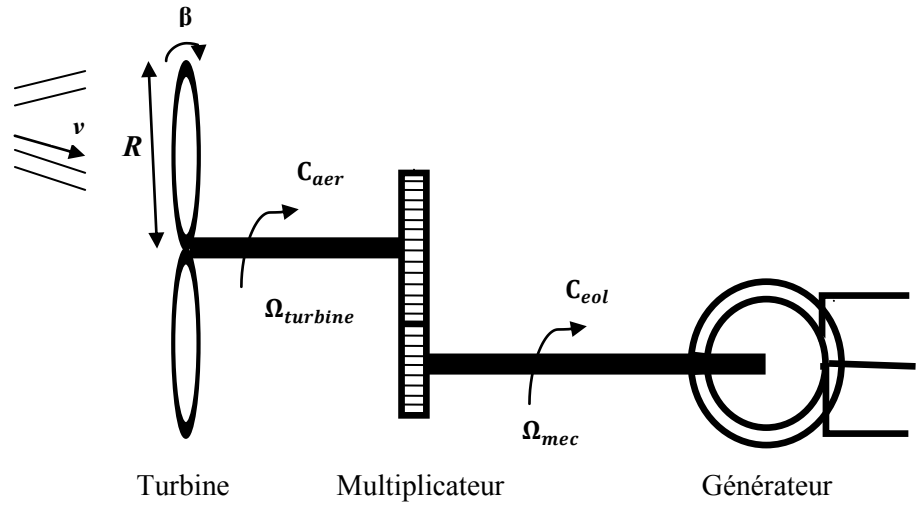


Figure (1-7) : Schémas d'une turbine éolienne.

La puissance du vent est définie comme suit [5] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V_{vent}^3$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [5], [6] :

$$P_{aér} = P_{vent}\, C_p = \frac{1}{2} C_p(\lambda,\beta)\rho\pi R^2 V_{vent}^3 \quad (1\text{-}9)$$

Avec :

$$C_p(\lambda,\beta) = (0.44 - 0.0167\beta)\sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda-3)\,\beta \quad (1\text{-}10)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine}\, R}{V_{vent}}$$

- β : l'angle d'orientation des pales.

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2\Omega_{turbine}} \rho S V_{vent}^3 \quad (1\text{-}11)$$

1.8.2- Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (1\text{-}12)$$

Avec :

- C_g: couple issu du multiplicateur ;
- G : gain du multiplicateur.

1.8.3- L'arbre de transmission

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [5] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + K_f \Omega_{mec} = C_g - C_{em} \quad (1\text{-}13)$$

Avec :

- J_t : inertie totale comprenant l'inertie de la génératrice et celle de la turbine :
- K_f : coefficient de frottement visqueux.

1.8.4- Résultats de la simulation de la turbine

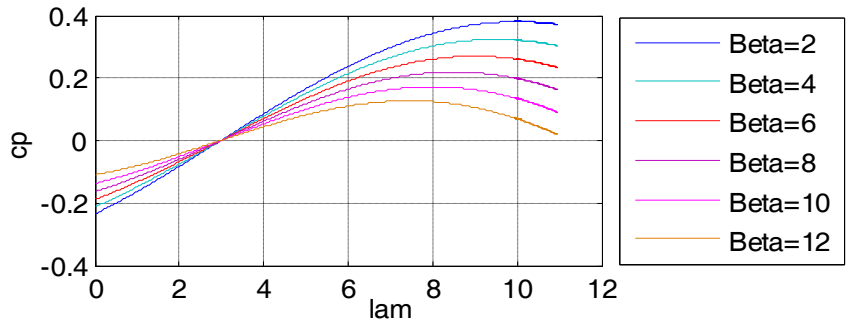


Figure (1-8) : coefficient de puissance en fonction de λ.

Les caractéristiques de C_p en fonction λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (1-8). La valeur maximale de C_p (C_{pmax} =0.38) est atteinte pour β=2 et λ=10. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} .

1.9- Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types des machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

1.9.1-Types des machines électriques

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

1.9.1.1- Générateur synchrone (GS)

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédées 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 (figure1.9), 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 (1-10)).

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.

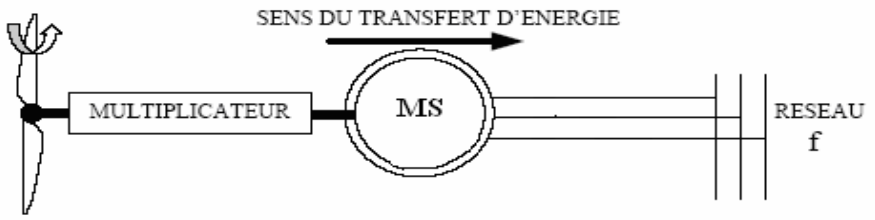


Figure (1-9) : Machine synchrone connectée directement au réseau.

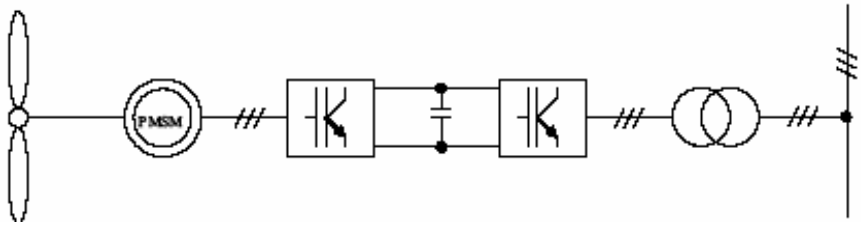


Figure (1-10) : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

1.9.1.2- Générateur asynchrone (GAS)

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.
- les machines asynchrones à rotor bobiné.

1.9.1.2. 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 pale 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 (1-11).

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 (figure (1-11)), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600tr/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 (1-12)).

La machine a un nombre de paire 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, sille 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 (1-12), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

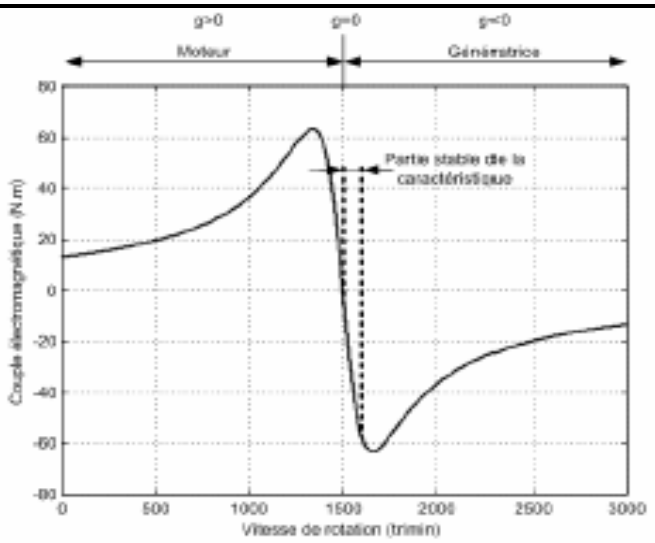


Figure (1-11) : Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles.

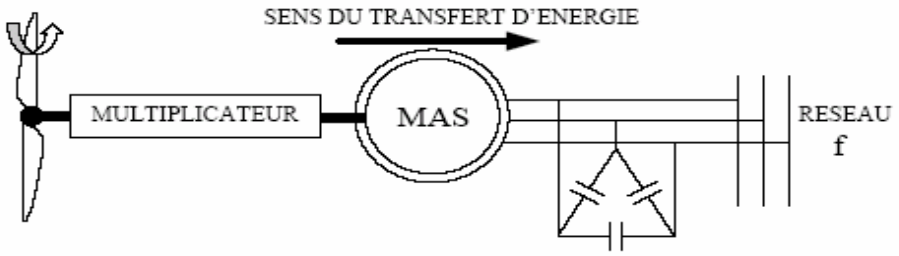


Figure (1-12): Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

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 (1-13)).

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.

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.

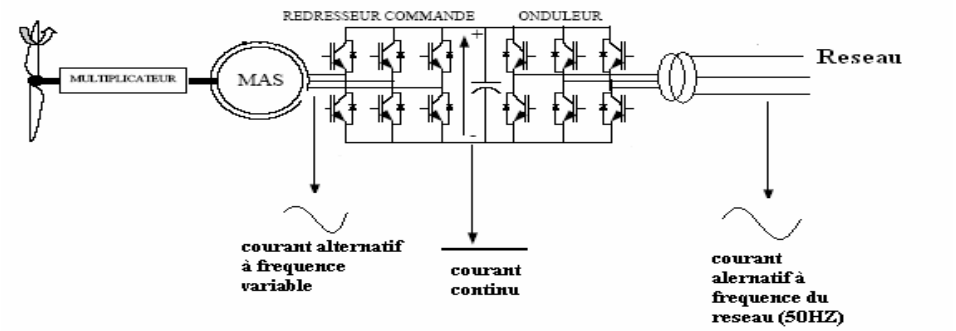


Figure (1-13) : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et sont coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsque 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.

1. 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.

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.

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 donner 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.

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.

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 connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure1-14).

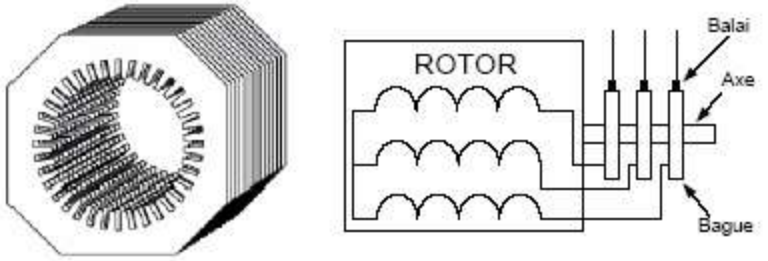


Figure (1-14) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

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.

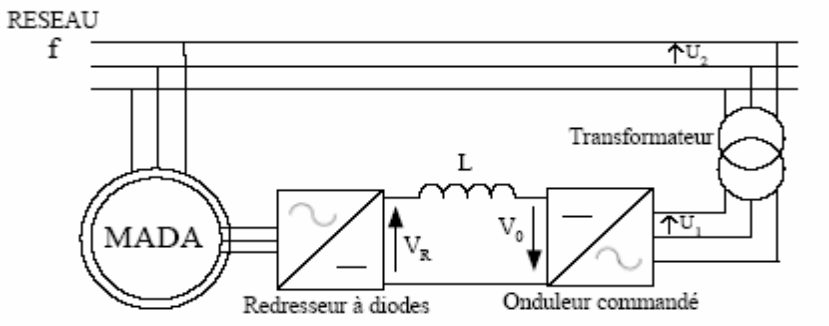


Figure (1-15) : Cascade hypo-synchrone.

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 (1-16)).

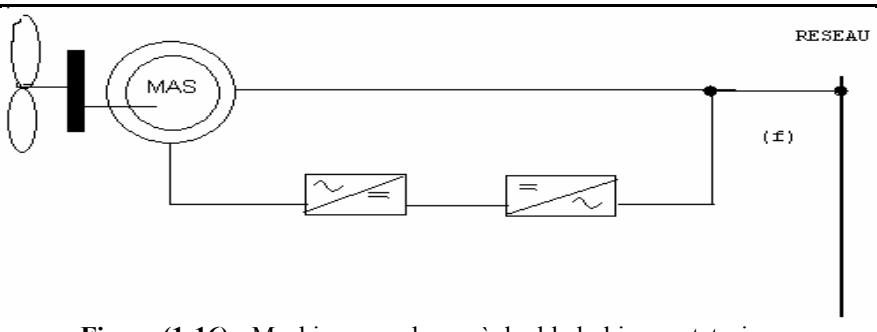


Figure (1-16) : Machine asynchrone à double bobinage statorique.

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 paire 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 vérifie 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 (figure1-17).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, ont 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 *gf*.

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 (1-18)). 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.

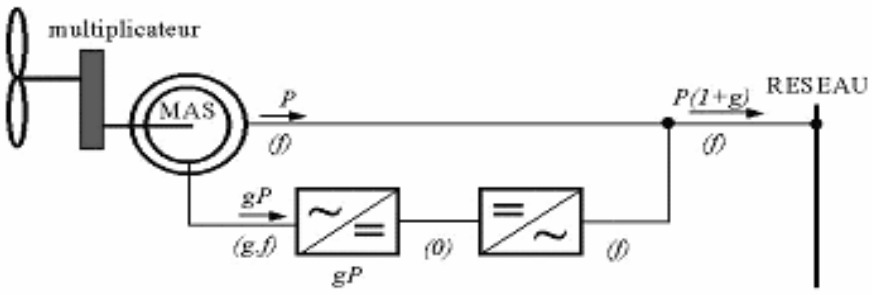


Figure (1-17) : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.

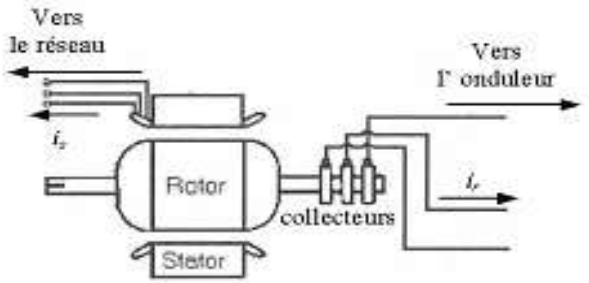


Figure (1-18) : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.

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.

c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure (1-19) 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 PMW), 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.

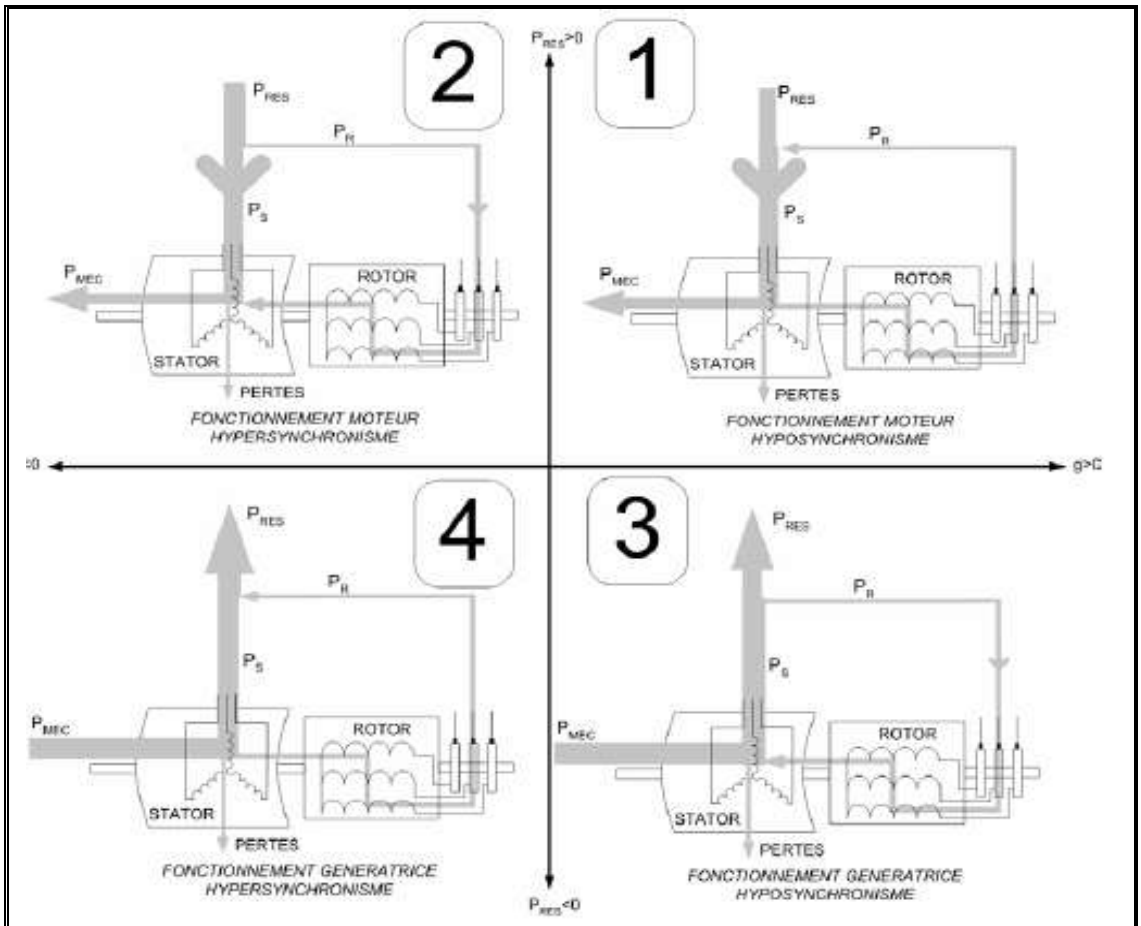


Figure (1-19) : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [1].

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 gP_{MEC} 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 30 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.

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 [9].

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 :

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.

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.

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.

Annexes

Chapitre 01
Etat de l'art des génératrices éoliennes

Chapitre 02
Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Chapitre 03
Commande vectorielle à flux statorique orientée de la MADA

Chapitre 04

Système Inertiel de Stockage d'Energie SISE

Introduction Générale

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Sommaire

Liste des symboles

Dédicaces

*

Remerciements

Liste des figures

Résumé

2.1- Introduction

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

2.2- Principe fonctionnement de la MADA

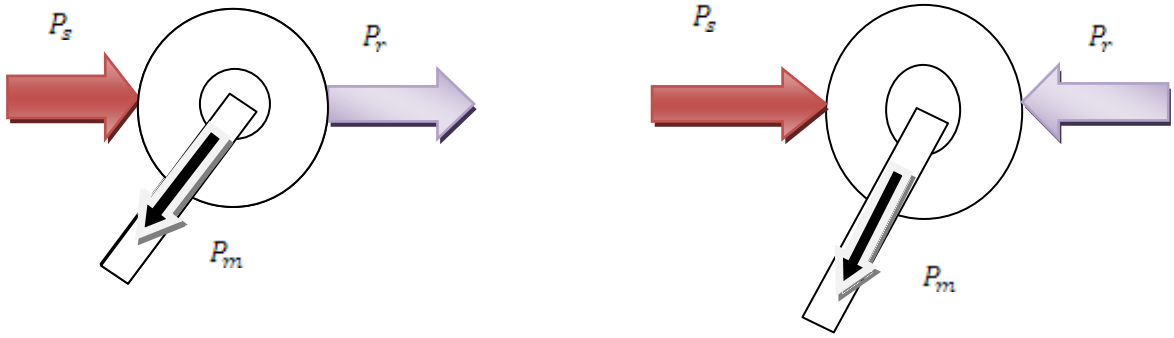
Pour le fonctionnement de la MADA, elle est excitée simultanément au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentations. Une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée pour garantir une certaine stabilité de la machine. Le caractère synchrone de ce type de machine demeure dans la mesure où la vitesse du rotor ne sera ni synchronisée avec la vitesse du champ du stator ni avec celui du rotor, mais elle sera donnée par leur combinaison linéaire, telle que :

$$\omega = p\Omega = \omega_s \pm \omega_r$$

(-) pour fonctionnement hyper-synchrone et (+) pour fonctionnement hypo-synchrone.

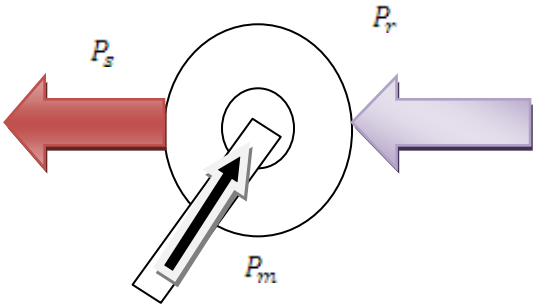
Dans les deux modes de fonctionnement et par l'imposition des fréquences, la vitesse en régime permanent est constante pour n'importe quelle charge.

Comme la MADA peut fonctionner en moteur et en générateur aux vitesses hypo-synchrone et hyper-synchrone, on peut distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine comme il est illustré par la figure (2-1) [10].

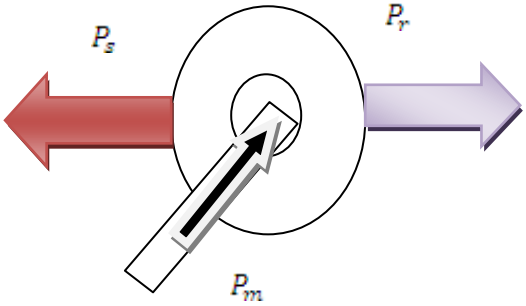


a- Fonctionnement moteur hypo-synchrone

b- Fonctionnement moteur hyper-synchrone



c- Fonctionnement génératrice hypo-synchrone



d- Fonctionnement génératrice hyper-synchrone

Ps : Puissance du stator, **Pr** : Puissance du rotor, **Pm** : Puissance mécanique

Figure (2-1): Différents modes de Fonctionnement de la MADA [10].

La figure (2-1-a) montre le fonctionnement en moteur hypo-synchrone, dont la puissance P_r est fournie par le rotor, ce régime est généralement connu comme un mode de récupération d'énergie de glissement. Dans le cas ou la vitesse augmente de sorte que le moteur fonctionne en hyper-synchrone, dans ce cas la puissance P_r devient absorbée par le rotor comme illustre la figure (2-1-b).

Dans le cas où la machine fonctionne en mode génératrice hypo-synchrone comme nous montre la figure (2-1-c), la puissance P_r est absorbée par le rotor et si la vitesse augmente de sorte que la génératrice fonctionne en hyper-synchrone dans ce cas là, la puissance P_r est fournie par le rotor comme illustré la figure (2-1-d).

2.3- Modèle mathématique de la MADA

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement est un modèle 'régime permanent'. C'est-à-dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée sous un système triphasé de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante.

Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable. Ce modèle ne l'est plus si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle.

Le contrôle de vitesse le plus simple, dit « *V* sur *f* » permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage : c'est un contrôle scalaire. Les équations de la machine qui permettent de calculer le couple et de prévoir les points de fonctionnement sont basées sur le modèle' régime permanent' de la machine.

