

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

PAR :

1. LEBADI NASSIREDDINE
2. LOUAFI LEYLA

Intitulé

CONTROLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DE
LA MADA

Thèse soutenue le : 10 / 06 / 2018 devant le jury :

Mr. BENRABEH Fouad	Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.	Président
Mr. ZOUGGAR El Oualid	Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.	Rapporteur
Mr. ROUABHI Riyadh	Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.	Examineur
Mr. HRIZI Abd Elghafour	Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

DEDICACE

avant tout, je tiens à remercier le bon Dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie.

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mon frère « fares » et mes sœurs « sabrina et ses enfants » et « houda et son fils » et « marwa ».

A mon fiancé « Abid mohamed ».

A toutes mes familles.

A mon meilleur ami « laïfaoui louiza ».

A mes amis et mes collègues de la promotion 2018 « Réseaux Electrique ».

A tous les musulmans dans le monde entier

« LOUAFI LEYLA »

DEDICACE

avant tout, je tiens à remercier le bon Dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie.

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères « abdel hakim et ahmade » et ma sœur « wisseme »

A cher papa « lakhedare ».

A toutes mes familles.

A mon meilleur ami « hadidane toefik » et « ben chaban youssef ».

A mes amis et mes collègues de la promotion 2018 « Réseaux Electrique ».

A tous les musulmans dans le monde entier

« LEBADI NASSIREDDINE »

Remerciement

El hamdou li ALLAH.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département de génie électrique de l'université Mohamed Boudiaf - M'sila.

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé, et la patience durant toutes ces années, pour accomplir ce travail que nous venions aujourd'hui pour la présentation.

*Mes vifs remerciements à Monsieur: **Dr. ZOUGGAR El Oualid** pour leurs aides, sa gentillesse, ses encouragements et ses conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce travail.*

Nous remercions également tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Nous remercions tous les enseignants du département génie électrique.

A cette occasion, Nous remercions également tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin durant ces dernières années.

SOMMAIRE.....	I
LISTE DES FIGURES.....	II
LISTE DES SYMBOLES.....	III
INTRODUCTION GENERALE.....	VI

CHAPITRE I
MODELISATION ET STRATEGIES DE COMMANDE DES TURBINES A
VITESSE VARIABLE

I.1.Introduction	03
I.2. Historique de l'éolien.....	03
I.3. Définition de l'énergie éolienne.....	04
I.4. Principe de fonctionnement d'une éolienne	05
I.5. Types des turbines éoliennes.....	06
I.5.1. Eoliennes à axe vertical	06
-Avantages.....	07
-Inconvénients.....	07
I.5.2 Eoliennes à axe horizontal	07
-Avantages.....	07
-Inconvénients.....	07
I.6. Hypothèses simplificatrices.....	08
I.7. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes.....	08
-Les avantages.....	08
-Les inconvénients.....	09
I.8. Principe de fonctionnement de la turbine.....	09
I.9. Modélisation du système éolienne.....	10
I.9.1. Modélisation du vent.....	10
I.9.2. Modélisation de la turbine.....	10
I.9.3. Modèle du multiplicateur.....	12
I.9.4. Equation dynamique de l'arbre.....	13
I.10. Stratégies de commande.....	14
I.11.MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	15
I.12. Commande indirecte de la vitesse.....	16
I.13. Résultats de simulation	17
I.13.1. Schéma de simulation	17
I.13.2. Interprétation des résultats	18
I.14. Conclusion.....	20

CHAPITRE II
MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE
ALIMENTATION

II .1 Introduction	20
II .2Composition de la MADA	20
II .3 Présentation de la machine à double alimentation.....	21
II .4 Principe de fonctionnement de la MADA	22
II.5 Mode de fonctionnement de la MADA.....	22
II.5.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	22
II.5.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	23
II.5.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	23
II.5.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	24
II.6 Différentes topologies de la MADA	24
II.7 Domaines d'application de la MADA.....	25
II.8 Intérêt de la MADA	25
II.9 Avantages et inconvénients de la MADA.....	25
II.9.1 Avantages de la MADA.....	25
II.9.2Inconvénients de la MADA.....	26
II.10 Modélisation de la MADA.....	26
II.10.1Représentation de la machine dans l'espace électrique	26
II.10.2 Hypothèses simplificatrices.....	27
II.10.3Modèle et Identification des paramètres de la machine	27
II.10.4 Modèle triphasé de la MADA	27
II.10.4.1Equations électriques.....	27
II.10.4.2 Equations des flux.....	27
II.10.4.3 L'équation mécanique de la machine.....	28
II.10.5 Changement de repère	29
II.10.6 Application de la transformation de Park à la MADA.....	29
II.11 Mise sous forme d'équation d'état.....	31
II.12 Résultats de simulation (MADA)	32
II.13 Interprétation des résultats.....	38
II.14 Conclusion.....	38