Il existe un schéma de contrôle base sur le modèle 'transitoire' ou 'dynamique' de la machine qui est le contrôle vectoriel de la machine.
Ce type de contrôle permet d'avoir une dynamique de réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle de couple.

L'étude de la machine asynchrone est basée essentiellement sur la transformée de *Park* qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électrique ment perpendiculaires appelés d pour l'axe direct, et q pour l'axe quadrature.

2.3.1- Hypothèses simplificatrices

On adopte les hypothèses simplificatrices qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plus part des applications ; ces hypothèses sont les suivantes:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet que la f.m.m crée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale...

2.3.2- Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en figure (2-2).

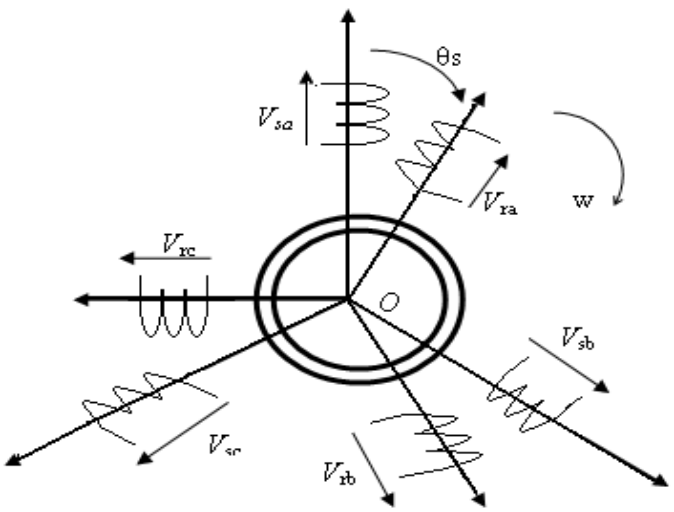


Figure (2-2) : Représentation schématique de la MADA [11].

La loi de faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements [2], [12] :

$$\begin{cases}[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (2\text{-}1)$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases}\phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (2\text{-}2)$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (2-2) dans (2-1), on obtient :

$$\begin{cases}[v_s] = [R_s][i_s] + P([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + P([L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s]) \end{cases}$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix};\ [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix};\ [\emptyset_s] = \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix};\ [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix};\ [\emptyset_r] = \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix}$$

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

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix};\ [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

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

Où :

- $[v_s]$, $[v_r]$: vecteurs de tensions statorique et rotorique ;
- $[i_s]$, $[i_r]$: vecteurs de courants statorique et rotorique ;
- $[\emptyset_s]$, $[\emptyset_r]$: vecteurs de flux statorique et rotorique ;
- $[R_s]$, $[R_r]$: vecteurs de résistances statorique et rotorique ;
- $[L_{ss}]$,$[L_{rr}]$: vecteurs d'inductances statorique et rotorique ;

- $[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre $[M_{sr}]=[M_{sr}]^T$;
- P : opérateur de Laplace ;
- l_s : est l'inductance propre d'une phase statorique ;
- l_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique ;
- M_s: est l'inductance mutuelle entre deux phases statorique ;
- M_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

2.3.3- Equations mécaniques de la MADA

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{1}{2} p[i]^T \frac{d[L]}{dt}[i] \quad (2\text{-}3)$$

Avec :
- $[i]$: Matrice de courant total ;
- $[L]$: Matrice d'inductance totale ;
- p : est le nombre de paire de pole.

$$[i] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}; \quad [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$$

Compte tenu que tous termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_e = p[I_s]^T \left(\frac{d}{d\theta}[M_{sr}]\right)[i_r] \quad (2\text{-}4)$$

$$J\frac{d}{dt}\Omega = C_e - C_r - K_f\Omega \quad (2\text{-}5)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

2.4- Transformation de Park

La transformation de *Park* est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d-q-o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [13].

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q).

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}6)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)\,]^{T}$$

Le changement des variables relatifs aux courants, tension et flux est défini par la transformation (2-6) :

$$\left[x_{dqo} = [P(\theta)][x_{abc}]\right] \quad (2\text{-}7)$$

2.5- Transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformation de *Park* pour chaque vecteur définie précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celle du rotor, on obtient :

- **Pour le stator**

$$\left[i_{dqo}\right]_s = [P(\theta_s)][i_s];\ [i_s] = [P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{dqo}\right]_s \quad (2\text{-}8)$$

$$\left[v_{dqo}\right]_s = [P(\theta_s)][v_s];\ [v_s] = [P(\theta_s)]^{-1}\left[v_{dqo}\right]_s \quad (2\text{-}9)$$

$$\left[\phi_{dqo}\right]_s = [P(\theta_s)][\phi_s];\ [\phi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}\left[\phi_{dqo}\right]_s \quad (2\text{-}10)$$

- **Pour le rotor**

$$\left[i_{dqo}\right]_r = [P(\theta_r)][i_r];\ [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1}\left[i_{dqo}\right]_r \quad (2\text{-}11)$$

$$\left[v_{dqo}\right]_r = [P(\theta_r)][v_r];\ [v_r] = [P(\theta_r)]^{-1}\left[v_{dqo}\right]_r \quad (2\text{-}12)$$

$$\left[\phi_{dqo}\right]_r = [P(\theta_r)][\phi_r];\ [\phi_r] = [P(\theta_r)]^{-1}\left[\phi_{dqo}\right]_r \quad (2\text{-}13)$$

Avec :

$$\left[i_{dqo}\right]_s = \left[i_{sd}\ \ i_{sq}\ \ i_{so}\right]^T; \left[i_{dqo}\right]_r = \left[i_{rd}\ \ i_{rq}\ \ i_{ro}\right]^T$$

$$\left[v_{dqo}\right]_s = \left[v_{sd}\ \ v_{sq}\ \ v_{so}\right]^T; \left[v_{dqo}\right]_r = \left[v_{rd}\ \ v_{rq}\ \ v_{ro}\right]^T$$

$$\left[\phi_{dqo}\right]_s = \left[\phi_{sd}\ \ \phi_{sq}\ \ \phi_{so}\right]^T; \left[\phi_{dqo}\right]_r = \left[\phi_{rd}\ \ \phi_{rq}\ \ \phi_{ro}\right]^T$$

a- Equation des tensions

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad (2\text{-}14)$$

En introduisant les équations (2-8), (2-9) et (2-10), on obtient :

$$[P(\theta_s)]^{-1}\left[v_{dqo}\right]_s = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{dqo}\right]_s + \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}\left[\phi_{dqo}\right]_s) \quad (2\text{-}15)$$

D'où :

$$\left[v_{dqo}\right]_s = [R_s]\left[i_{dqo}\right]_s + [P(\theta_s)][P(\theta_s)]^{-1}\frac{d}{dt}(\left[\phi_{dqo}\right]_s) + [P(\theta_s)]\left[\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1})\right]\left[\phi_{dqo}\right]_s \quad (2\text{-}16)$$

Avec :

$$[P(\theta_s)]\left[\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1})\right] = \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)\begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \quad (2\text{-}17)$$

On écrit :

$$\begin{cases}[v_{sd}] = [R_s][i_{sd}] + \frac{d}{dt}(\phi_{sd}) - \omega_s\phi_{sq}\\ [v_{sq}] = [R_s][i_{sq}] + \frac{d}{dt}(\phi_{sq}) + \omega_s\phi_{sd}\end{cases} \quad (2\text{-}18)$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes :

$$\begin{cases}[v_{rd}] = [R_r][i_{rd}] + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - (\omega_s - \omega)\phi_{rq}\\ [v_{rq}] = [R_r][i_{rq}] + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + (\omega_s - \omega)\phi_{rd}\end{cases} \quad (2\text{-}19)$$

2.6- Le couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance.

La puissance transmise entre deux armatures pour développer le couple s'écrit comme suite:

$$P_e = M\omega img(\overrightarrow{I_r}\,\overrightarrow{I_s}) \quad (2\text{-}20)$$

Le couple électromagnétique alors:

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = pMimg(\overrightarrow{I_r}\,\overrightarrow{I_s}) \quad (2\text{-}21)$$

(Où p est le nombre de paires de pôle), alors:

$$C_e = p(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}) \quad (2\text{-}22)$$

$$C_e = p(\phi_{rq}I_{rd} - \phi_{rd}I_{rq}) \quad (2\text{-}23)$$

$$C_e = pM(I_{rd}I_{sq} - I_{rq}I_{sd}) \quad (2\text{-}24)$$

$$C_e = p\frac{M}{L_r(\phi_{rd}I_{sq} - \phi_{rq}I_{sd})} \quad (2\text{-}25)$$

$$C_e = p\frac{M}{L_s(\phi_{sq} I_{rd} - \phi_{sd} I_{rq})} \quad (2\text{-}26)$$

2.7- Choix du référentiel

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

Il existe trois choix importants. On peut fixer le repère d-q au stator, au rotor ou au champ tournant. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique. On parle de vecteur alors qu'en vérité on a tout un champ. Le vecteur permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux.

Le flux rotorique, est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, c'est-à-dire au synchronisme. En effet, c'est le rotor qui 'glisse' par rapport au champ tournant. Mais, en régime permanent, les deux flux, statorique et rotorique tournent à la même vitesse, au synchronisme [14].

2.7.1- Référentiel lié au stator

Il se traduit par les relations suivantes : $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$, $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PM \\ PM & -\omega M & R_r + PL_r & -\omega L_r \\ -\omega L_r & PM & \omega L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

2.7.2- Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on aura : $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$, $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$

Avec :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad \Rightarrow \quad \omega_s = \omega$$

Le système d'équation devient :

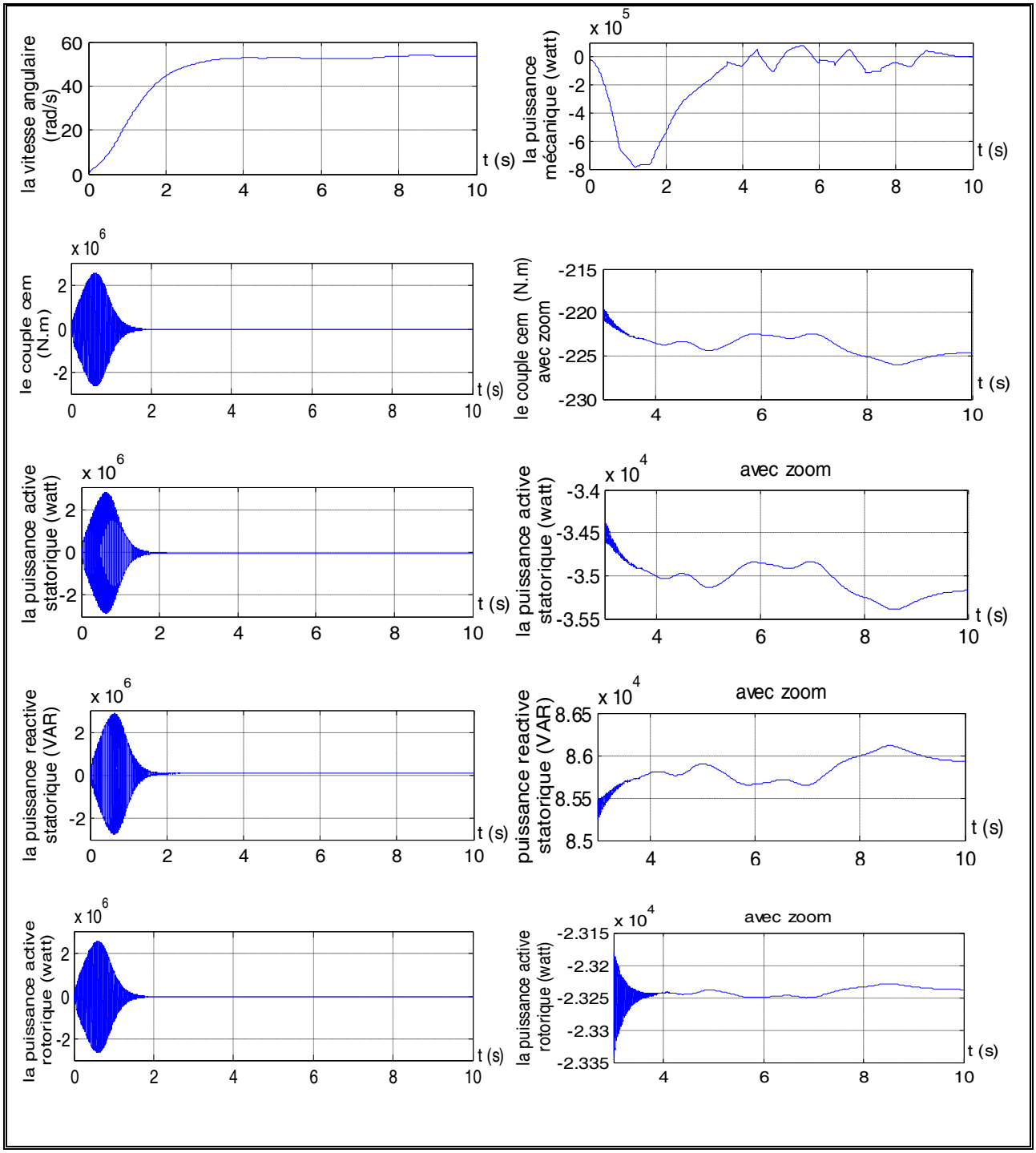
$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -\omega_s L_s & PM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_r M & R_r + PL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & PM & \omega_r L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation.

2.8- Résultats de simulation

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la MADA à été faire. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d-q)) liée au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1.5MW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 690V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 690V et une fréquence variable inférieur de la fréquence statorique.

Les résultats obtenus montrent que :



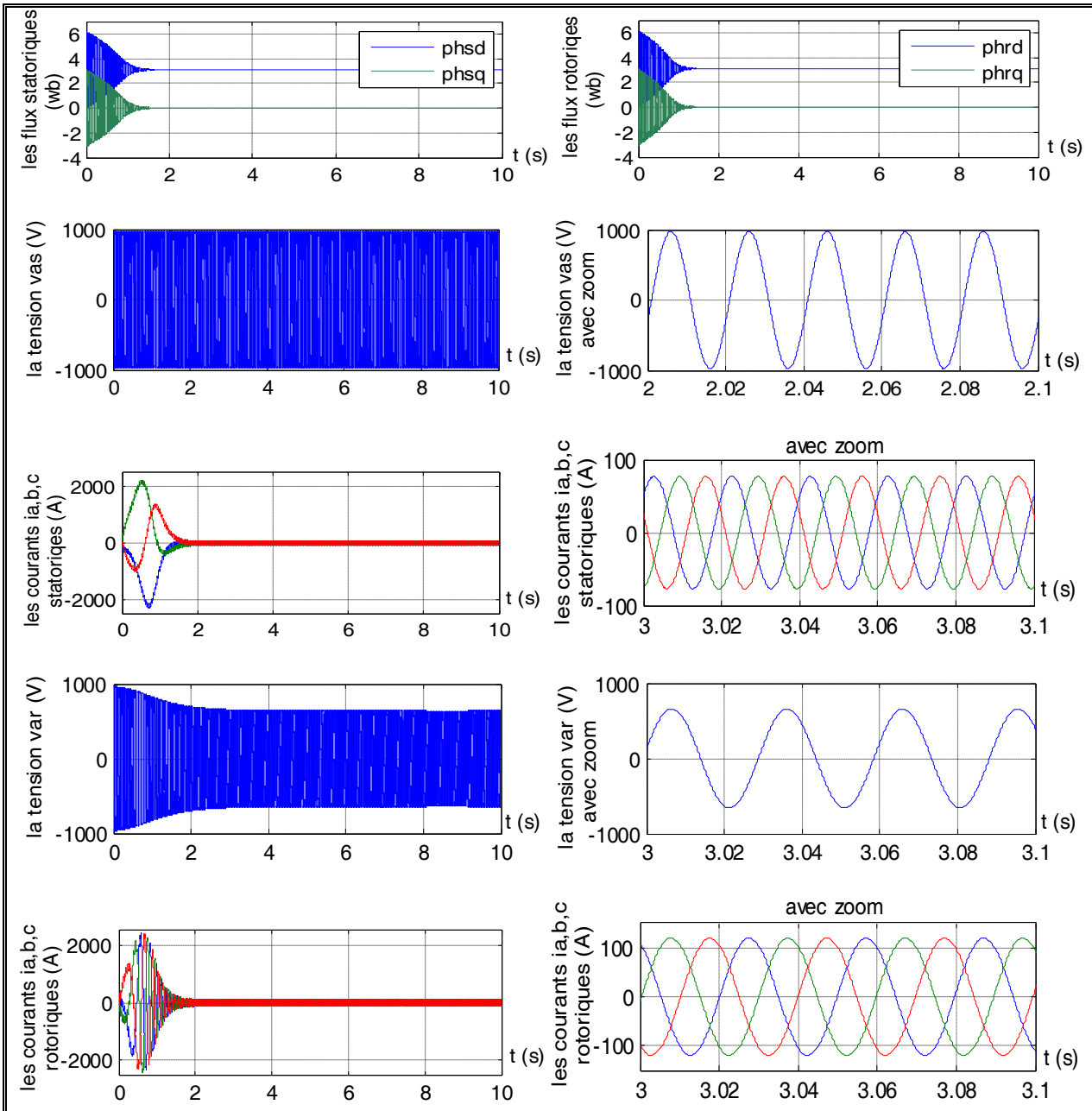


Figure (2-3) : Courbes de simulation de la MADA.

Pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est pulsatoire, ce qui explique le bruit engendré coté mécanique, oscille autour d'une valeur qui correspond à la valeur du couple résistant de la machine.

On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 1.7s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales, avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques. Les tensions statoriques ont une amplitude de $(690\sqrt{2})$. Ainsi, on remarque que l'orientation des flux étudiée auparavant en théorie et bien illustrée par la simulation, tel que le flux statorique est orienté selon l'axe d et atteint sa valeur nominale, par contre il est nul selon l'axe q et le même pour les flux rotoriques. Les tensions v_{sd} , v_{rd} et v_{sq} , v_{rq} sont ainsi présentées.

2.9- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique à été établi, dont la complexité à été réduit. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équation différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous à permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

Conclusion générale

Pour la première chapitre on à étudie l'état de l'art de la génératrice éolienne et la modélisation de la turbine éolienne car elle constitue un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Bien que beaucoup de gens croient qu'une éolienne, c'est de la mécanique.

Pourtant, les éoliennes sont aussi et surtout des machines électriques, et les défis techniques ou les coûts de réalisation d'une éolienne résident surtout désormais dans ce domaine de l'électricité et de l'électronique de puissance. D'ailleurs, il vaudrait mieux parler de "centrale éolienne", c'est à dire de l'ensemble des composants qui vous permettent de produire de l'électricité, la "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble.

La troisième chapitre de ce mémoire est consacrée à l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable. Une commande vectorielle est utilisée afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

Le dernier chapitre de ce mémoire on à l'utilisation de la machine asynchrone à cage fonctionnant à vitesse variable connectée avec le système inertiel de stockage d'énergie (SISE) constitué d'un volant d'inertie. Le contrôle de transit des puissances, entre le système de stockage et le réseau est réalisé par le réglage des grandeurs statoriques de la MAS. Nous avons alors réussi à montrer dans ce chapitre que la stratégie de commande proposé était tolérante (robuste) aux variations de fréquence.

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides. Effectivement, le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000tr/min accouplés à des machines classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes.

Enfin, des résultats expérimentaux ont permis de valider les commandes du générateur éolien et du système de stockage inertiel ainsi que la commande de l'interface réseaux en iloté.

Cependant, plusieurs points restent à explorer :

- Intégrer un superviseur permettant de participer au réglage primaire de fréquence proche de ceux développés dans de précédents travaux.
- Développer une commande du système de génération avec deux boucles de correcteur résonnant en cascade, une sur les courants et l'autre sur les tensions. Une telle commande pourrait permettre un meilleur contrôle du courant.
- Gérer des échanges d'énergie entre les systèmes de génération pendant l'ilotage notamment lorsqu'une éolienne est soumise à vent faible, que le stockage associé est à un niveau bas et que les autres systèmes peuvent fournir. Il à déjà été étudié qu'il était possible de réaliser un tel échange de l'énergie.

3.1- Introduction

Dans cette partie, nous expliquons la commande vectorielle d'un MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension, lequel dans notre étude est supposé idéal.

De nombreuses variantes de ce principe de commande seront présentées dans ce chapitre.

Ces variantes peuvent être classifiées suivant l'orientation du repère (d-q) sur :

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

Dans le cadre de ce chapitre, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose en deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Dans cette partie, nous contrôlons l'éolienne de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance communément appelé MPPT, puis expliquons la commande vectorielle d'un MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension, lequel dans notre étude est supposé idéal.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifier la validation de commande.

3.2- Recherche du rendement maximum MPPT

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux système de commande de l'éolienne agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie [15].

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais pour maximum power traking). Ces systèmes utilisent différents moyennes afin d'obtenir ce point de puissance maximum.

Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice.

La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. De produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne.

$$\Omega_{réf} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \qquad (3\text{-}1)$$

3.1.1- Résultat de simulation

Les résultats obtenus par simulation par la MPPT de la machine sont représentés par la figure (3-1) :

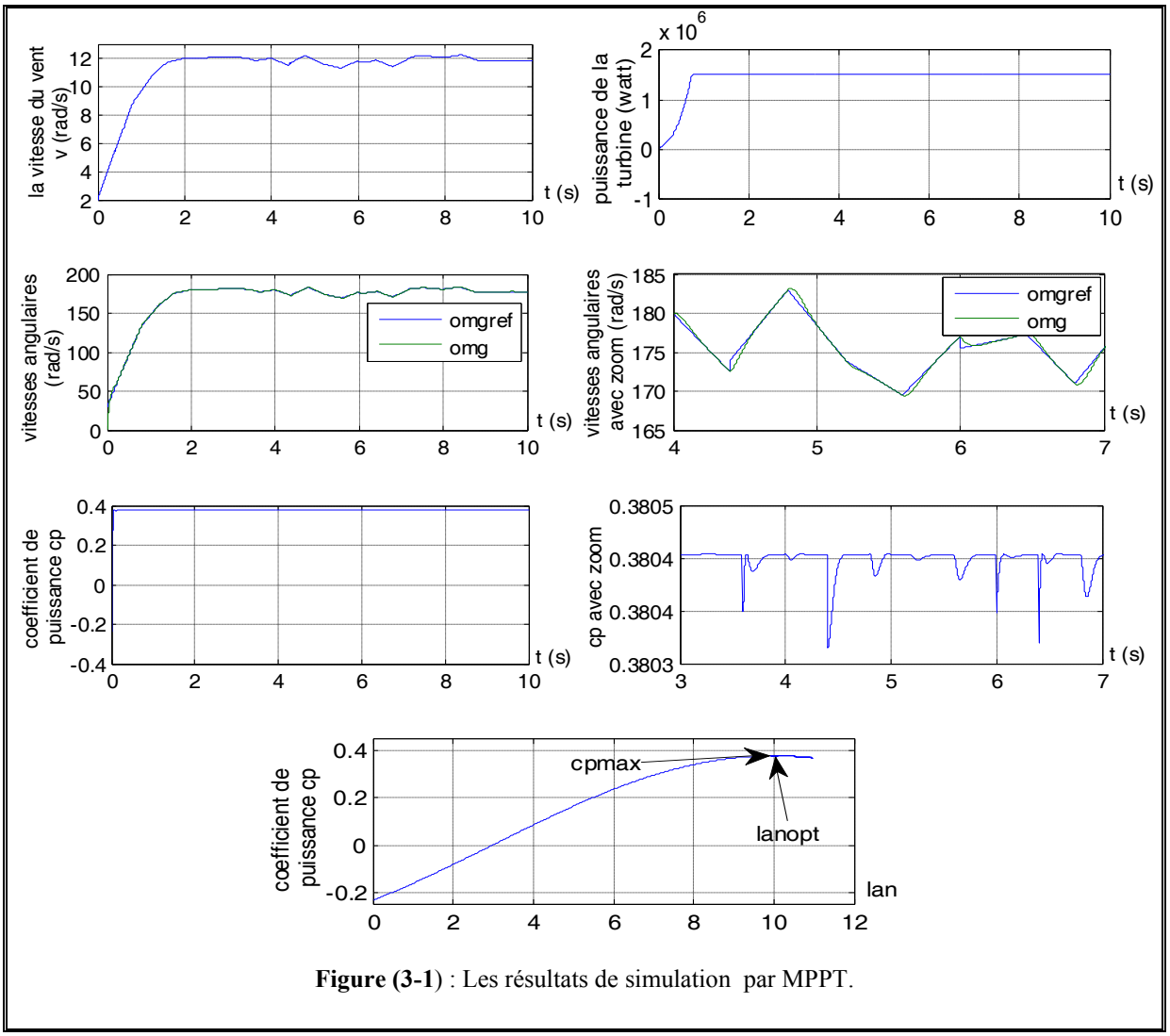


Figure (3-1) : Les résultats de simulation par MPPT.

3.3- Principe de la commande vectorielle

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone à double alimentation à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée en deux aspects [16] (figure (3-2)) :

1. Le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment l'un de l'autre ;
2. Les conditions optimales de production du couple sont assurées en régime permanent et en régime transitoire.

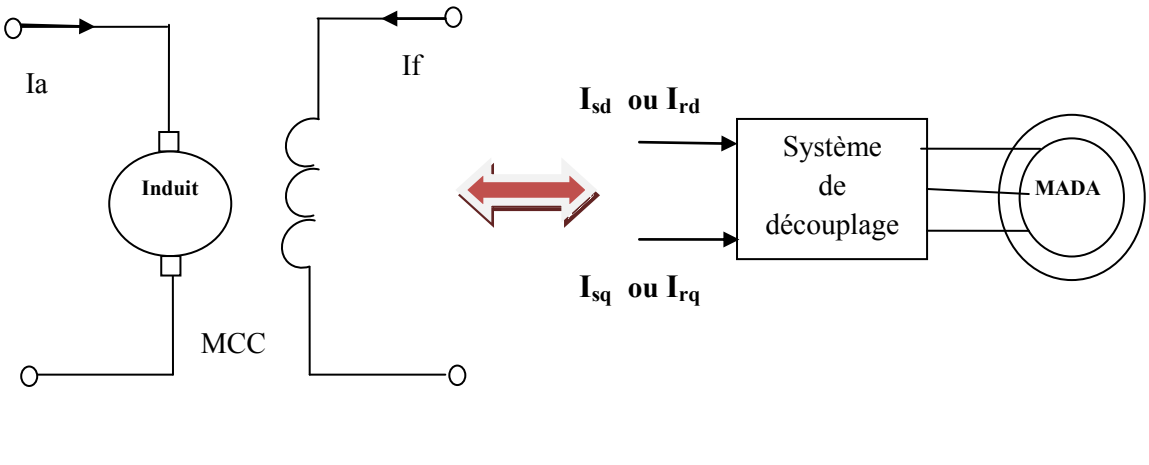


Figure (3-2) : Principe de la commande vectorielle.

Le couple électromagnétique de la MCC :

$$C_{em} = K\phi_a I_a \tag{3-2}$$

$$\phi_a = KI_f$$

I_f **:** Courant d'excitation (A).

3.4- Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

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

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine, On oriente le repère (d-q) afin que l'axe d soit aligne sur le flux statorique ϕ_s.

Ainsi :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \tag{3-3}$$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = P\frac{M}{L_s} I_{rq}\phi_{sd} \tag{3-4}$$

Et l'équation des flux (3-4) devient :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + MI_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + MI_{rq} \end{cases} \tag{3-5}$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s, cela conduit à un flux statorique ϕ_s constant, Cette considération associée à l'équation (3-3) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature I_{rq}.

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

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3\text{-}6)$$

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

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s \end{cases} \quad (3\text{-}7)$$

A l'aide de l'équation (3-5), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3\text{-}8)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (3\text{-}9)$$

Ou bien encore, d'après l'équation (3-7) par :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (3\text{-}10)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (3-8) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3\text{-}11)$$

A partir des équations (3-6) et (3-7), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3\text{-}12)$$

L'expression des puissances (3-11) peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{{V_s}^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3\text{-}13)$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante *M* constante, on remarque que l'équation (3-13) fait apparaitre que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{rd} à un constant $\left(\frac{{V_s}^2}{\omega_s L_s}\right)$ près imposée par le réseau [6].

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués a la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux (2-2) on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \end{cases} \quad (3\text{-}14)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (3-13) par leur expression dans l'équation (2-19) on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rq}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} + g\frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3\text{-}15)$$

A partir des équations que noud 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 commande vectorielle de la MADA.

3.5- Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. .

Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développée soit :

- La commande vectorielle directe ;
- La commande vectorielle indirecte.

3.5.1- Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

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

Cette commande n'est donc pas optimale.

Cette méthode basée sur la régulation indépendante des puissances active et réactive de la machine, Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{rq} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{rd}.

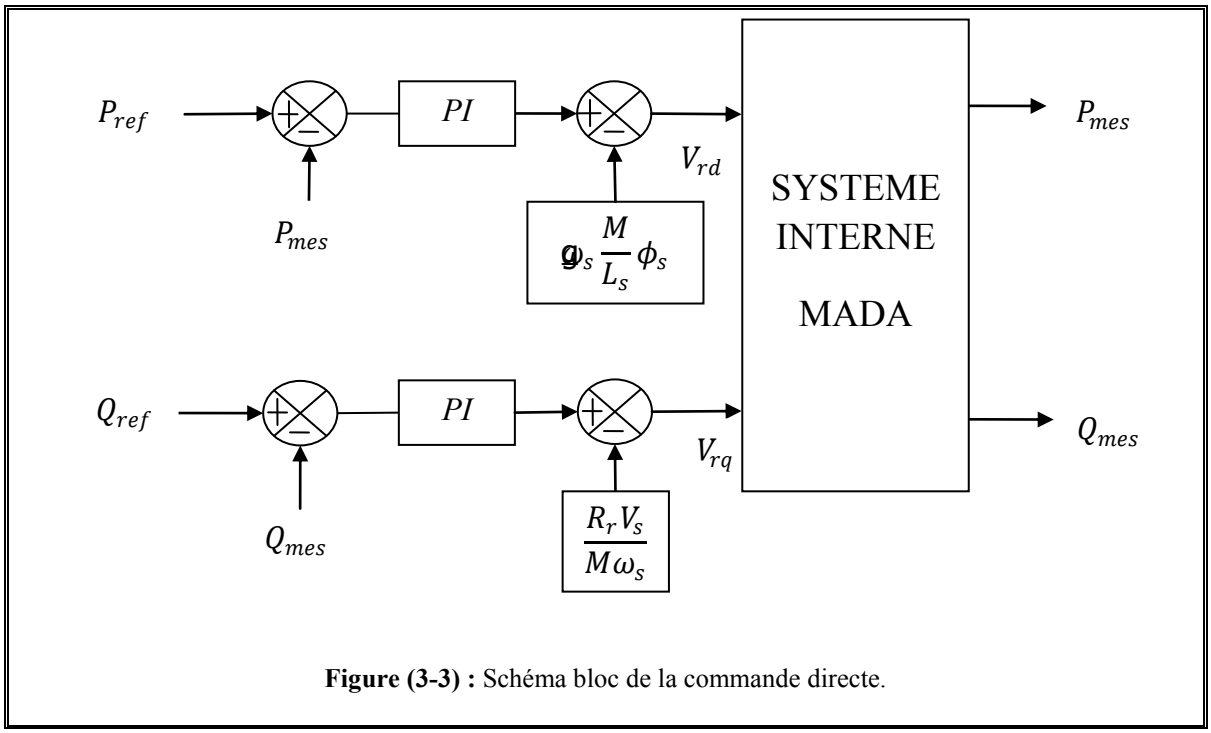


Figure (3-3) : Schéma bloc de la commande directe.

3.5.2- Commande vectorielle indirecte

A cause des inconvénients vus dans la précédente commande, la commande vectorielle indirecte est considérée comme plus pratique.

Dans cette commande, les courants rotorique sont estimés à partir de la mesure des puissances active et réactive. .

Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température.

La commande indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances, On aboutit alors à un modèle qui correspond a celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments. On part donc la puissance statorique en fonction des courants statorique et des puissances rotoriques en fonctions des courants rotoriques.

3.5.2.1- Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, On établit le système de régulation de la figure (3-4) ou l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

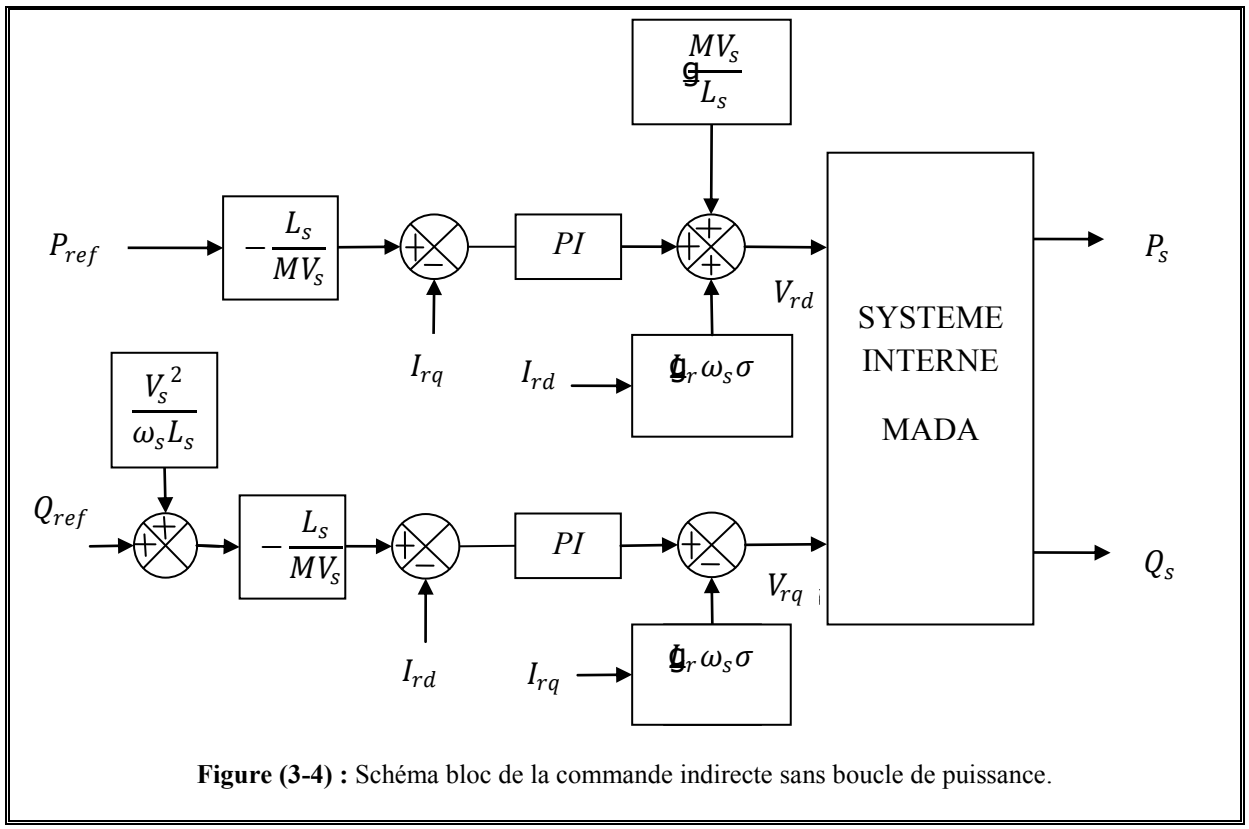


Figure (3-4) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

3.5.2.2- Commande vectorielle indirecte avec boucle 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 (3-5) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, On observe une dynamique qui réagit rapidement 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 perceptibles, il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle machine.

Cette méthode est plus performante que la commande directe qui plus de perturbation entre les deux puissances.

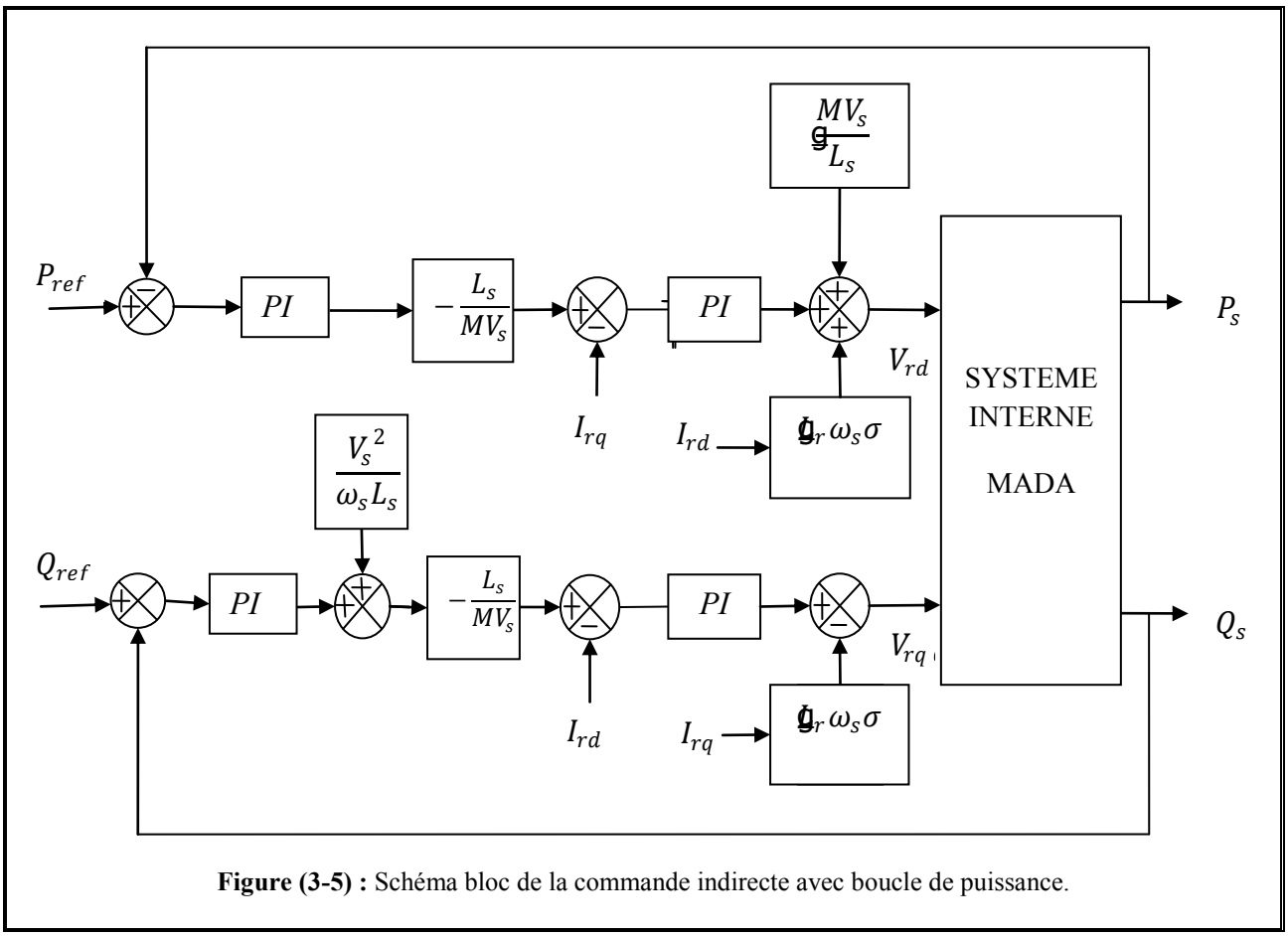


Figure (3-5) : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

3.6- Association onduleur MLI à la machine

Le réglage de la vitesse des machines asynchrones est réalisé avec succès par des convertisseurs statiques de fréquence opérant une double conversion en passant par l'intermédiaire du courant continu. L'onduleur en tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternative.

Cette application est très répondue dans le monde de la conversion d'énergie et aujourd'hui, la réalisation d'onduleur à base de composants en Carbure de Silicium (SiC) est un nouvel axe de recherche de laboratoire.

Il s'agit d'une conversion directe à partir d'une source de tension réversible en courant (ou instantanément condensateur électrochimique). La charge est une source de courant réversible en courant et en tension qui peut être une machine asynchrone. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie. L'onduleur est aussi utilisé en fréquence variable pour faire de la variation de la vitesse pour les machines électriques (MLI, Modulation de Largeurs d'Impulsion ou PMW, Pulse Width Modulation).

Selon l'utilisation, les interrupteurs sont commandables soit à l'ouverture ou à la fermeture (fréquence fixe) ou à l'ouverture et à la fermeture (MLI).

3.7- Modélisation de l'onduleur

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu alternatif permettent de fabriquer une source de tension alternative a partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension transforme un signal constant en un signal alternatif dont nous pouvons contrôler l'amplitude et la fréquence.

Le réglage de la vitesse (ou de la position) du rotor d'une machine asynchrone se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de tension.

Le schéma de l'onduleur est représente par la figure (3-6).

L'onduleur de tension est constitue de trois bras de commutation a transistors ou a thyristors.

Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

En mode commandables, le bras est un commutateur a deux positions qui permet d'obtenir a la sortie deux niveaux de tension.

Un bras de l'onduleur est représente par la figure (3-7)

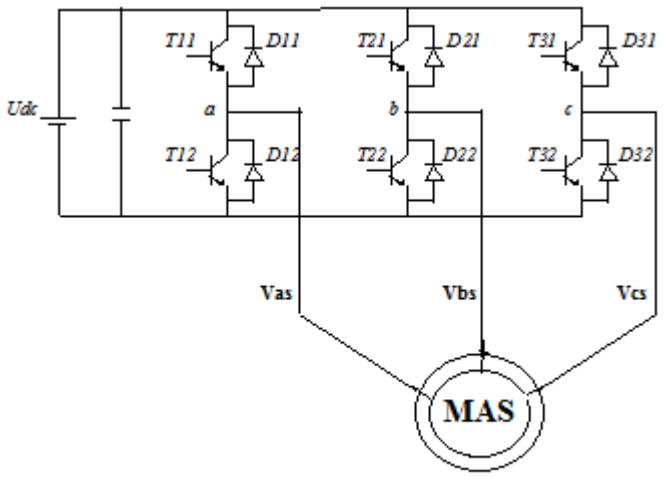


Figure (3-6) : Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux.

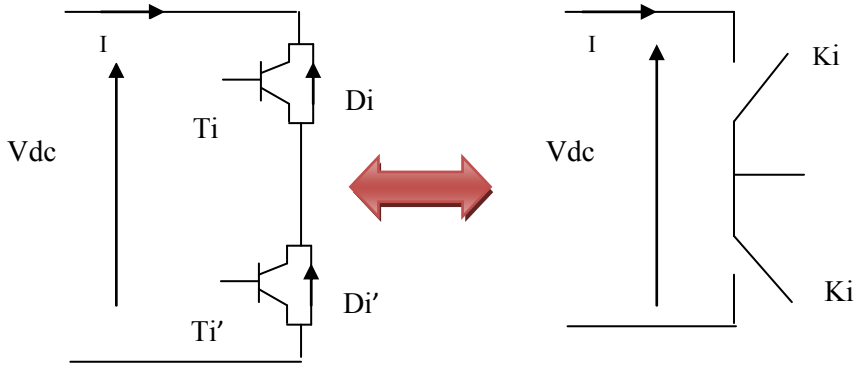


Figure (3-7) : Schéma d'un bras de l'onduleur.