Chapitre III
Commande Vectorielle De La GADA

III.1 Introduction	41
III.2 Commande vectorielle de la GADA.....	41
III.3Principe de la commande vectorielle.....	42
III.4 Modèle de la MADA à flux statorique orienté.....	42
III.4.1 Expressions des puissances active et réactive statoriques.....	43
III.4.2 Expressions des tensions rotoriques	44
III.5 Types de la commande vectorielle.....	46
III.5.1 Commande vectorielle directe.....	46
III.5.2 Commande vectorielle indirecte.....	47
III.6 Résultats de Simulation.....	47
III.6.1 Interprétation des résultats.....	50
III.8 Résultats de la simulation.....	54
III.8.1 Interprétation des résultats	54
III.9 Conclusion	56
Conclusion générale.....	57
Annexe	61
Référence Bibliographique	
Résumé	

Liste des figures

CHAPITRE I : MODELISATION ET STRATEGIES DE COMMANDE DES TURBINES A VITESSE VARIABLE

Figure I.1 : Graphique de la capacité totale de puissance fournie par l'éolienne dans le monde (MW).....	04
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	05
Figure. I.3 Types d'éolienne.....	06
Figure I.4 : Schéma de la turbine éolienne.....	10
Figure I.5 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine	11
Figure I.6 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	12
Figure I.7 schéma de la turbine éolienne.....	12
Figure I.8 : Modèle mécanique simplifié Du multiplicateur	13
Figure I.9 : Modèle de schéma bloc de de aérogénérateur.....	14
Figure I.10 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	15
Figure I.11 : Commande indirecte de vitesse	17
Figure I.12 : schéma bloc de la turbine éolienne.....	18
Figure I.13 : schéma bloc de commande MPPT de la turbine.....	18
Figure I.14: coefficient de puissance de la turbine	19
Figure I.15 : Vitesse mécanique et la puissance mécanique produite par la turbine.....	19
Figure I.16 : Vitesse spécifique λ et le profil du vent appliqué à la turbine.....	19

CHAPITRE II MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Figure II.1 : Schéma d'un système de conversion d'énergie éolienne.....	22
Figure II. 2: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	23
Figure II. 3 : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	24
Figure II. 4 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	24
Figure II. 5 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	25
Figure II. 6 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	25
Figure II.7 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	27

Figure II.8 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.....	28
Figure II.9 : Le principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	30
Figure II.10: schéma bloc de la avec les sources des tensions (Rotorique et Statorique).....	33
Figure II-11: Les tensions d'alimentations au rotor.....	34
Figure II-12-1: Les tensions d'alimentations au rotor (Zoom).....	34
Figure II-13: Les tensions d'alimentations au stator.....	34
Figure II-14 : Les tensions d'alimentations au stator (Zoom).....	35
Figure II-15: Le couple électromagnétique.....	35
Figure II-16: Flux statorique quadrature (wb).....	35
Figure II-17: Flux statorique directs (wb).....	36
Figure II-18: courant rotorique quadrature (A).....	36
Figure II-19: courant rotorique directe (A).....	36
Figure II-20 : La puissance active et réactive statorique.....	37
Figure II-21 : La puissance active et réactive rotorique.....	37
Figure II-22 : Courants rotoriques.....	37
Figure II-23 : Courants statoriques.....	38
Figure II-24 : Courants statoriques (Zoom).....	38

CHAPITRE III
COMMANDE VECTORIELLE DE LA
' GADA '

Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.....	42
Figure. III.2 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	45
Figure III.3 :Schéma bloc de la commande directe en puissance de la MADA.....	46
Figure III.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.....	47
Figure III.5 :Les composantes du flux statorique.....	48
Figure III.6 : Les composantes du courant statoriques.....	48
Figure III.7 : Courants statorique avec zoom.....	48
Figure III.8: La puissance active et réactive statorique.....	49
Figure III.9 : Le couple électromagnétique et les courants rotoriques.....	49
Figure III.10 :courant direct et quadrature rotoriques.....	49
Figure III.11: Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur.....	51

Figure III.12 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	52
Figure III.13 : Les composantes du flux statorique.....	54
Figure III.14 : Les composantes du courant statorique.....	54
Figure III.15: La puissance active et réactive statorique.....	55
Figure III.16: Le couple électromagnétique et les courants rotoriques.....	55
Figure III.17: Les courants rotoriques avec zoom.....	55
Figure III.18: courant direct et quadrature rotoriques.....	56

Liste de Symboles

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
IGBT	InsulatedGateBipolar Transistor.
MAS	Machine Asynchrone.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
DFIM	Doubly fed Induction Machine
$P_{aér}$	la puissance aérodynamique.
ρ	Représente la densité de l'air.
S	Balayer de la turbine.
V	Vitesse de vent.
RT	Le rayon des pales de la turbine.
$C_p(\lambda, \beta)$	Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.
Ω_T, Ω_g	La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur.
λ	Rapport de vitesse (rad).
B	L'angle de calage des pales.
C_T, C_g	Le couple de la turbine respectivement du électromagnétique.
G	Le rapport du multiplicateur de vitesse.
J_T, J_g	L'inertie de la turbine et celle du générateur.
J	L'inertie totale de l'éolienne.
f_T, f_g	Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.
F	Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse spécifique optimale de la turbine.
C_{Topt}	Le couple optimal de la turbine.
C_{Gopt}	Le couple optimal du générateur.
C_{Poppt}	Le rendement aérodynamique optimal de la turbine.
β_{opt}	L'angle de calage des pales.
C_{pmax}	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance.
L_{SS}, L_{rr}	sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
M_{max}	Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

M_s, M_r	les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.
$[M_{sr}]$	la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor.
C_{em}	Le couple électromagnétique de la machine.
C_r	Le couple résistant.
I_s, I_r	Les courants de phase statorique et rotorique respectivement.
θ_s, θ_r	Angle électrique statorique, rotorique.
φ_s, φ_r	Respectivement flux statorique et rotorique.
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	les flux statoriques directs et en quadrature du système.
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	les flux rotoriques directs et en quadrature du système.
I_{sd}, I_{sq}	Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
I_{rd}, I_{rq}	Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
ω_s, ω_r	Pulsation statorique et rotorique.
V_{sd}, V_{sq}	les tensions statoriques directes et en quadrature du système diphasé.
V_{rd}, V_{rq}	les tensions rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.
a_s, b_s, c_s	Les trois phases du stator.
a_r, b_r, c_r	Les trois phases du rotor.
P_s, Q_s	Puissance active et réactive statorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
G	Le glissement.
P_T	La puissance convertie par la turbine.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Les trois tensions du rotor.
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Les trois tensions du stator.
P_{ref}, Q_{ref}	Puissance active et réactive Référence.
U_{ref}	L'amplitude de la tension de référence.
U_p	La porteuse.
$\Omega_{méc}$	La vitesse Mécanique.

Introduction Générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter, car l'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité utilisent des sources fossiles (charbon, pétrole, gaz, naturelle..), et par la suite avec le développement, les sources fissiles (l'énergie nucléaire) telles que l'uranium, les hydrocarbures et l'eau, les centrales thermiques sont responsables de rejets des gaz atmosphériques. L'énergie nucléaire présente un avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution, mais sans oublié le risque d'accident nucléaire, et qui augment au fil des années comme le stockage de déchets nucléaire non réitérable. Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [1].

Tous ces inconvénients ont poussé les chercheurs de réduire leur exploitation pour pallier à leurs problèmes, en faisant appel aux énergies dites «**renouvelables**» (éolienne et solaire). Ces dernières s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂. L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne, c'est le cas de L'Allemagne, L'Espagne et le Danemark, ...etc. [2].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le présent mémoire que nous vous présente décrit une étude sur l'utilisation des machines asynchrones dans un système éolien. Dans le premier chapitre nous présenterons l'état de l'art de l'énergie éolienne[3]. Nous donnerons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, Ensuite la modélisation et l'optimisation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne pour le captage du maximum de puissance possible,

Le deuxième chapitre sera concerné à la machine asynchrone à double alimentation on va présenter en premier temps la topologie et les différentes configurations de cette machine en fonctionnement moteur et génératrice on précisant sa particularité par rapport aux machines classiques, ensuite on va faire la modélisation de la MADA. Enfin la simulation du fonctionnement de la machine en mode moteur et génératrice.