L'onduleur est modélisé en associant a chaque bras une fonction logique F_i(i=1, 2, 3).

$$F_i = \begin{cases} +1 & si\ T_i\ est\ fermé, \quad T_i^{'}\ est\ ouvert \\ 0 & si\ T_i\ est\ ouvert, \quad T_i^{'}\ est\ fermé \end{cases}$$

Ainsi les tensions de ligne sont données par :

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{dc}(F_1 - F_2) \quad (3\text{-}16)$$
$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{dc}(F_2 - F_3) \quad (3\text{-}17)$$
$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc}(F_3 - F_1) \quad (3\text{-}18)$$

Dans l'hypothèse que les tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} forment un système de tension triphasé équilibré alors, de l'équation (3-16) et (3-17) on trouve :

$$V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_2 - F_1 - F_3) \quad (3\text{-}19)$$

De l'équation (3-17) et (3-18) on trouve:

$$V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_3 - F_1 - F_2) \quad (3\text{-}20)$$

Et de l'équation (3-17) et (3-19) on trouve:

$$V_{as} = \frac{V_{dc}}{3}(2F_1 - F_2 - F_3) \quad (3\text{-}21)$$

3.8- Stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoïdale

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale et une tension de modulation triangulaire.

Les six signaux de références sont donnés par les équations suivantes :

$$V_{ref\,1c} = V_m \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi(c-1)}{3}\right) \; ; \; c = 1,2,3 \quad (3\text{-}22)$$

L'équation de la porteuse est donnée par:

$$V_p(t) + \begin{cases} V_{pm}\left(4\frac{t}{T_p} - 1\right) & si \quad 0 \le t \le \frac{T_p}{2} \\ V_{pm}\left(-4\frac{t}{T_p} + 3\right) & si \quad \frac{T_p}{2} \le t \le T_p \end{cases} \quad (3\text{-}23)$$

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation "m" égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence $m = \frac{f_p}{f}$;
- Le coefficient de réglage en tension "r" égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence a la valeur crête de l'onde de modulation $r = \frac{V_m}{V_{pm}}$.

La technique MLI est basée sur la comparaison des signaux de référence avec la porteuse, pour déterminer les instants des impulsions des bases des transistors selon l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} Si & V_{ref\,11} \ge V_p(t) f_{11} = 1 \quad sinon \quad f_{11} = 0 \\ Si & V_{ref\,12} \ge V_p(t) f_{12} = 1 \quad sinon \quad f_{12} = 0 \\ Si & V_{ref\,13} \ge V_p(t) f_{13} = 1 \quad sinon \quad f_{13} = 0 \end{cases} \quad (3\text{-}24)$$

La commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion).

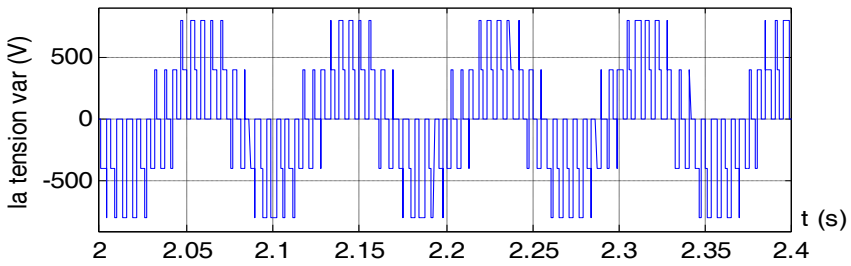


Figure (3-8): Représentation un signal de tension rotorique.

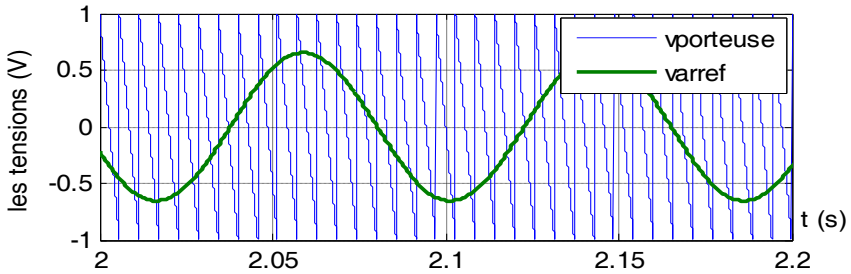


Figure (3-9): Représentation un signal de l'entré de la commande MLI.

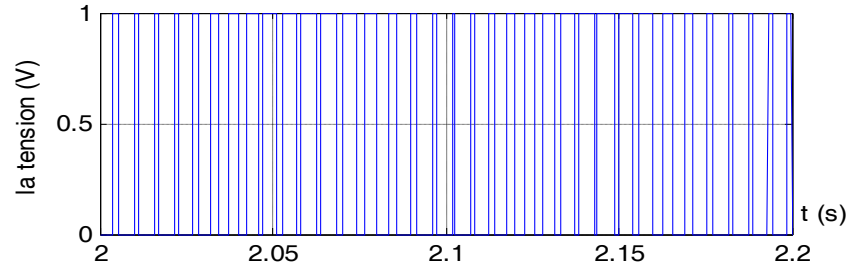
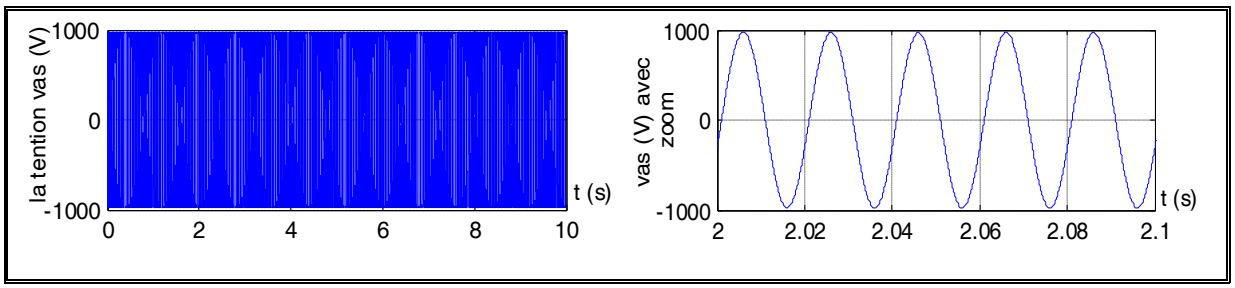


Figure (3-10): Représentation un signal de sortie de la commande MLI.
r = 0.8 et m = 35.

3.9- Résultats de simulation de la MADA avec onduleur

Les résultats obtenus (avec onduleur) par simulation avec les paramètres de la machine sont représentés par la figure (3-11).



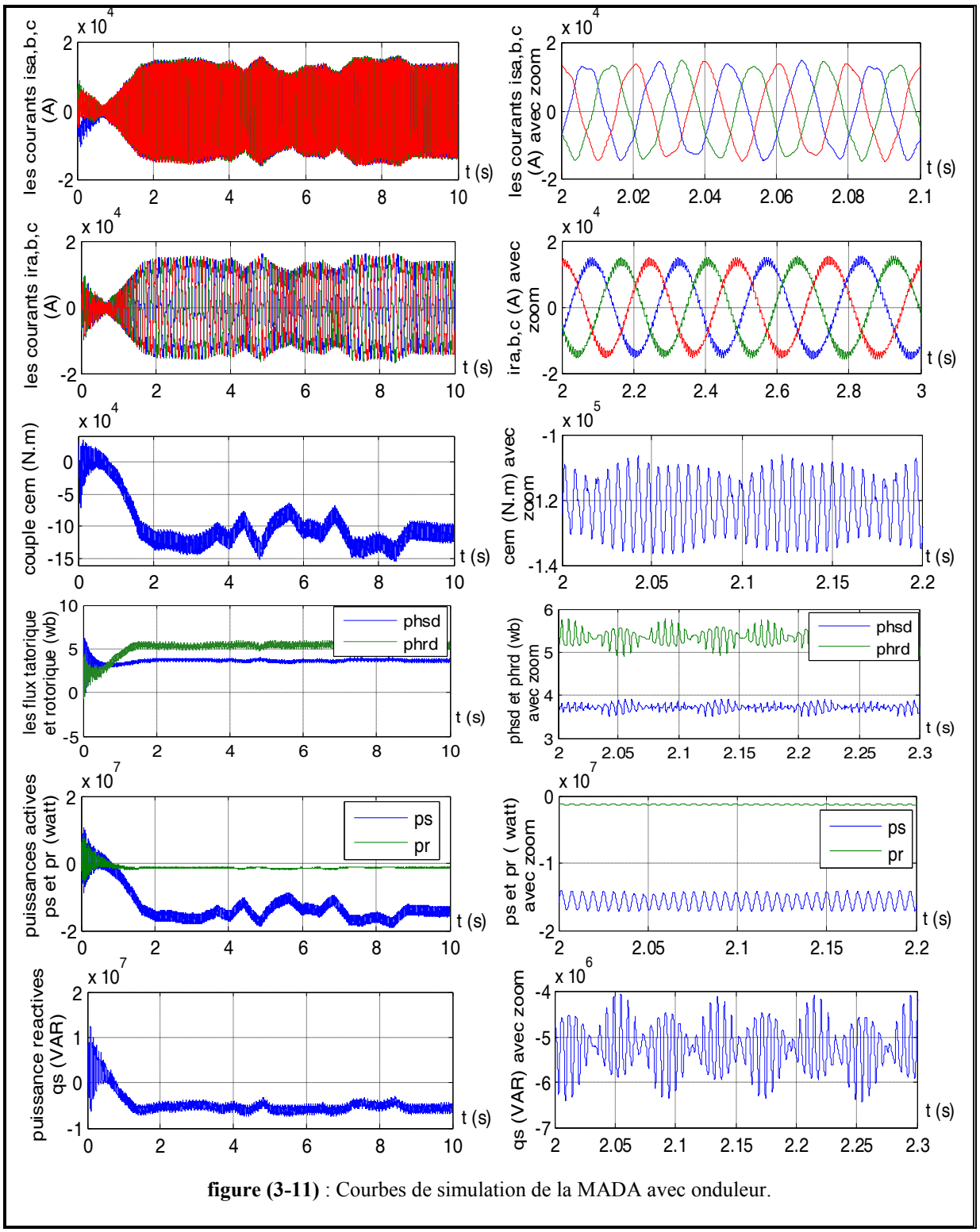


figure (3-11) : Courbes de simulation de la MADA avec onduleur.

Après un certain temps de démarrage, ils se stabilisent les courants statoriques et rotoriques et prennent leurs formes sinusoïdales, avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques. Les tensions statoriques ont une amplitude de $(690\sqrt{2})$. Le signe des puissances actives statoriques et rotoriques est négative, le même pour la puissance réactive.

3.10- Résultat de simulation de la MADA par la commande vectorielle

Ce paragraphe va permettre d'analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation présenté au chapitre (02). Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique appliquée à une machine asynchrone à double alimentation, entrainée à une vitesse fixe et pilotée par un onduleur à deux niveaux inséré au rotor de la machine. Le calcul des régulateurs utilisés est donné en Annexe (A.5.1).

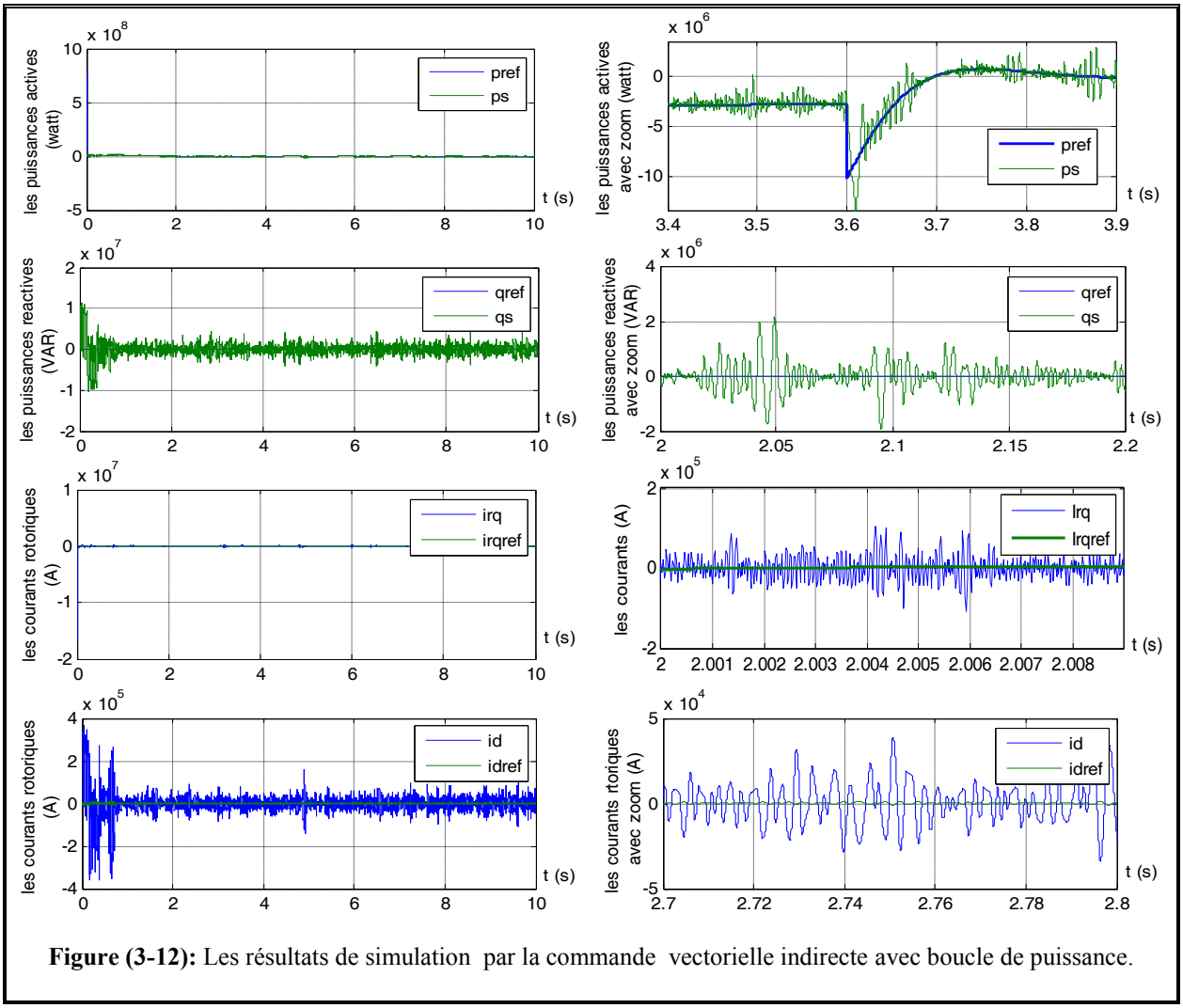


Figure (3-12): Les résultats de simulation par la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Les gains des correcteurs sont calculés de la même manière qu'à la section (3.6).

Après la simulation, on remarque la puissance active statorique réelle suit toujours sa référence. L'échelon de consigne pour la puissance réactive statorique est maintenu nul, la puissance réactive réelle produite par la MADA oscille autour de cette consigne.

3.11- Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La Figure (3-13) illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

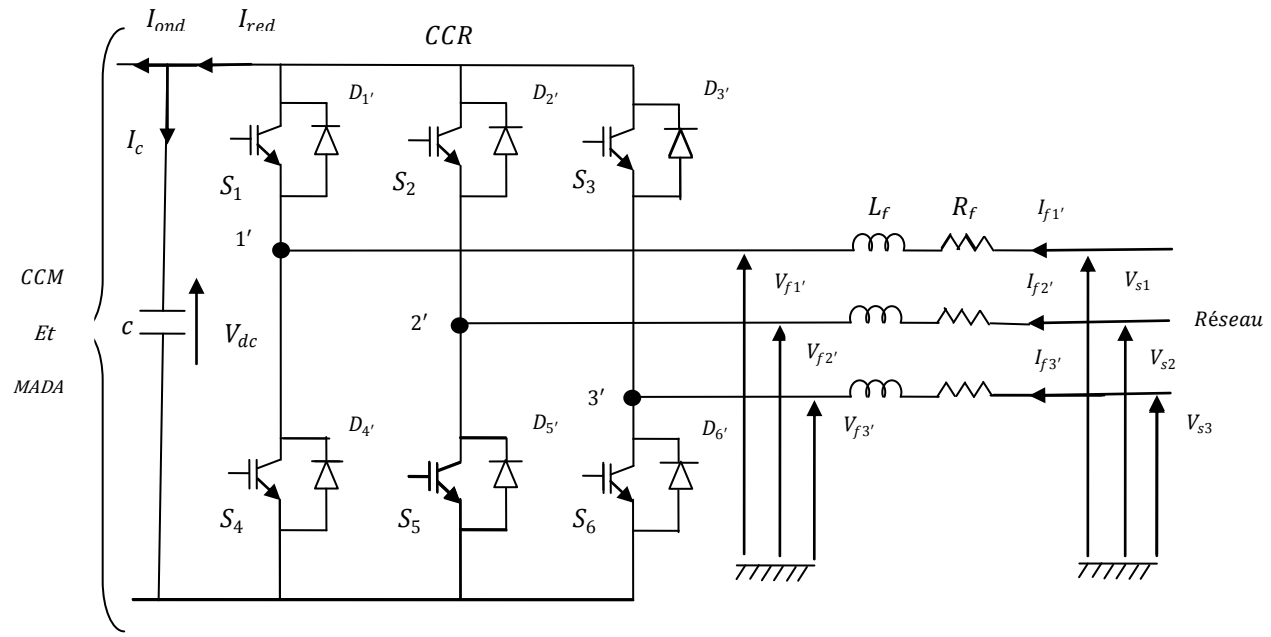


Figure (3-13) : Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

- I_{ond} , I_{red} : respectivement les courants modulés par le CCM et le CCR,
- I_c : le courant traversant le condensateur,
- V_{dc} : la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),
- $S_{i'}$, $D_{i'}$: respectivement les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle ($i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$),
- R_f , L_f : respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,
- $V_{fk'}$: les tensions simples modulées par le CCR ($k \in \{1, 2, 3\}$),
- V_{fk} : les tensions simples du réseau électrique,
- $I_{f1'}$, $I_{f2'}$: les courants circulant à travers le filtre RL.

3.11.1- Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_{ond} \tag{3-25}$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (Figure (3-13)) :

$$I_c = I_{red} - I_{ond} \tag{3-26}$$

3.11.2- Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park

D'après la Figure (3-13), nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{f1'} = -R_f I_{f1'} - L_f \frac{dI_{f1}}{dt} + V_{s1} \\ V_{f2'} = -R_f I_{f2'} - L_f \frac{dI_{f2}}{dt} + V_{s2} \\ V_{f3'} = -R_f I_{f3'} - L_f \frac{dI_{f3}}{dt} + V_{s3} \end{cases} \quad (3\text{-}27)$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{fd} = -R_f I_{fd} - L_f \frac{dI_{fd}}{dt} + \omega_s L_f I_{fq} + V_{sd} \\ V_{fq} = -R_f I_{fq} - L_f \frac{dI_{fq}}{dt} - \omega_s L_f I_{fd} + V_{sq} \end{cases} \quad (3\text{-}28)$$

Les puissances active et réactive générées par le CCR sont définies par :

$$\begin{cases} P_f = V_{fd} I_{fd} + V_{fq} I_{fq} \\ Q_f = V_{fq} I_{fd} - V_{fd} I_{fq} \end{cases} \quad (3\text{-}29)$$

Dans cette première partie, nous avons développé les modèles de la turbine, de la MADA et de la connexion du CCR avec le réseau électrique. Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser au dispositif de commande du système éolien.

3.12- Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure (3-14). Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.

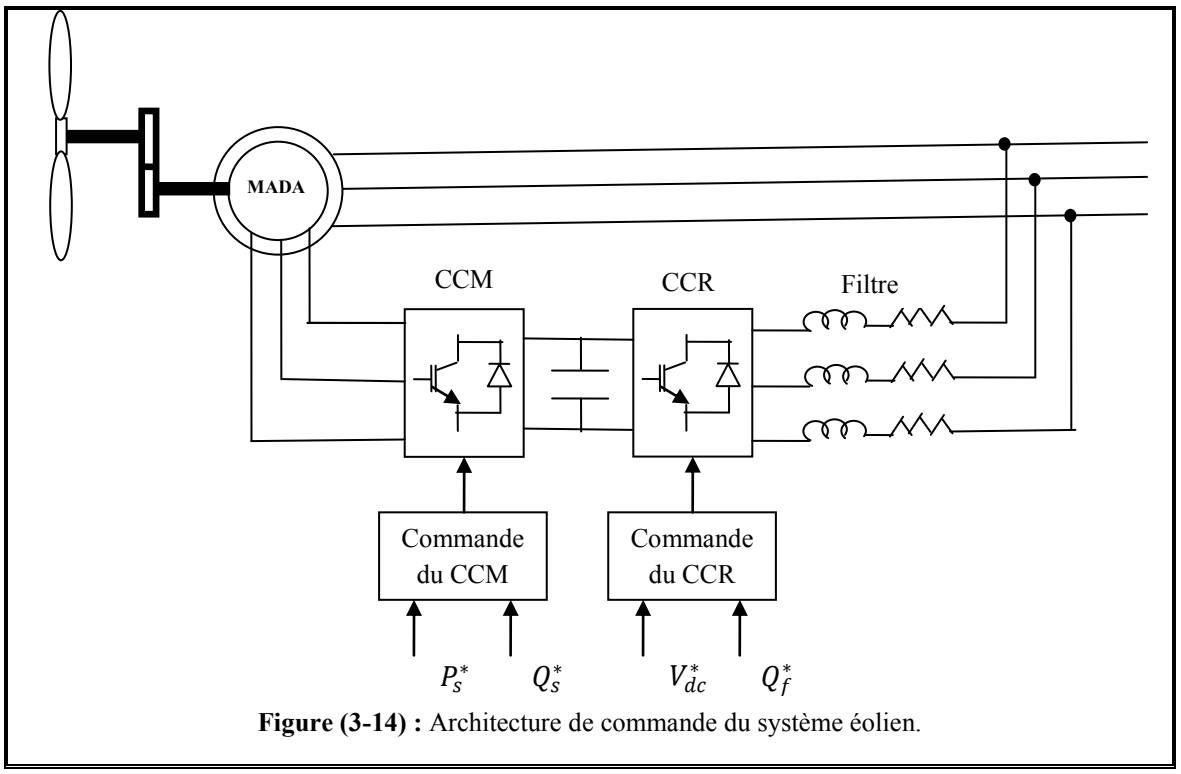


Figure (3-14) : Architecture de commande du système éolien.

D'après la Figure (3-14), trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit "MPPT" (Maximum Power Point Tracking),
- la commande du CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

3.13- Commande du convertisseur côté réseau

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre RL. Ce convertisseur a deux rôles : maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique. La Figure (3-15) décrit la commande du CCR. Cette commande réalise donc les deux fonctions suivantes :

- le contrôle des courants circulant dans le filtre RL,
- le contrôle de la tension du bus continu.

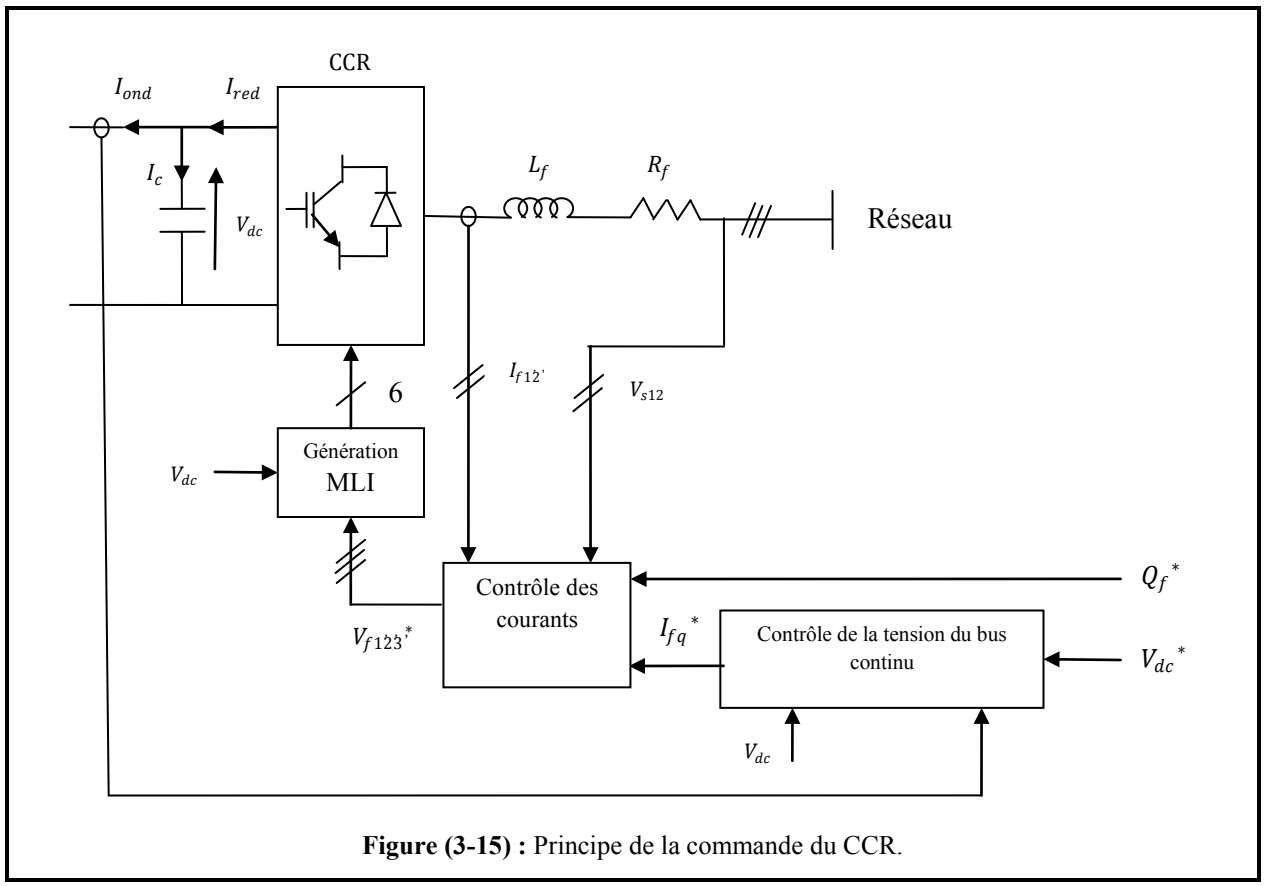


Figure (3-15) : Principe de la commande du CCR.

3.13.1- Contrôle des courants transitant dans le filtre RL

Dans le repère *dq* lié au champ tournant statorique, l'équation (3-29) deviennent :

$$\begin{cases} V_{fd} = -R_f I_{fd} - L_f \frac{dI_{fd}}{dt} + \omega_s L_f I_{fq} + V_{sd} \\ V_{fq} = -R_f I_{fq} - L_f \frac{dI_{fq}}{dt} - \omega_s L_f I_{fd} + V_{sq} \end{cases} \quad (3\text{-}30)$$

Où :

$$\begin{cases} e_{fd} = \omega_s L_f I_{fq} \\ e_{fq} = -\omega_s L_f I_{fd} + V_{sq} \end{cases} \quad (3\text{-}31)$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère *d-q* suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes *d-q*.

Le schéma bloc des boucles de régulation des courants d'axes *d-q* est décrit à la Figure (3-16). Les correcteurs utilisés sont de type PI. Dans ces schémas blocs de régulation apparaissent les termes de compensation et de découplage des axes *d-q* ainsi que les modèles du CCR et de la liaison de celui-ci au réseau via le filtre RL suivant le repère *d-q*.

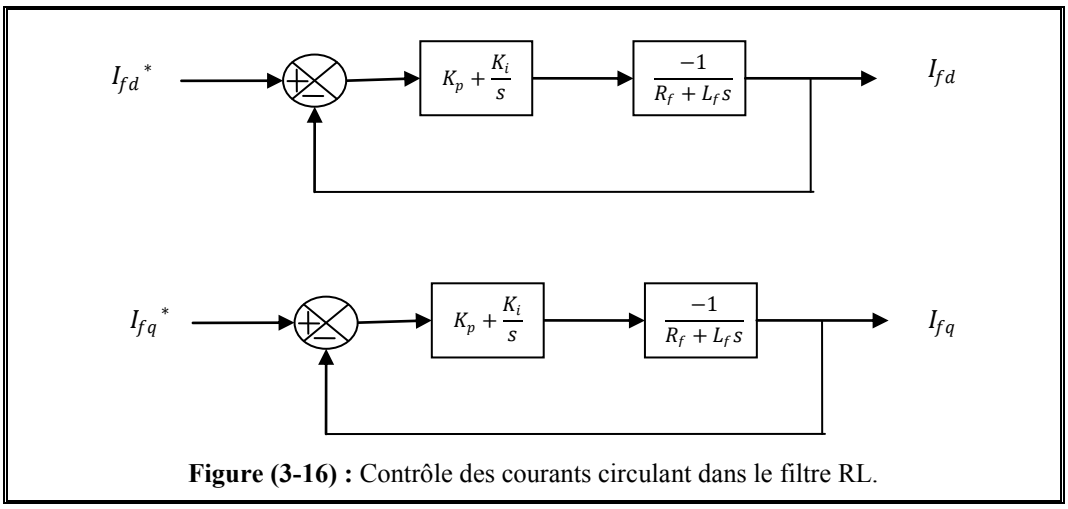


Figure (3-16) : Contrôle des courants circulant dans le filtre RL.

Les courants de référence $I_{fq}{}^*$ et $I_{fd}{}^*$ sont respectivement issus du bloc de contrôle de la tension du bus continu et du contrôle de la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique (Figure (1-15)).

En négligeant les pertes dans la résistance R_f du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère *d-q* lié au champ tournant statorique ($V_{sd} = 0$), l'équation (3-29) deviennent :

$$\begin{cases} P_f = V_{sq} I_{fq} \\ Q_f = V_{sq} I_{fd} \end{cases} \tag{3-32}$$

A partir de ces relations, il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici $P_f{}^*$ et $Q_f{}^*$, en imposant les courants de référence suivants :

$$\begin{cases} I_{fq}{}^* = \frac{P_f{}^*}{V_{sq}} \\ I_{fd}{}^* = \frac{Q_f{}^*}{V_{sq}} \end{cases} \tag{3-33}$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée ($Q_f{}^* = 0$ VAr).

3.13.2- Contrôle de la tension du bus continu

A partir de l'équation (3-27), nous pouvons exprimer les puissances mises en jeu sur le bus continu :

$$\begin{cases} P_{red} = V_{dc} I_{red} \\ P_c = V_{dc} I_c \\ P_{ond} = V_{dc} I_{ond} \end{cases} \tag{3-34}$$

Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_{red} = P_c + P_{ond} \tag{3-35}$$

Si l'on néglige l'ensemble des pertes Joule devant la puissance échangée entre le rotor de la MADA et le réseau électrique (pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre RL), on peut alors écrire :

$$P_f = P_{red} = P_c + P_{ond} \tag{3-35}$$

En réglant la puissance P_f, il est alors possible de contrôler la puissance P_c dans le condensateur et donc de réguler la tension du bus continu. Pour ce faire, les puissances P_{ond} et P_c doivent être connues afin de déterminer $P_f{}^*$.

La référence de puissance pour le condensateur est liée au courant de référence circulant dans le condensateur :

$$P_c{}^* = V_{dc}\ I_c{}^* \tag{3-36}$$

La régulation de la tension du bus continu s'effectue alors par une boucle externe (par rapport à la boucle interne de régulation des courants), permettant de maintenir une tension constante sur le bus continu, avec un correcteur PI générant le courant de référence $I_c{}^*$ dans le condensateur.

La Figure (3-17) présente le schéma bloc du contrôle de la tension du bus continu. On considère, pour simplifier la chaîne de régulation, que le courant de référence $I_{fq}{}^*$ est toujours égal au courant I_{fq} car le temps de réponse de la boucle interne est plus faible que celui de la boucle externe.

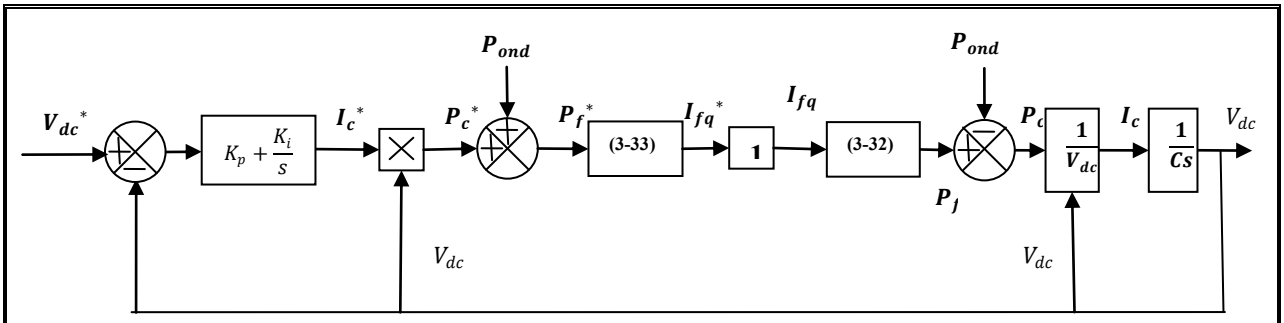


Figure (3-17) : Boucle de régulation de la tension du bus continu.

A la Figure (3-17) apparait la puissance disponible P_{ond} correspondant à la puissance rotorique : c'est une perturbation vu de la régulation et elle sera compensée dans la chaîne de régulation. La Figure (3-18) représente le schéma bloc de la commande du CCR. Ce schéma bloc inclut les termes de découplage et de compensation afin de pouvoir contrôler indépendamment les courants d'axes *d-q* circulant dans le filtre RL et les puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau.

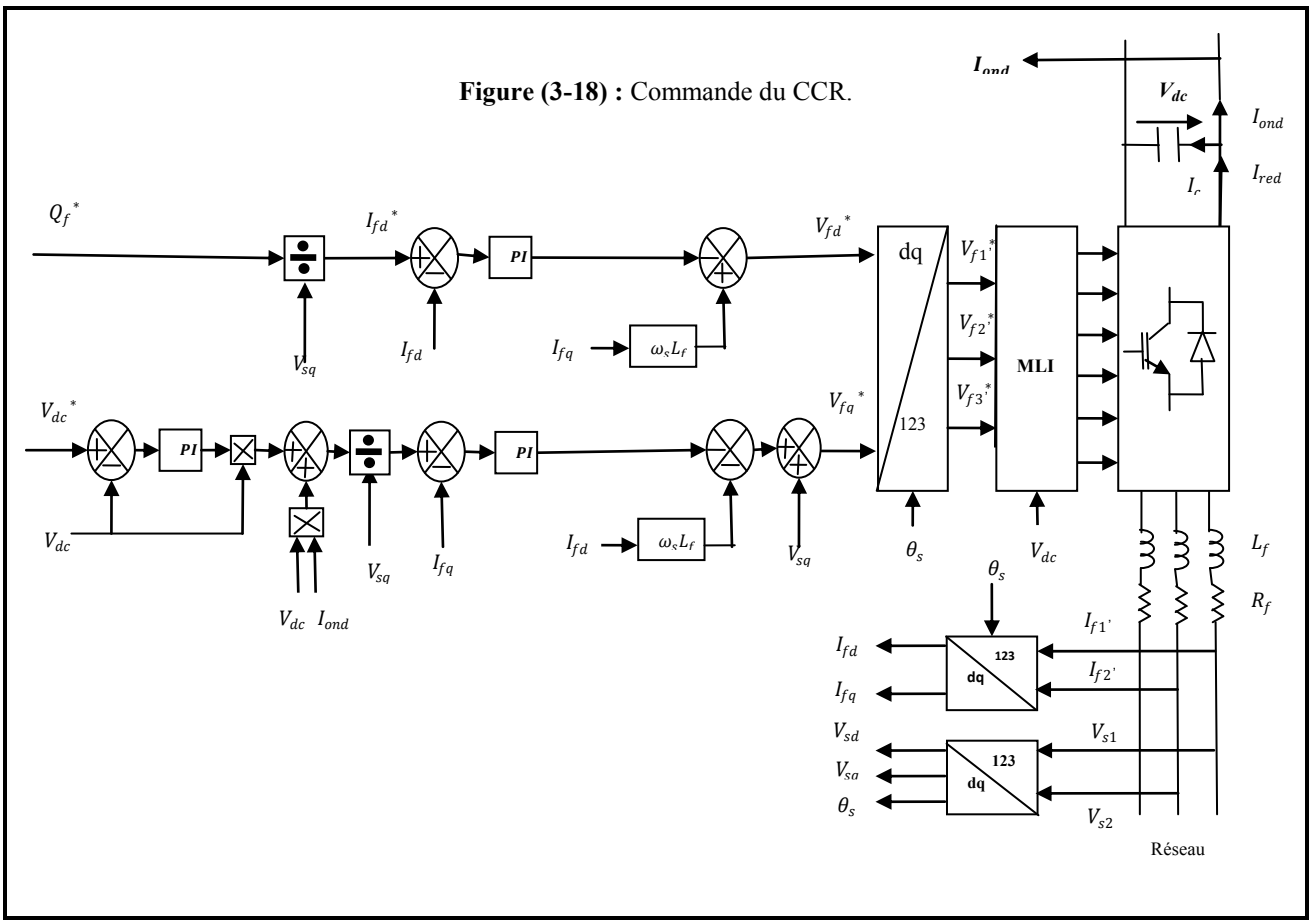
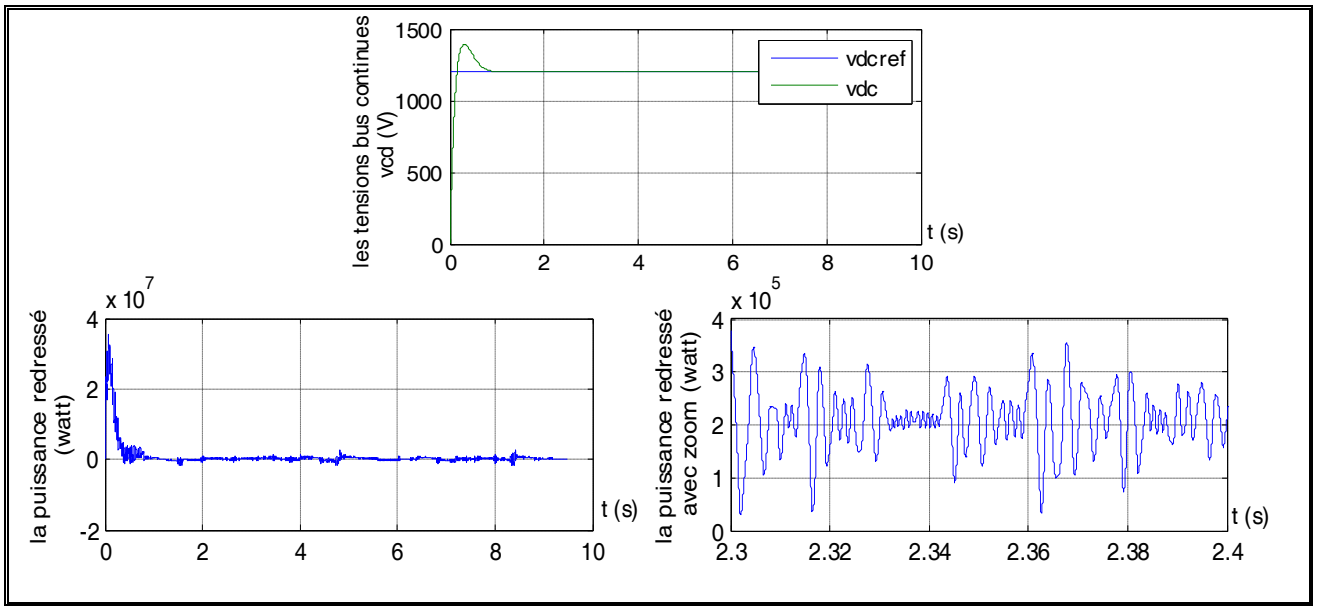


Figure (3-18) : Commande du CCR.

3.14- Résultats de simulations

La tension de référence du bus continu, notée $V_{dc}{}^*$, est fixée à 1200 V. La puissance réactive de référence $Q_f{}^*$ est fixée à 0 VAR, ce qui garantit un facteur de puissance unitaire à la connexion du CCR avec le réseau électrique. Par contre, nous ferons varier la puissance réactive statorique Q_s en jouant sur sa valeur de référence dans la commande du CCM.



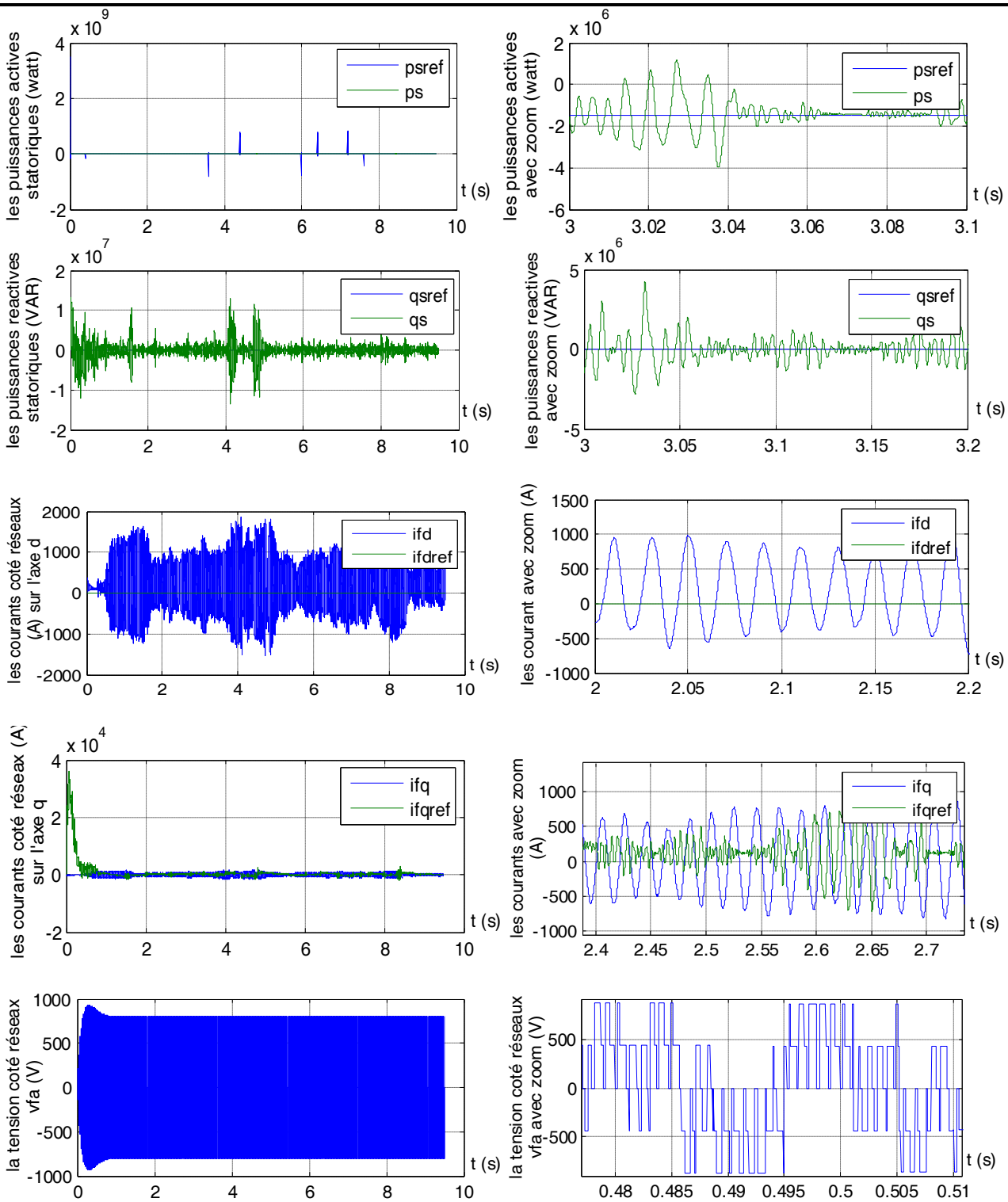


Figure (3-19) : Courbes de simulation de la MADA.