Le troisième chapitre sera concerné à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe et variable (avec turbine). Nous présenterons dans le premier lieu le stator de la MADA est alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé commandé par Modulation de la Largeur d'Impulsion MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans le seconde lieu nous présentons le système complet constitué de la machine asynchrone double alimentation, la turbine éolienne et le convertisseur. Les résultats de simulation sous Matlab-Simulink seront présentés.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Modélisation et Stratégies de
commande des Turbines a Vitesse
Variable**

I.1 Introduction

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne qui est actuellement largement utilisée.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques c.-à-d. l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique (génératrice) permet de produire un courant électrique [4].

Une grande partie des éoliennes utilisent les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice qui peut fonctionner à vitesse variable. Elle permet, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent aujourd'hui, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes qui suivent.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

I.2. Historique de l'éolienne :

L'énergie éolienne a été déjà utilisée par Hammourabi (fondateur de Babylone) afin d'irriguer la Mésopotamie vers l'an 2000 avant J.-C. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les chinois ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau. Le début du Moyen Age a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés au Pays-Bas ainsi que la moudre de grains.

La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIXème siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour améliorer notamment la technologie des aérogénérateurs.

L'industrie espagnole de l'énergie éolienne a remporté des victoires remarquables tant dans la conception que dans la fabrication des aérogénérateurs. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985 à 16 813 MW en 2007 à 25 170 MW en 2008 et en 2009 35.159 MW qui occupe la première place en production d'énergie éolienne. En 1991, l'Espagne avait seulement 7 MW de puissance installée; à la fin de 2008, elle cumulait 16 689 MW de puissance installée et se hissait au troisième rang et au quatrième rang en 2009 avec 19.149 de tous les pays du monde en matière de production d'énergie éolienne [5].

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnent à vitesse fixe et sont directement reliées au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'interface d'électronique entre la génératrice et le réseau[6].

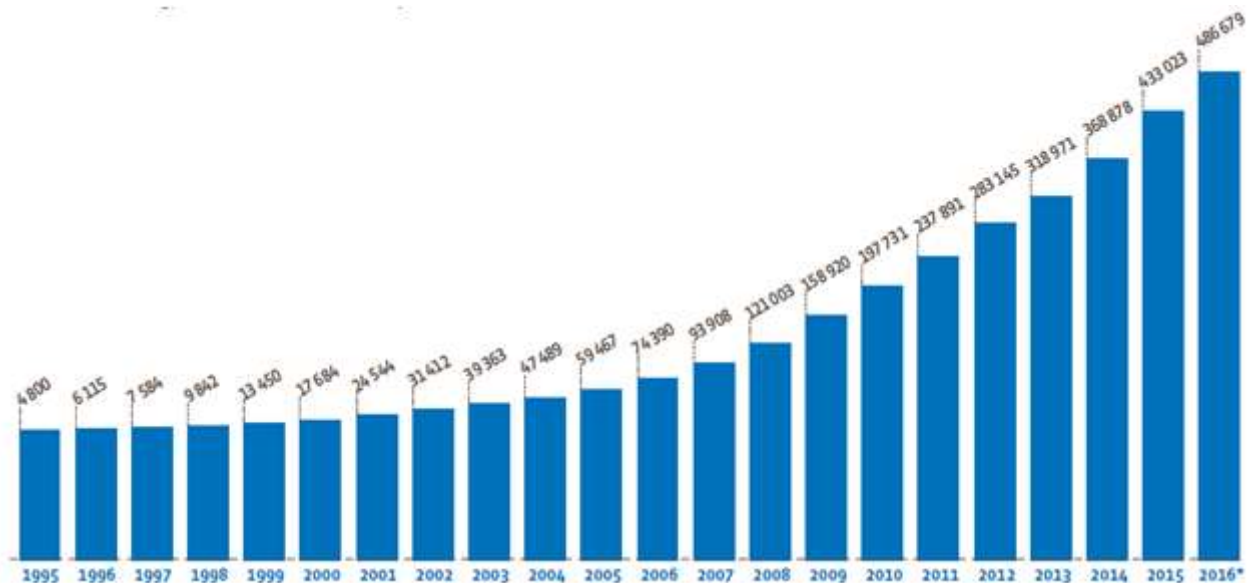


Figure I.1 : Graphique de la capacité totale de puissance fournie par l'éolienne dans le monde (MW).

I.3. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[7].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusé, 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 du vent 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 mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes 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 [8].

I.4. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [8].

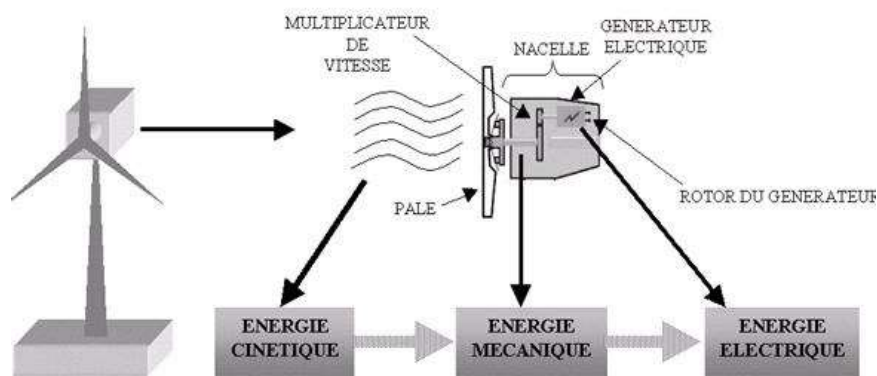


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent[7].

Cette conversion se fait en deux étapes[9,7]:

- Au niveau de **la turbine**, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel multiplicateur de vitesse.
- Au niveau de **la génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaine de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques électriques ou d'automatique .

I.5. Types des turbines éoliennes :

Il existe deux types d'éoliennes modernes ; celle a axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion, et éoliennes à axe vertical dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers. Dans les deux cas, les éoliennes capturent l'énergie du vent et la transforment en énergie électrique (aérogénérateur) ou mécanique (éolienne de pompage, de sciage, etc.), ils sont illustrés sur la (Fig. I.3). On peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ .

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation [11,10].

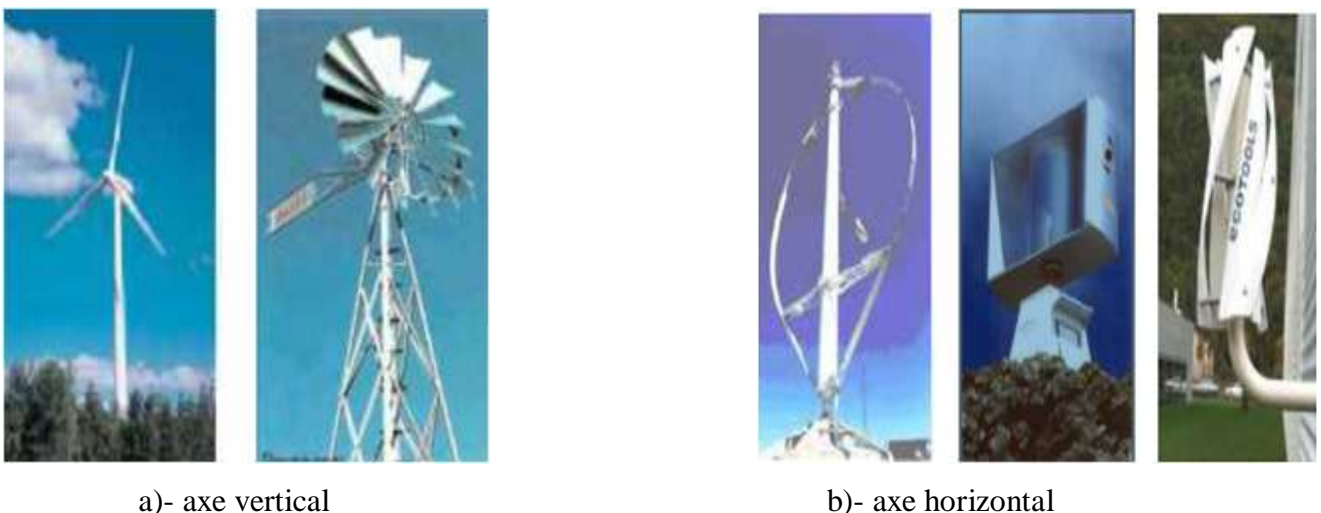


Figure. I.3Types d'éolienne

I .5.1. Eoliennes à axe vertical :