Les résultats de simulation montre que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continus parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté. Les courants du réseau suivent parfaitement leurs références. La tension à la sortie du convertisseur coté réseau est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la

tension du bus continu qui est 1200V. On constate que la tension d'entrée de l'onduleur à deux niveaux V_{dc} atteint sa référence.

Conclusion

Ce chapitre nous à permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisé en génératrice.

Pour réalisé cette commande, deux boucle de régulation ont été présenté (une boucle régule les puissances actives et réactives et une autre boucle pour la régulation des courants par des régulateurs de type PI). Un choix sur l'orientation du flux à été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d, par conséquent la puissance active sera dépendant uniquement du courant I_{rq}. Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisant, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la machine asynchrone à double alimentation. Et l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs MLI à deux niveaux (redresseur à deux niveaux et onduleur à deux niveaux) associés à une génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation et l'application du redresseur à MLI nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. D'après les résultats de simulation on à constaté que cette méthode de commande nous permet de fixer la tension du bus continu d'une part, et d'autre part elle nous permettre de bien contrôler le facteur de puissance coté réseau.

4.1- Introduction

Fin d'accroître le taux de pénétration des générateurs éoliens dans les réseaux électriques, il est nécessaire d'évaluer leur capacité à participer aux services système, c'est à dire au réglage et à la stabilité du réseau auquel ils sont connectés [17]-[18]. L'action de ces sources d'énergie décentralisées sur des grandeurs caractéristiques telles que fréquence et niveau de tension, ne peut être envisagée que par l'adjonction de dispositifs de stockage d'énergie aux générateurs éoliens. Les systèmes de stockage bâtis autour de volants d'inertie sont bien adaptés aux applications éoliennes en raison de leurs caractéristiques : grande dynamique, longue durée de vie et bon rendement [19].

Dans le cas d'éoliennes à vitesse fixe, le dispositif de stockage inertiel doit être connecté directement au réseau alternatif. Il permet alors d'atténuer de façon significative les variations de la puissance restituée au réseau électrique, consécutives aux variations de la vitesse du vent. Dans le cas d'une éolienne associée à un générateur diesel (dans un réseau insulaire, par exemple), le dispositif de stockage permet une réduction de la consommation de gazole, ainsi qu'un accroissement de la durée de vie du groupe diesel [20]-[21].

Dans le cas d'éoliennes à vitesse variable, la connexion du système de stockage à la génératrice éolienne peut être réalisée au niveau d'un bus de tension continue, par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [22]. Ainsi connecté, le dispositif de stockage inertiel est chargé du contrôle de la tension du bus continu (absorbant ou restituant le différentiel de puissance entre la production éolienne d'une part, et la consommation au niveau du réseau d'autre part). Le convertisseur de puissance connecté au réseau est, quant à lui, chargé d'assurer le réglage de l'amplitude et de la fréquence des tensions au point de connexion au réseau.

Afin d'évaluer la capacité des générateurs éoliens à assurer un service système, nous considérons un dispositif de génération capable d'alimenter des charges isolées ou d'être intégré à un réseau alimenté par des alternateurs classiques. Le passage de la seconde à la première de ces deux situations correspondant à un îlotage. Ces contraintes supposent un générateur capable de fonctionner sans source auxiliaire, de participer à l'équilibre consommation-production et capable de régler l'amplitude, ainsi que la fréquence des tensions qu'il fournit.

4.2- Description du système étudié

Le système étudié dans notre application est connecté au réseau, considéré puissant, et comporte deux parties :

- Un aérogénérateur à vitesse variable utilisant une MADA et pilotée par le rotor au moyen d'un convertisseur matriciel, un multiplicateur de vitesse et une turbine à trois pales.
- Un SISE comportant un volant d'inertie, une machine asynchrone à cage et un convertisseur AC\DC\AC (redresseur MLI à deux niveaux, filtre et onduleur MLI à deux niveaux).

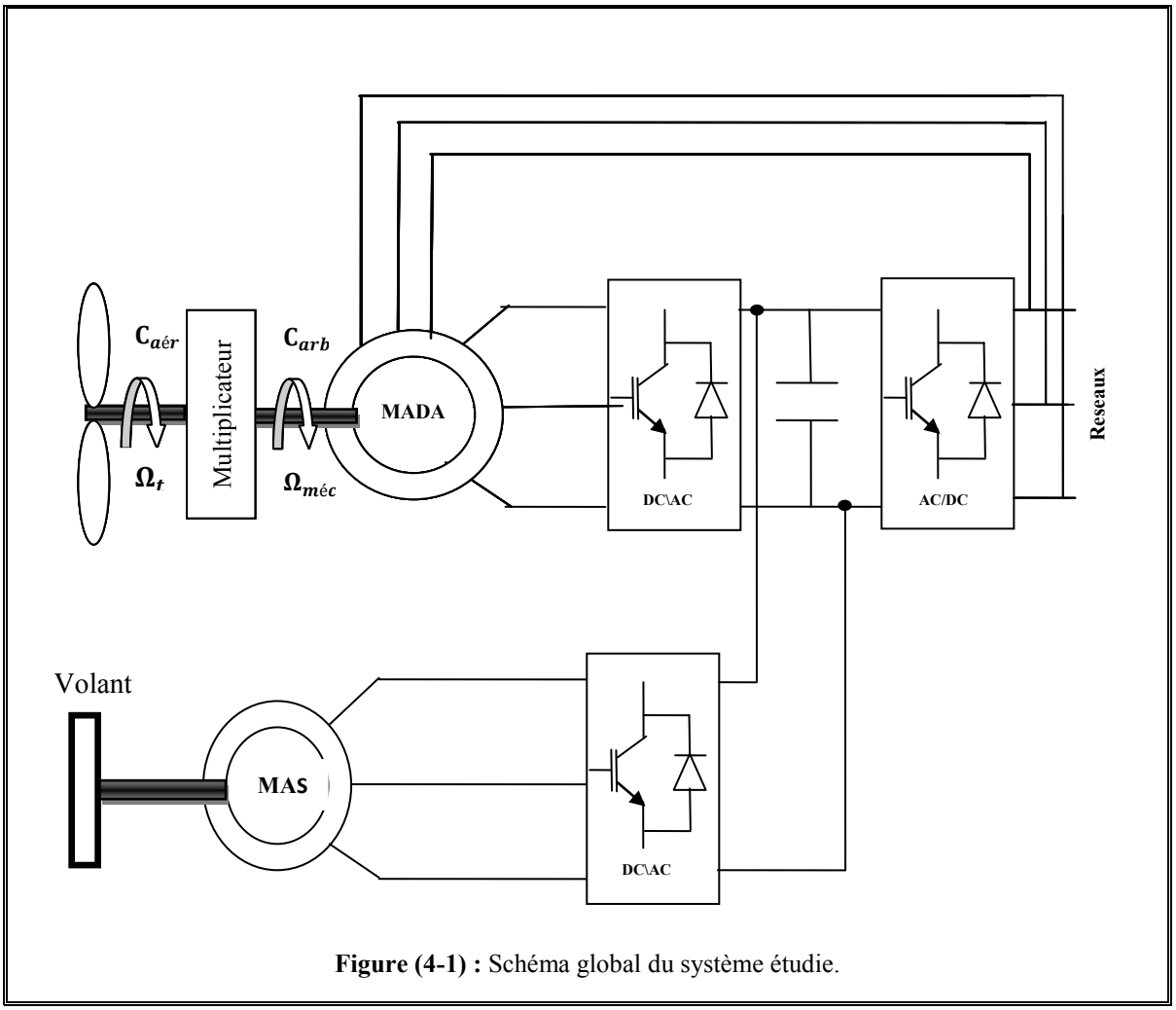


Figure (4-1) : Schéma global du système étudie.

4.3- Le Système Inertiel de Stockage d'Energie SISE

Le système inertiel de stockage d'énergie (SISE) étudié est constitué d'un volant d'inertie entraîné par une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS). Le stator de cette dernière est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC\DC\AC.

Le contrôle de transit des puissances, entre le système de stockage et le réseau est réalisé par le réglage des grandeurs statoriques de la MAS.

Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire du moteur électrique. L'énergie mécanique est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. Lors de la décharge du SISE, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique. Habituellement, une seule machine électrique peut fonctionner en moteur ou en générateur, en fonction du régime de fonctionnement du SISE. Le régime de fonctionnement est imposé par l'interface d'électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers la machine électrique.

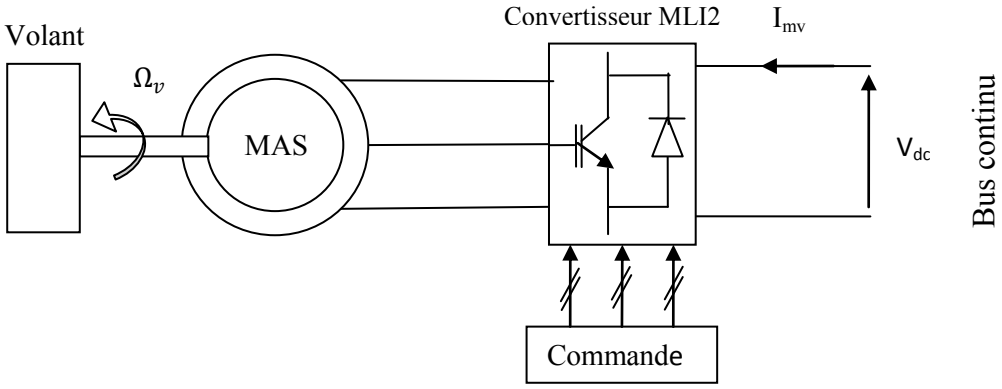


Figure (4-2) : Structure du système de stockage.

4.4- Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien

La puissance fournie par un générateur éolien est toujours variable, à cause des variations de la vitesse du vent. D'un autre côté, c'est le consommateur ou le réseau qui doit recevoir une puissance lissée. La figure (4-3) montre le principe de contrôle d'un SISE associé à un générateur éolien. Ayant la puissance générée par le générateur éolien P_{Dref} , et connaissant la puissance (P_{gref}) qu'il faut délivrer au réseau, la puissance de référence pour le SISE P_{wref} peut être déterminée comme suit :

$$P_{wref} = P_{gref} + \eta P_{mecopt} \quad (4\text{-}1)$$

Si la puissance de référence est positive, c'est qu'il y a un excédent d'énergie qui doit être stockée. Si la puissance de référence est négative, on a un déficit d'énergie qui doit être couvert par l'énergie stockée [23].

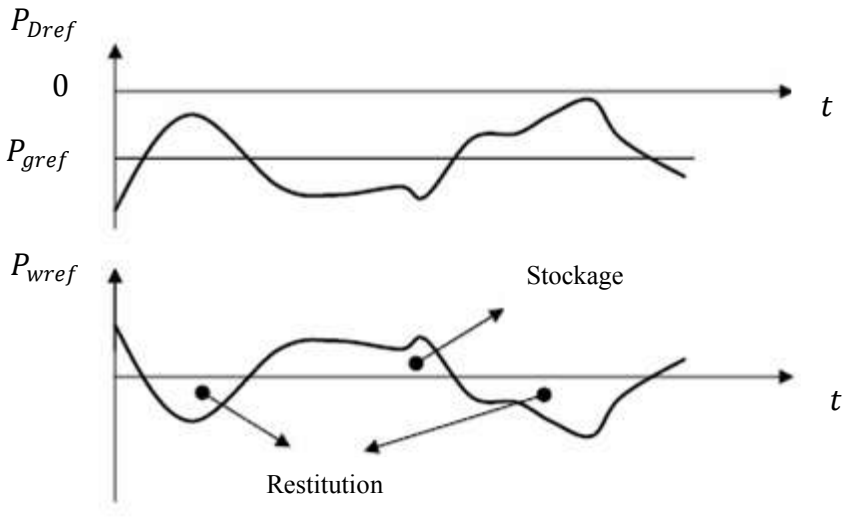


Figure (4-3) Principe du contrôle de SISE associe au générateur éolien.

4.5- Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au Silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont disposés les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor, mobile, est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor soient accessibles de l'extérieur ou soient fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [15].

On se propose, dans cette partie, de donner quelques informations sur les éléments constituants les machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes comme le montre la figure (4-4) :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique ;
- Le rotor, partie tournante permettant de mettre en rotation la charge mécanique ;
- Les paliers, parties mécaniques logeant les roulements et supportant le rotor via l'arbre.

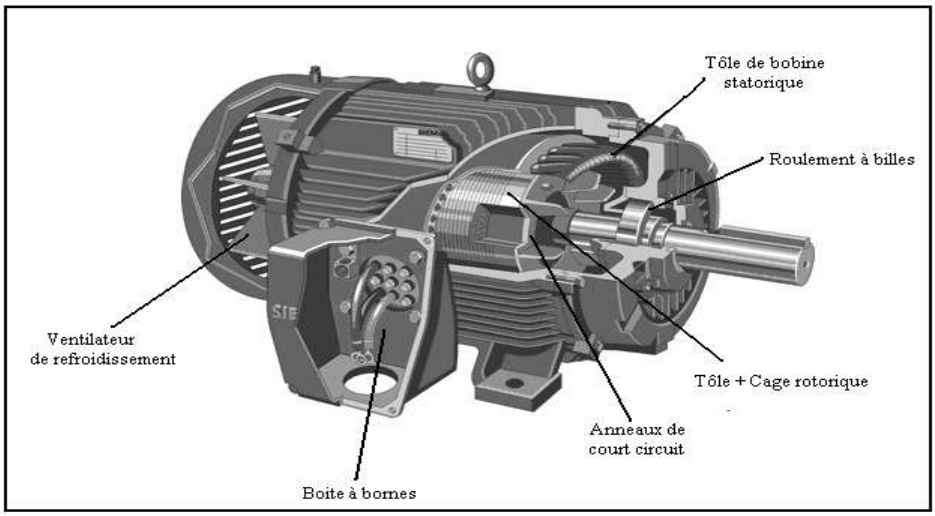


Figure (4-4) : Eléments principaux constituant une machine asynchrone à cage d'écureuil.

❖ Le stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines en acier sur lesquelles sont taillées les encoches statoriques logeant les conducteurs des enroulements. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35mm et 0.50mm pour minimiser les pertes fer dans le circuit magnétique (Figure (4-5)). De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles entre elles avec une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines (Figure (4-6)). Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion d'énergie électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation [12].

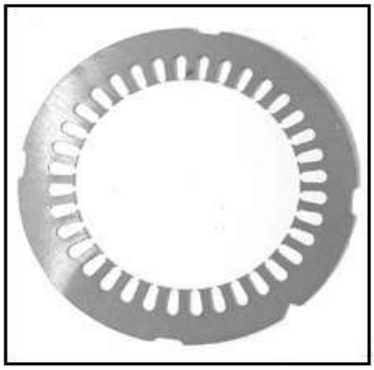


Figure (4-5) : Tôle constituant le circuit magnétique du stator.

L'objectif étant d'obtenir une répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices au niveau de l'entrefer afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

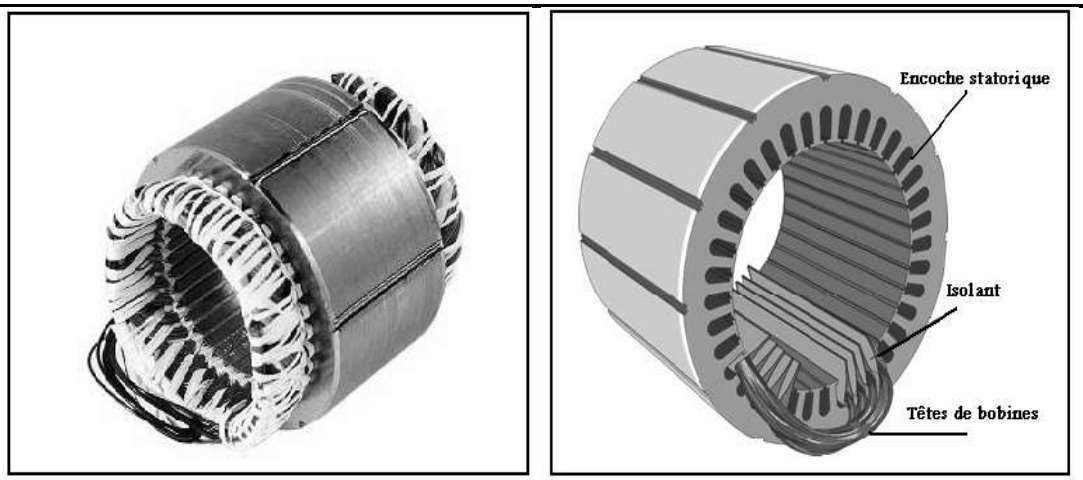


Figure (4-6) : Stator de machines asynchrones.

On peut exécuter les bobinages statoriques de plusieurs façons. Habituellement, on utilise trois types d'enroulements : l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type d'enroulement présente des avantages pour certaines applications. Pour les moteurs de faible puissance, et plus particulièrement lorsque la réalisation du bobinage est mécanisée, on utilise généralement l'enroulement concentrique.

❖ Le rotor

Le rotor est constitué, comme le stator, de tôles empilées composées habituellement du même matériau (Figure (4-7)). Pour les moteurs de faible puissance, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Pour les moteurs de plus forte puissance, chaque laminations est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées entre elles par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor [2].

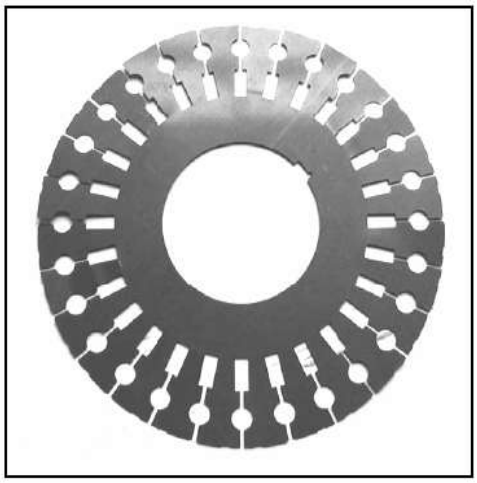


Figure (4-7) : Tôle du circuit magnétique rotorique d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Une inclinaison des barres, d'un pas dentaire (facteur de biais) suivant l'axe de la machine, est souvent pratiquée pour réduire l'influence des harmoniques et ainsi diminuer le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est pas en générale nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement efficace de la cage comme le montre la Figure (4-8).

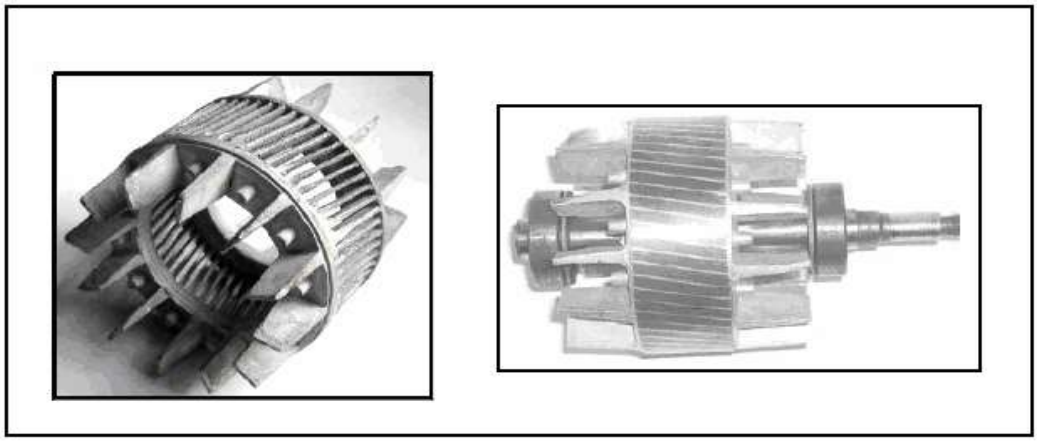


Figure (4-8) : Rotor à cage d'écureuil.

❖ Paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons et des tiges de serrage. L'ensemble, ainsi établi, constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

4.6- Modèle mathématique de la machine asynchrone

4.6.1- Equations générales de la machine

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [v_{rABC}] = [R_r][i_{rABC}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rABC}] = 0 \end{cases} \quad (4\text{-}2)$$

Avec :

- $[R_s]$ et $[R_r]$ sont respectivement les matrices les résistances statoriques et rotoriques par phase.
- $[v_{sabc}]$, $[v_{rABC}]$, $[i_{sabc}]$ et $[i_{rABC}]$ sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques.
- $[\phi_{sabc}]$ et $[\phi_{rABC}]$ sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c et A, B, C.

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

- L_s, L_r : Inductances propres statorique et rotorique ;
- M : Inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;
- M_{sr} : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\begin{cases} \phi_{sabc} = L_s I_{sabc} + M_{sr} I_{rABC} \\ \phi_{rABC} = M_{sr} I_{sabc} + L_r I_{rABC} \end{cases} \quad (4\text{-}3)$$

Avec : $[L_s]$ et $[L_r]$ représentent respectivement les matrices inductances statorique et rotorique exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix};\ [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix};\ [\emptyset_{sabc}] = \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[v_{rABC}] = \begin{bmatrix} v_{rA} \\ v_{rB} \\ v_{rC} \end{bmatrix};\ [i_{rABC}] = \begin{bmatrix} i_{rA} \\ i_{rB} \\ i_{rC} \end{bmatrix};\ [\emptyset_{rABC}] = \begin{bmatrix} \emptyset_{rA} \\ \emptyset_{rB} \\ \emptyset_{rC} \end{bmatrix}$$

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

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{saa} & l_{sab} & l_{sab} \\ l_{sab} & l_{saa} & l_{sab} \\ l_{sab} & l_{sab} & l_{saa} \end{bmatrix};\ [L_r] = \begin{bmatrix} l_{rAA} & l_{rAB} & l_{rAB} \\ l_{rAB} & l_{rAA} & l_{rAB} \\ l_{rAB} & l_{rAB} & l_{rAA} \end{bmatrix}$$

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

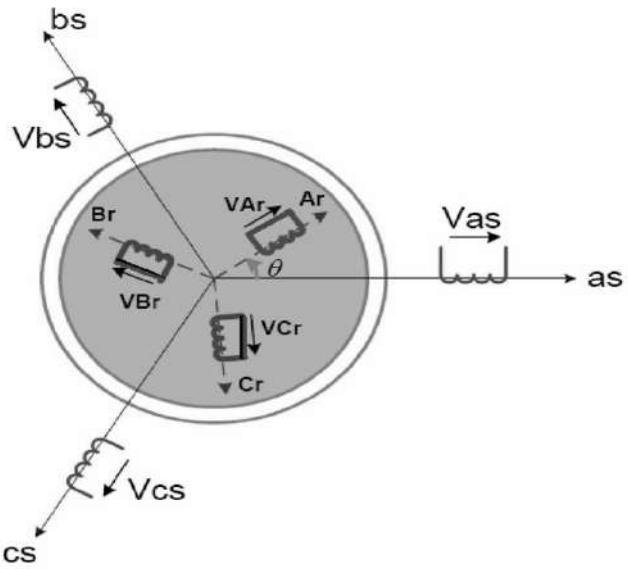


Figure (4-9) : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.
as, bs, cs : phases du stator ; Ar, Br, Cr: phases du rotor.

4.6.2- Modèle diphasé de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe.

Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [9]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

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

Avec θ : l'angle entre l'axe d et l'axe as de la figure (4-9) pour une transformation au stator ou l'angle entre d et Ar pour une transformation au rotor.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{cases} [v_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][v_{sabc}] \\ [v_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][v_{rABC}] \end{cases} \quad \begin{cases} [I_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][I_{sabc}] \\ [I_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][I_{rABC}] \end{cases} \quad \begin{cases} [\phi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][\phi_{sabc}] \\ [\phi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][\phi_{rABC}] \end{cases}$$

Ainsi, en multipliant les systèmes d'équations (4-2) et (4-3) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}\phi_{sd} - \omega_a \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\phi_{sq} + \omega_a \phi_{sd} \end{cases} \quad (4\text{-}4)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}\phi_{rd} - (\omega_a - \omega)\phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}\phi_{rq} + (\omega_a - \omega)\phi_{rd} \end{cases} \quad (4\text{-}5)$$

$$\begin{cases} \phi_{sdq} = L_s I_{sdq} + M_{sr} I_{rdq} \\ \phi_{rdq} = L_r I_{rdq} + M_{sr} I_{sdq} \end{cases} \quad (4\text{-}6)$$

Avec : $\begin{cases} \omega_s = \frac{d}{dt}\theta_s \\ \omega = \frac{d}{dt}\theta \\ \theta_s = \theta_r + \theta \end{cases}$

Dans le nouveau repère, la machine est représentée par la figure (4-10) ci-dessous.

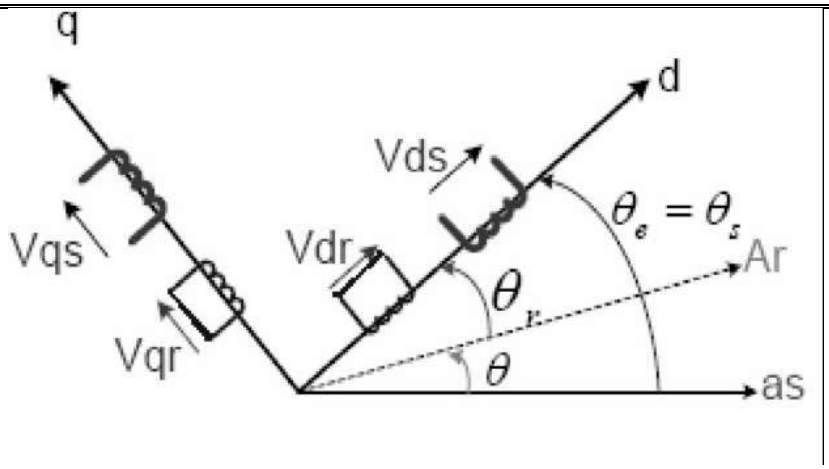


Figure (4-10) : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

4.6.3- Choix du référentiel

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque.

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de ω_p :

- $\omega_p = 0$: correspond au référentiel stationnaire.
- $\omega_p = \omega_r$: correspond au référentiel lié au rotor.
- $\omega_p = \omega_s$: correspond au référentiel lié au champ tournant.

4.6.4- Equations de Puissance et de Couple

Selon Park, la puissance électrique statorique instantanée de la machine s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2}\left(V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}\right) \quad (4\text{-}7)$$

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

$$dW_{es} = \frac{3}{2}R_s\left(I_{sd}^2 + I_{sq}^2\right)dt + \frac{3}{2}\left(d\phi_{sd}I_{sd} + d\phi_{sq}I_{sq}\right) + \frac{3}{2}\omega_s\left(\phi_{sd}I_{sd} - \phi_{sq}I_{sq}\right)dt \quad (4\text{-}8)$$

L'énergie électrique fournie au stator pendant le temps *dt* se décompose ainsi en trois termes :

- Le premier représente l'énergie perdue par effet Joule au stator ;
- Le second représente la variation d'énergie magnétique statorique ;
- Le troisième représente l'énergie dW_δ transférée du stator au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant.

Avec :

$$dW_\delta = \frac{3}{2}\omega_s\left(\phi_{sd}I_{sd} - \phi_{sq}I_{sq}\right)dt$$

$$dW_\delta = \frac{3}{2}R_r\left(I_{rd}^2 + I_{rq}^2\right)dt + \frac{3}{2}\left(d\phi_{rd}I_{rd} + d\phi_{rq}I_{rq}\right) + \frac{3}{2}\omega_r\left(\phi_{sd}I_{sd} - \phi_{sq}I_{sq}\right)dt \quad (4\text{-}9)$$

L'énergie dW_δ transitant à travers l'entrefer est donc composée de trois termes :

- L'énergie perdue par effet Joule au rotor ;
- La variation d'énergie magnétique rotorique ;
- L'énergie dW_{mec} transformable en énergie mécanique.

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le troisième terme de l'équation (4-8) par $\Omega_s dt$:

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\left(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}\right) \quad (4\text{-}10)$$

Le couple mécanique s'obtient en divisant le dernier terme de *(4-9)* par $\Omega_r dt$:

$$C_{mec} = \frac{3}{2}p\left(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}\right) = \frac{3}{2}p\left(\phi_{rd}I_{rq} - \phi_{rq}I_{rd}\right) = C_r + J\frac{d}{dt}\Omega_r + f\Omega_r \quad (4\text{-}11)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie que :

$$C_{mec} = C_{em} = \frac{3}{2}pM\left(I_{rd}I_{sq} - I_{rq}I_{sd}\right) \quad (4\text{-}12)$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction des composantes des courants statoriques et rotoriques en quadrature [2, 7].

4.7- Contrôle en vitesse pour le SISE et contrôle vectoriel pour la MAS

4.7.1- Calcul de la vitesse de référence du volant

Il est bien connu que l'énergie est l'intégrale de la puissance en fonction du temps.

$$P_{wref} = P_{gref} - \eta P_{mecopt} \quad (4\text{-}13)$$

Donc, en intégrant la puissance de référence déterminée par (4-13) on obtient une énergie.

En faisant la somme de cette énergie avec l'énergie stockée dans le volant d'inertie initialement, on obtient l'énergie de référence pour le SISE:

$$E_{cref} = E_c^{t_0} + \int_{t_0}^{t_1} P_{wref}\, dt \tag{4-15}$$

Où $E_c^{t_0}$: Représente l'énergie initiale du volant d'inertie.

Connaissant $E_c = J_{vol}\frac{\Omega_{vol}^2}{2}$, on obtient la vitesse de référence pour le volant d'inertie et, implicitement, pour la machine électrique du SISE :

$$\Omega_{volref} = \sqrt{\frac{2E_{cref}}{J_{vol}}} \tag{4-16}$$

Avec : J_{vol} *le m*oment d'inertie du volant ; Ω_{vol} la vitesse de rotation du volant.

Ensuite, la relation qui lie l'énergie, l'inertie et la vitesse angulaire est la suivant □

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}J_v\frac{d\Omega_v^2}{dt} \tag{4-17}$$

Avec :

- Ω_v : Vitesse angulaire du volant en [rad/s] ;
- J_v : Inertie du volant en [kg.m^2].

En regroupant les deux équations on obtient la relation suivant □

$$P_v = \frac{1}{2}J_v\frac{d\Omega_v^2}{dt} \tag{4-18}$$

En passant aux faibles variations on a □

$$P_v = \frac{1}{2}J_v\frac{\Delta\Omega_v^2}{\Delta t} \tag{4-19}$$

Avec :

- $\Delta\Omega_v$: Petite variation de vitesse angulaire autour d'un point de fonctionnement ;
- Δt : Petite variation de temps.

$$P_v\Delta t = \frac{1}{2}J_v\Delta\Omega_v^2 \tag{4-20}$$

$$J_v = \frac{2P_v\Delta t}{\Delta\Omega_v^2} \tag{4-21}$$

$$J_v = \frac{2P_v\Delta t}{(\Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2)} \tag{4-22}$$

Avec :

- Ω_{vmax} : Vitesse angulaire maximale du volant (égale à la survitesse maximale de la machine asynchrone) en [rad/s] ;

- Ω_{vmin} : Vitesse angulaire minimale du volant (limite de la zone de fonctionnement désirée) en [rad/s].

Le moment d'inertie est calculé par :

$$J_v = \frac{2P_v \Delta t}{(N_{vmax}^2 - N_{vmin}^2)\pi^2} \quad (4\text{-}23)$$

Avec :

- N_{vmax} : Vitesse de rotation maximale du volant en [tr/min] ;
- N_{vmin} : Vitesse de rotation minimale du volant en [tr/min].

4.7.2- La transmission mécanique

La transmission mécanique se résume à l'équation suivant :

$$J_v \frac{d\Omega_v}{dt} + f_v \Omega_v = C'_{em} \quad (4\text{-}24)$$

Avec :

- J_v : inertie du volant et de la machine asynchrone [Kg.m^2] ;
- f_v : coefficient de frottement visqueux [Nm/ rad.s^{-1}] ;
- Ω_v : vitesse angulaire du volant d'inertie [rad.s^{-1}] ;
- C'_{em} : couple électromagnétique de la machine asynchrone [N**m**]. Seul le couple de frottements dynamiques est pris en compte. On ne tient pas compte de l'élasticité de l'arbre. Le couple de frottement sec est négligé.

4.7.3- Modèle de la machine asynchrone avec orientation du flux

La commande retenue pour la MAS repose sur le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté. La modélisation de cette machine, représentée par les expressions (4-25) à (4-26), est donc menée dans le repère de Park, orienté selon le flux rotorique $(\emptyset_{rd} = \emptyset_r \quad et \quad \emptyset_{rq} = 0)$.

$$V_{sdmas} = R_{mas} I_{sdmas} + \sigma_{mas} L_{smas} \frac{dI_{sdmas}}{dt} + \frac{M_{mas}}{L_{rmas}} \frac{d\phi_r}{dt} - \omega_{smas} \sigma_{mas} L_{smas} I_{sqmas} \quad (4\text{-}25)$$

$$V_{sqmas} = R_{mas} I_{sqmas} + \sigma_{mas} L_{smas} \frac{dI_{sqmas}}{dt} + \frac{M_{mas}}{L_{rmas}} \frac{d\phi_r}{dt} + \omega_{smas} \sigma_{mas} L_{smas} I_{sdmas} \quad (4\text{-}26)$$

$$M_{mas} I_{sdmas} = \phi_r + \frac{L_{rmas}}{R_{rmas}} \frac{d\phi_r}{dt} \quad (4\text{-}27)$$

$$\omega_{smas} = p_{mas} \Omega_{mas} + \frac{M_{mas} R_{rmas}}{L_{rmas}} \frac{I_{sqmas}}{\phi_r}$$

$$\omega_{smas} = p_{mas} \Omega_{mas} + \omega_{sr} \quad (4\text{-}28)$$

Avec : $\omega_{sr} = \frac{M_{mas} R_{rmas}}{L_{rmas}} \frac{I_{sqmas}}{\phi_r}$

$$C_{emmas} = p_{mas} \frac{M_{mas}}{L_{rmas}} \phi_r I_{sqmas} \quad (4\text{-}29)$$

Où Ω_{mas} représentent la vitesse de rotation de la MAS, ω_s la pulsation des grandeurs statoriques de la MAS, et ω_{sr} la pulsation de glissement, exprimées en rad/s. Les autres paramètres sont définis en appendice.

4.7.4- Calcul du flux de référence de la MAS

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la MAS, la commande vectorielle à flux rotorique orienté est la plus utilisée car elle fournit les équations les plus simples.

Les vitesses nominales de la MAS et du volant d'inertie étant respectivement égales à 1500 et 3000 tr/min, un fonctionnement en régime défluxé de la MAS est considéré dans notre application afin d'entraîner celle-ci à des vitesses voisines de 3000 tr/min. Ce mode de commande permet également à la MAS de fonctionner à puissance constante sur toute la plage de vitesse retenue, soit sur l'étendue 1500 à 3000 tr/min.

En négligeant les pertes dans la MAS, une loi de défluxage à puissance constante peut être développée à partir de (4-29) pour aboutir à l'expression (4-30) du flux rotorique dans la MAS :

$$\phi_r(\Omega) = \frac{P_{mas}\, L_r}{p_{mas}\, M_{mas}\, I_{sqmasmax}} \frac{1}{\Omega_{mas\ mes}} \tag{4-30}$$

Avec P_{mas} la puissance nominale de la MAS. Les paramètres marqués d'un astérisque sont des paramètres estimés.

4.7.5- Le convertisseur :

Le convertisseur de puissance contrôlant la machine asynchrone est modélisé de la même façon que celui de la machine asynchrone à double alimentation « chapitre 03 ».

4.7.6- Calcul du courant de référence de la MAS

Le couple de référence de la MAS est donné par :

$$C_{ref} = \frac{P_{wref}}{\Omega_{mas}} + f_b \Omega_{mas} + C_s \tag{4-31}$$

Où P_{wref} est calculée à partir de l'équation (4-14), C_s le couple de frottement sec et f_b le coefficient de frottement visqueux. Cependant la relation (4-30) ne peut pas être utilisée directement dans le schéma de contrôle ; parce que la vitesse du volant d'inertie doit être maintenue entre deux limites.

A partir des expressions (4-30), (4-31) le courant rotorique de référence sur l'axe en quadrature peut être calculé comme :

$$I_{sqmasref} = \frac{C_{ref}\, L_{mas}}{M_{mas}\, p_{im}\, \phi_{rdref}} \tag{4-32}$$

Le schéma de contrôle en puissance pour le SISE et de contrôle vectoriel pour la MAS est présenté dans la figure (4-11). Le calcul des régulateurs utilisés est donné en Annexe (A.5.2).

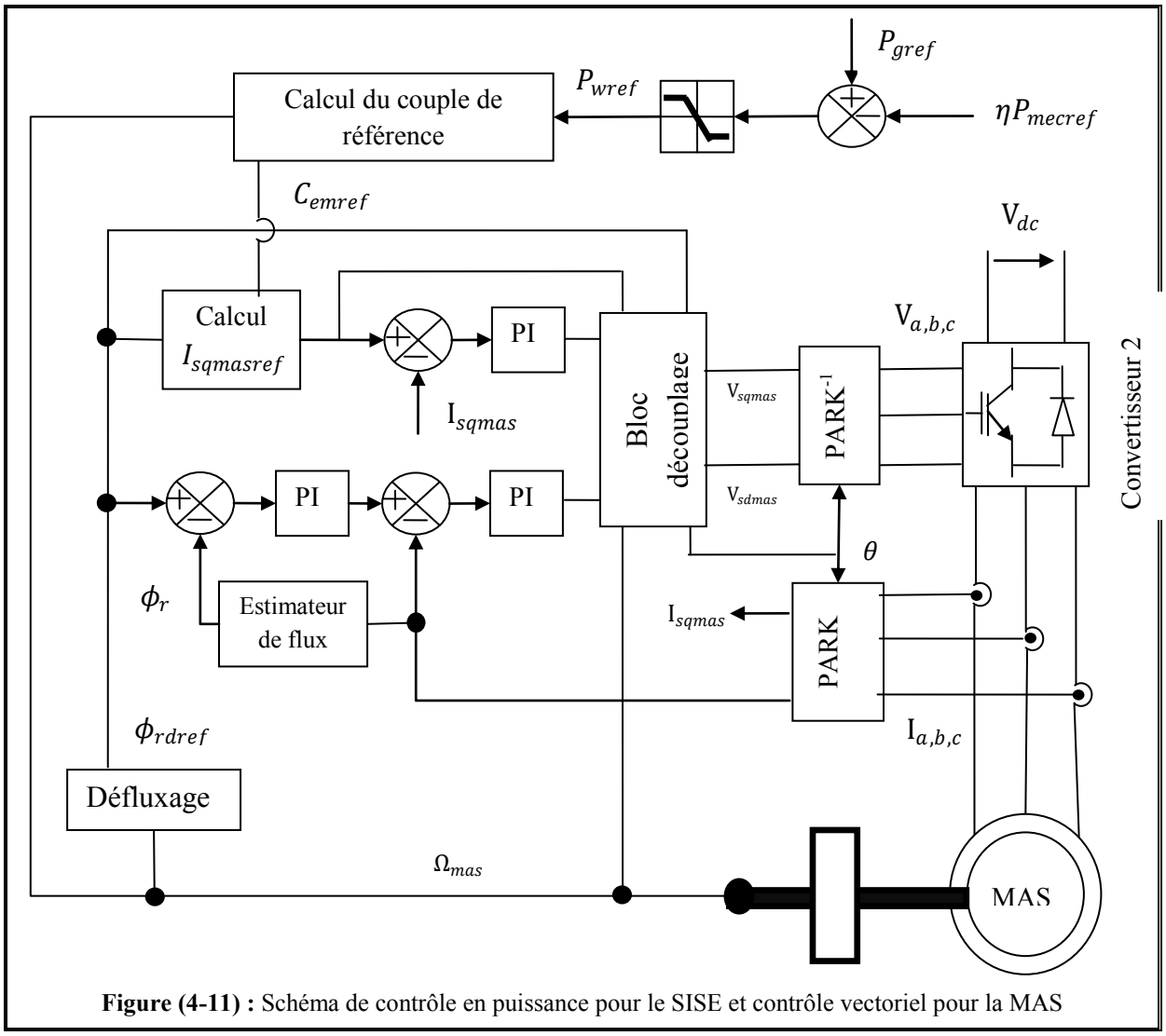


Figure (4-11) : Schéma de contrôle en puissance pour le SISE et contrôle vectoriel pour la MAS

Dans notre application le rendement η de l'aérogénérateur est estimé à 95% (sans la turbine), la puissance active de référence du réseau, P_{gref} est fixée à la valeur de -1.5 MW (le signe négatif signifie une puissance générée) et pour maintenir le facteur de puissance du réseau unitaire la puissance réactive de référence du réseau, Q_{gref} est fixée à une valeur nulle.

4.8- Résultats de la simulation de l'échange d'énergie entre le SISE et le réseau

Le premier essai que nous présentons illustre le principe du défluxage développé précédemment.

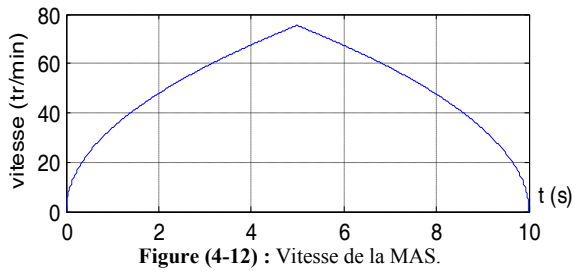


Figure (4-12) : Vitesse de la MAS.

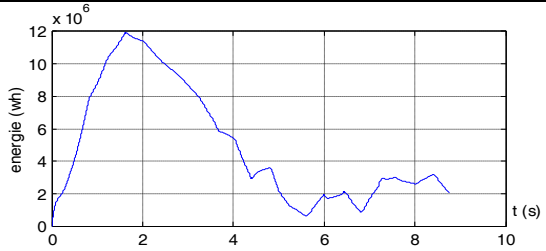


Figure (4-13) : Energie stocké du SISE.

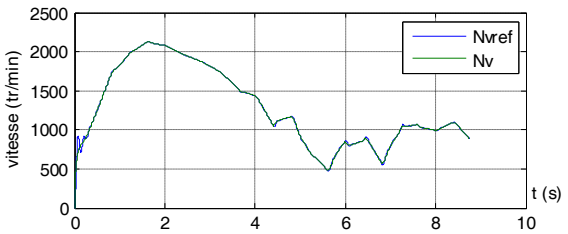


Figure (4-14) : Vitesse du volant d'inertie.

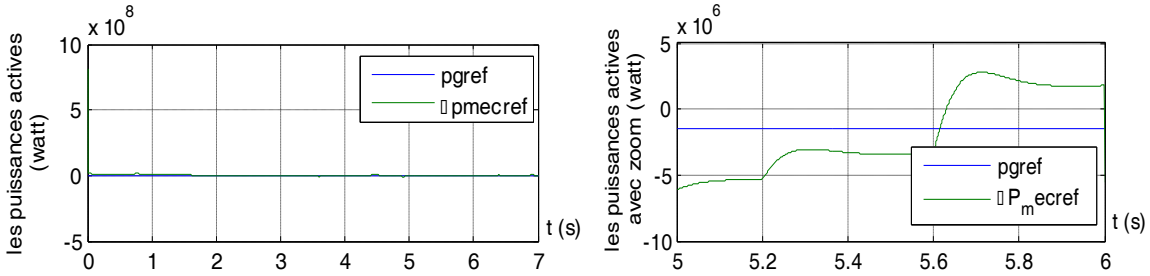


Figure (4-15) : les puissances actives P_{gref} et P_{mecref}.

La figure (4-12) représente l'évolution de la vitesse du volant d'inertie lors de cet essai. Pour des vitesses supérieures à 1500 tr/min, la MAS accouplée au volant d'inertie fonctionne en mode défluxé.

Ces différents résultats témoignent d'un bon comportement dynamique du SISE en fonction de la puissance fournie par le vent.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir un modèle mathématique de la machine asynchrone à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park et étudie le système inertiel de stockage d'énergie.

Les simulations numériques présentées dans cette partie ont permis de montrer que le système de génération étudié pouvait fonctionner sur différentes configurations de réseaux à fréquence fixe ou variable.

A.1- Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

Puissance nominale : 1.5 MW ;
Tension nominale : 690 V ;
Fréquence nominale : 50 Hz ;
Nombre de paire de pôles : 2 ;
Résistance statorique : 0.012 Ω ;
Résistance rotorique : 0.021 Ω ;
Inductance statorique : 0.0137 H ;
Inductance rotorique : 0.0136 H ;
Inductance mutuelle : 0.0135 H ;
Moment d'inertie : 1000 $Kg.m^{2}$;
Coefficient de frottement : $7.1e^{-3}$ Nms/rad.

A.2- Paramètres de la turbine éolienne

Puissance nominale : 1.5 MW ;
Nombre de pales : 3 ;
Diamètre de pale : 60 m ;
Gain du multiplicateur : 90 ;
Coefficient de frottement : $7.1e^{-3}$ Nms/rad ;
Moment d'inertie : 1000 $Kg.m^{2}$.

A.3- Paramètres du réseau

Tension nominale : 690 V ;
Fréquence nominale : 50 Hz ;
Résistance de réseau : 0.2 Ω ;
Inductance de réseau : 15 mH.

A.4- Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Puissance nominale : 3 KW ;
Tension nominale : 690 V ;
Fréquence nominale : 50 Hz ;
Flux statorique nominal : 0.98 Wb ;
Facteur de puissance : 0.89 ;
Nombre de paire de pôles : 2 ;
Résistance statorique : 1.84 Ω ;
Résistance rotorique : 1.84 Ω ;
Inductance statorique : 0.17 H ;
Inductance rotorique : 0.17 H ;
Inductance mutuelle : 0.16 H ;
Moment d'inertie : 0.0154 $Kg.m^{2}$.

A.5- Calcul des régulateurs

A.5.1.Régulateur du courant I_{rd} et I_{rq}

Le régulateur du courant rotorique direct permet de définir la tension V_{rdref} , nécessaire pour maintenir le flux de référence.

A flux constant égale à $\emptyset_{rdref}$ en supposant que le découplage est réalisé, on aura :

$$\frac{I_{rdref}\ (S)}{V_{rdref}\ (S)} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r S} \qquad \text{(A5-1)}$$

La boucle de régulation de courant peut se présenter par le schéma bloc de la figure (3-8)

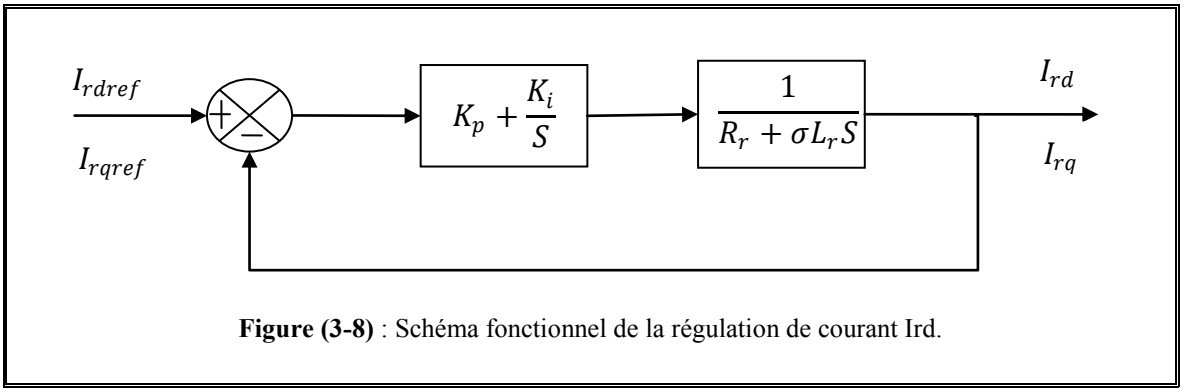


Figure (3-8) : Schéma fonctionnel de la régulation de courant Ird.

L'expression du courant de référence est :

$$I_{rdref}\ (S) = \frac{\emptyset_{sdref}}{M} \qquad \text{(A5-2)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{rd}\ (S)}{I_{rdref}\ (S)} = \frac{\frac{(K_p S + K_i)}{\sigma L_r}}{S^2 + \frac{R_r + K_p}{\sigma L_r} S + \frac{K_i}{\sigma L_r}} \qquad \text{(A5-3)}$$

Le polynôme caractéristique est :

$$P(S) = S^2 + \frac{R_r + K_p}{\sigma L_r} S + \frac{K_i}{\sigma L_r} \qquad \text{(A5-4)}$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée, deux pôles complexes conjugués $S_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$:

L'identification terme à terme des deux équations (3-18), (3-19) entraîne que :

$$\begin{cases} K_i = 2\sigma L_r \rho^2 \\ K_p = 2\rho\sigma L_r - R_r \end{cases} \qquad \text{(A5-5)}$$

A.5.2-Régulateur du courant I_{sd} et I_{sq}

L'expression du courant de référence Irq est :

$$\frac{I_{Sqref}\ (S)}{V_{Sqref}\ (S)} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s S} \tag{A5-6}$$

La boucle de régulation de courant peut se présenter par le schéma bloc de la figure (A5-1)

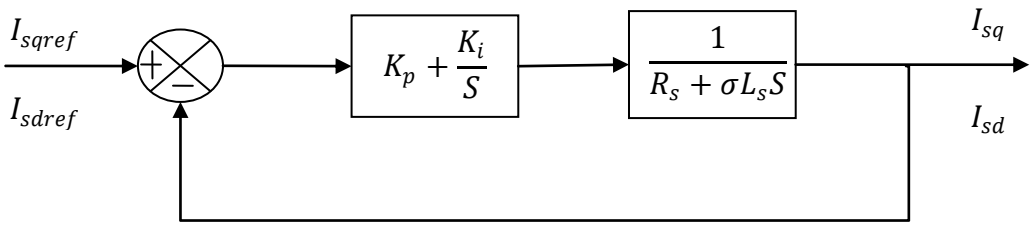


Figure (A5-1) : Schéma fonctionnel de la régulation de courant Irq.

L'expression du courant de référence est :

$$I_{sqref}\ (S) = \frac{\emptyset_{rdref}}{M} \tag{A5-7}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{sq}\,(S)}{I_{sqref}\ (S)} = \frac{\frac{(K_p S + K_i)}{\sigma L_s}}{S^2 + \frac{R_s + K_p}{\sigma L_s} S + \frac{K_i}{\sigma L_s}} \tag{A5-8}$$

Le polynôme caractéristique est :

$$P(S) = S^2 + \frac{R_s + K_p}{\sigma L_s} S + \frac{K_i}{\sigma L_s} \tag{A5-9}$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée, deux pôles complexes conjugués $S_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$:

L'identification terme à terme des deux équations (3-23), (3-24) entraîne que :

$$\begin{cases} K_i = 2\sigma L_s \rho^2 \\ K_p = 2\rho\sigma L_s - R_s \end{cases} \tag{A5-10}$$

A.5.3- Régulateur de la vitesse

Le régulateur permet de déterminer le couple de référence afin de maintenir la vitesse correspondante. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit très rapide par rapport à celle de la vitesse :

$$\frac{\omega(S)}{C_{emref}\ (S)} = \frac{p}{f+JS} \qquad \text{(A5-11)}$$

En association à cette fonction un régulateur PI :

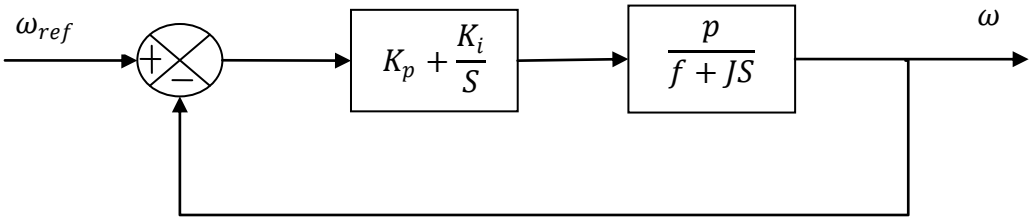


Figure (3-8) : Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée, calculée à partir du schéma précédent, est donnée par :

$$\frac{\omega(S)}{\omega_{ref}\ (S)} = \frac{\frac{p(K_p S+K_i)}{J}}{S^2+\frac{f+pK_p}{J}S+\frac{K_i p}{J}} \qquad \text{(A5-12)}$$

Impose toujours deux pôles complexes conjugués $S_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$ en boucle fermée et par identification avec la nouvelle équation caractéristique désirée, nous arrivons à :

$$\begin{cases} K_i = \frac{2J\rho^2}{p} \\ K_p = \frac{2\rho J - f}{p} \end{cases} \qquad \text{(A5-13)}$$

A.5.4- Régulateur de la puissance active $P_s$et réactiveQ_s

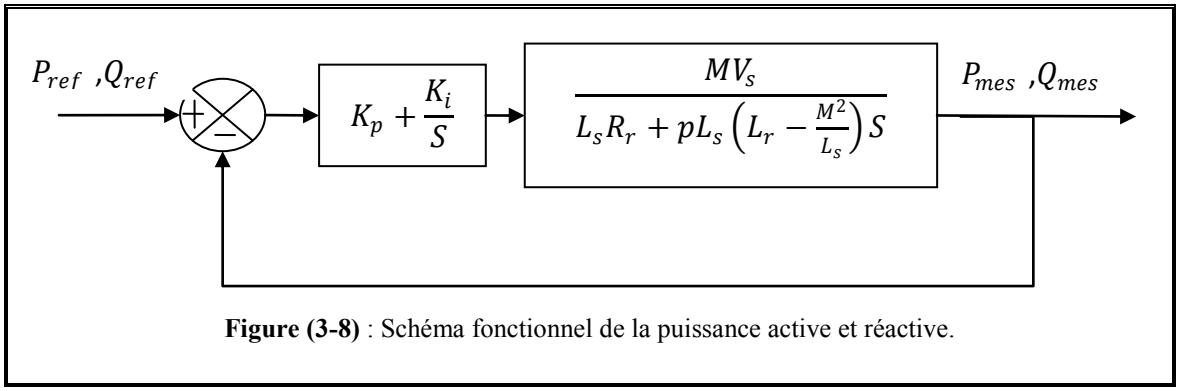


Figure (3-8) : Schéma fonctionnel de la puissance active et réactive.

$$F_o(S) = \frac{K_o S+K_i}{L_r\sigma S^2+R_r S} \qquad \text{(A5-14)}$$

Ainsi la fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$F_p(S) = \frac{K_o S + K_i}{L_r \sigma S^2 + (R_r + K_o) S + K_i} \quad \text{(A5-15)}$$

Impose toujours deux pôles complexes conjugués $S_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$ en boucle fermée et par identification avec la nouvelle équation caractéristique désirée, nous arrivons à :

$$\begin{cases} K_i = 2\sigma L_r \rho^2 \\ K_p = 2\rho\sigma L_r - R_r \end{cases} \quad \text{(A5-16)}$$

Liste des symboles

❖ Aprévіations :

- MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
- MLI **:** Modulation de Largeur d'Impulsion.
- PI: Proportionnel Intégral.
- MPPT: Maximum Power Point Tracking.
- MAS : Machine Asynchrone.
- SISE : Système Inertiel de Stockage d'Energie.

❖ Couple :

- Ce : Couple électromagnétique de la machine (N.m).
- Cr : Couple résistant (N.m).
- C'_{em} : couple électromagnétique de la machine asynchrone [N.m].
- J_v *:* Inertie du volant et de la machine asynchrone [Kg.m^2].
- J : Inertie des masses tournantes (Kg.m^2).

❖ Courants, tension, flux exprimés dans le système d'axes d-q :

- I , i : Courant(A).
- I_{sd} : Courant statorique sur l'axe d (A).
- I_{sq} : Courant statorique sur l'axe q (A).
- I_{rd} : Courants rotorique sur l'axe d (A).
- I_{rq} : Courant rotorique sur l'axe q (A).
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}: Courants statoriques (A).
- I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotoriques (A).
- V_{sd}: Tension statorique de la MADA sur l'axe d (V).
- V_{sq} : Tension statorique de la MADA sur l'axe q (V).
- V_{rd} : Tension rotorique de la MADA sur l'axe d (V).
- V_{rq}: Tension rotorique de la MADA sur l'axe q (V).
- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}: Tensions d'alimentations des phases statoriques (V).
- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}: Tensions d'alimentations des phases rotoriques (V).
- U_{dc}: Source de tension continue de l'onduleur (V).
- V_{abcm} : Tension de demi -bras A, B ou C (V).
- V_{abc}: *Tension* de sortie de l'onduleur A, B ou C (V).
- $V_{ref\,123}$: Tension de références 1, 2 ou 3 (sinusoïdal) (V).
- V_m : Amplitude de la tension de référence (V).
- V_p: Porteuse triangulaire (V).
- V_{pm} : Amplitude de la porteuse triangulaire (V).

- ϕ_s: Flux statorique (Wb).
- ϕ_r: Flux rotorique (Wb).
- ϕ_m(wb): Flux magnétisant (Wb).
- V_{sdmas} : Tension statorique de la MAS sur l'axe d (V).
- V_{sdmas} : Tension statorique de la MAS sur l'axe q (V).
- I_{sdmas} : Courant statorique de la MAS sur l'axe d (V).
- I_{sqmas} : Courant statorique de la MAS sur l'axe q (V).

❖ *Fréquences, pulsations, vitesse, déphasage :*

- f_{ref} : Fréquence de la tension de référence (Hz).
- f_p: Fréquence de la porteuse triangulaire (Hz).
- f_s : Fréquences statorique (Hz).
- f_r : Fréquences rotorique (Hz).
- ω= Ωp : Pulsation électrique du rotor (Rad/s).
- $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: Pulsation statorique (Rad/s).
- $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Pulsation rotorique (Rad/s).
- N **:** Vitesse (tr/min).
- Ω_{nom} : Vitesse mécanique nominale (Rad/s).
- Ω_s *:* Vitesse mécanique (Rad/s).
- Ω_{ref} *:* Vitesse de référence (Rad/s).
- θ_s, θ_r : Déphasage du l'axe direct par rapport au stator et rotor (Rad).

❖ *Indices :*

- *s :* Indice des axes correspondant au stator.
- *r :* Indice des axes correspondant au rotor.
- *a, b, c :* Indices correspondant aux trois phases a, b, c.
- *d,q* : Repère triphasé lie au champs tournant.

❖ *Paramètres :*

- R_s *:* Resistance d'une phase statorique (Ω).
- R_r *:* Resistance d'une phase rotorique (Ω).
- L_s*:* Inductance propre d'une phase statorique (H).
- L_r*:* Inductance propre d'une phase rotorique (H).
- M *:* Inductance cyclique mutuelle (H).
- M_{sr} *:* Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique (H).
- m_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques (H).
- m_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques (H).
- L_{ss} *:* Matrice des inductances statoriques(H).
- L_{rr} *:* Matrice des inductances statoriques(H).
- V_s *:* Tension appliquée au stator (V).
- V_r *:* Tension appliquée au stator (V).

- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: Coefficient de fuite totale.
- ϕ_{snom} : Flux statorique nominal (Wb).
- $\phi_{réf}$: Flux de référence (Wb).
- K_p : Valeur de la constante proportionnelle du régulateur.
- K_i*:* Valeur de la constante intégrale du régulateur.
- K_d *:* Valeur de la constante dérivation du régulateur.
- *S= d/ dt* : Opérateur dérivé de Laplace.
- S_{abc} : Grandeurs booléennes de commande des bras de l'onduleur.
- *(d-q)* : Axes longitudinal et en quadrature du repère de Park.
- *J* : Moment d'inertie (Kg.m^2).
- p : Nombre de paires de pôles de la machine.
- K_f: Coefficient de frottement.
- m : Indice de modulation.
- r : Taux de modulation.
- P_{ch} : Puissance active des charges (W).
- P_c : Puissance active aux bornes du condensateur (W).
- P_f : Puissance active générée par le CCR (W).
- P_{mada} : Puissance active du système éolien (W).
- P_{ond} : Puissance active générée par le CCM coté continu (W).
- P_r: Puissance active rotorique de la MADA (W).
- P_{red} : Puissance active générée par le CCR coté continu (W).
- P_{res} : Puissance active fournie au réseau (W).
- p_s : Puissance active statorique de la MADA (W).
- P_t: Puissance mécanique de la turbine (W).
- Q_c : Puissance réactive des charges (VAR).
- Q_f: Puissance réactive générée par le CCR (VAR).
- Q_{mada} : Puissance réactive du système éolien (VAR).
- Q_r : Puissance réactive rotorique de la MADA (VAR).
- Q_{res} : Puissance réactive fournie au réseau (VAR).
- Q_s : Puissance réactive statorique de la MADA (VAR).

➢ Références Bibliographiques

[1] Naouel HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire de magister en Electrotechnique de l'Université Mentouri de Constantine, Soutenu le : 24 /01/2008.
[2]S. EL-Aimani ‹‹ Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension ››, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
[3] S.Ezzeldin Abdin and Wilson Xu ‹‹ Controle Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine- Induction Generator Unit, IEEE Transactions on Energy Conversion ››. Vol.15 N°1, pp.91-96, March, 2004.
[4] Herve Heamart Joseph et Martin ‹‹ Conception d'une éolienne (HAWT) par approche aérodynamique ››. INCI 3101-22, Octobre, 2001.
[5] L.Leclercq ‹‹ Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des servisse système ››, Thèse de Doctorat. Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.
[6] F.Poitiers ‹‹ Etude et Commande de Génératrice Asynchrone pour l'utilisation de l'Energie Eolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ››, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
[7] J.Martin ‹‹ Energies éoliennes ››. Techniques de l'ingénieurs Vol.B1360, 1990.
[8] F.A.Farret B.Palle et M.G.Siloes ‹‹ Full Expandable Model of Parallel Self-Exited Induction Generation ››. EE Proc-Electir, Power Appl, Vol 152, Nol Janaury, 2005.
[9] Dendouga Abdehakim ‹‹ Contrôle des puissances active et réactive de la machine a double alimentation ››, Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, soutnue le : 10/02/2010
[10] Moussa Siddo Abdoulaziz ‹‹ Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergieéolienne ››, Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'école nationale polytechnique.
[11] Rachid Aziazia ‹‹ Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation par un convertisseur multi niveaux ››, Mémoire de magistère de l'université M'hamed bougara.
[12] R. Abdessamad et M. Kadjoudj ‹‹ Modélisation des Machines Electriques ››. Presse de l'université de Batna, Algérie, 1987.
[13] M. Pinard ‹‹ Commande Electronique Des Moteurs Electriques ››, DUNOD, Série EEA, 2004.
[14] N.Benyahia, K.Srairi, S.Mimoune ‹‹ Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique ››, Mémoire d'ingénieur de l'université de Beskra.
[15] Armand Boyette ‹‹ Contrôle-Commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ››, Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, soutenu le 11 décembre 2006.
[16] SejaKhojet el Khil ‹‹ Commande vectoriel d'une machine asynchrone doublement alimentée ››, Thèse de doctorat de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis.
[17] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, ‹‹ Embedded generation ››. The Institution of Electrical Engineers, London, 2000. Juin 2002, pp.37-40.
[18] J.-L. Fraisse, ‹‹ Le raccordement de la production décentralisée en HTA et BT ››. Revue REE, N°7, Juillet 2002, pp. 34-46.
[19] R. Hebner, J. Beno, A. Walls, ‹‹ Flywheel Batteries come around again ››. IEEE Spectrum, April 2002, pp. 46-51.

[20] F. Hardan, J. A. M. Bleijs, R. Jones, P. Bromley, ‹‹ Bi-directional power control for flywheel energy storage system with vector-controlled induction machine drive ››. IEE conference publication Institution of Electrical Engineers, 1998, pp. 456-477.
[21] Ludovic Leclercq, Benoit Robyns, Jean-Michel Grave, ‹‹ Fuzzy logic based control of a flywheel energy storage system based on an induction machine associated with wind and diesel generators ››. 10th International POWER ELECTRONICS and MOTION CONTROL Conference, EPEPEMC 2002, 9-11 September 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatie.
[22] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher, J. Clare, ‹‹ Control Strategies for Enhanced Power Smoothing in Wind Energy Systems Using a Flywheel Driven by a Vector-Controlled Induction Machine ››. IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 48, n° 3, June 2001, pp. 625-635.
[23] G. Cimuca, M.M. Radulescu, C. Saudemont, B.Robyns, ‹‹ Performance Analysis of an Induction Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator››. Proceedings of the 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments. OPTIM 2004, Brasov, Romania, May 2004, vol.II, pp.319-326.

➢ Sites internets

fr.leonardo-energy.org
www.eole.com www.retscreen.net
www.cler.org
www.wind-energie.de
www.ewea.org
www.awea.org www.windpower.org/fr/core.htm