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savons et le rotor de Darrieus , A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins rependue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [11,1].

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elles fonctionnent avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I .5.2) Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [9,11].

Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries. Dans le reste de notre étude, nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch).

I.6. Hypothèses simplificatrices :

Les éoliennes sont conçues pour capturer l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Une analogie peut être faite entre les éoliennes et des unités de production classiques pour l'exploitation de l'énergie cinétique de la vapeur. À partir d'un point de vue de modélisation, une éolienne à vitesse fixe se compose de ce qui suit:

- Rotor de la turbine et assemblage des pales
- Arbre et l'unité de boîte de vitesses (rotor et variateur de vitesse)
- Générateur à induction
- Système de contrôle

L'interaction entre chacun des éléments détermine la quantité d'énergie cinétique est extrait de l'éolienne. Modélisation des sous-systèmes électriques est assez simple, comme un logiciel de modélisation de système d'alimentation comprend généralement un modèle de machine à induction intégrée. Cependant, la modélisation de l'aérodynamique et mécanique du train d'entraînement est plus difficile.

Ces composants sont modélisés fondées sur le différentiel et équations algébriques qui décrivent leur fonctionnement [12].

I.7. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après[13].

I.7.1. Les avantages :

- ❖ L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.

- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- ❖ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ❖ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ❖ L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.
- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer.
- ❖ L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- ❖ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- ❖ Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- ❖ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.7.2. Les inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- ❖ L'impact visuel. Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- ❖ Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- ❖ L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- ❖ la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- ❖ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

I .8. Principe de fonctionnement de la turbine:

La turbine est un dispositif qui permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par[14]:

$$T = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S v^3 \quad (\text{I.1})$$

Ω Est la vitesse de la turbine, ρ ($\rho = 1.225 \text{ kg / m}^3$) la densité de l'air, S l'aire balayée par la turbine et v la vitesse de vent, le coefficient C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend du dimensionnement des pales, du coefficient de vitesse λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Alors pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad (\text{I.2})$$

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne [15].

I .9. Modélisation du système éolienne:

I .9.1. Modélisation du vent :

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et de sa direction, sur une grande période du temps [16].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour [13] :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines

I .9.2. Modélisation de la turbine :

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure (I.3)).

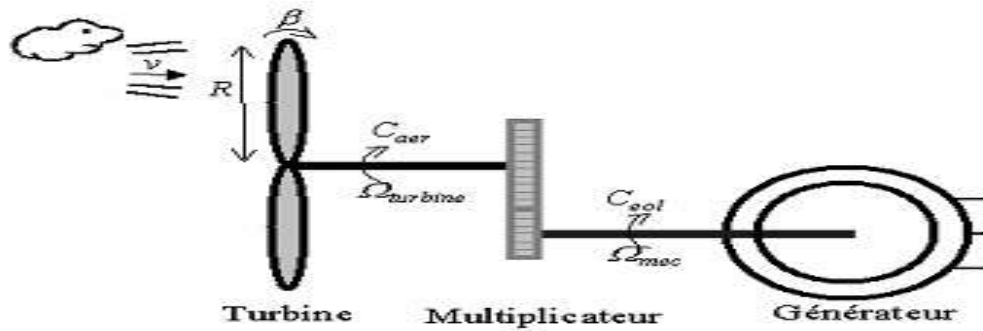


Figure I.4 : Schéma de la turbine éolienne[8].

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante[17] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (I.3)$$

Avec :

- ρ : densité de l'air (approxim. $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C)
- s : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- v : vitesse du vent.

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

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (I.4)$$

$$s = \pi \cdot R^2 \quad (I.5)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine.

La figure (I.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pales β .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (I.6)$$

$\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

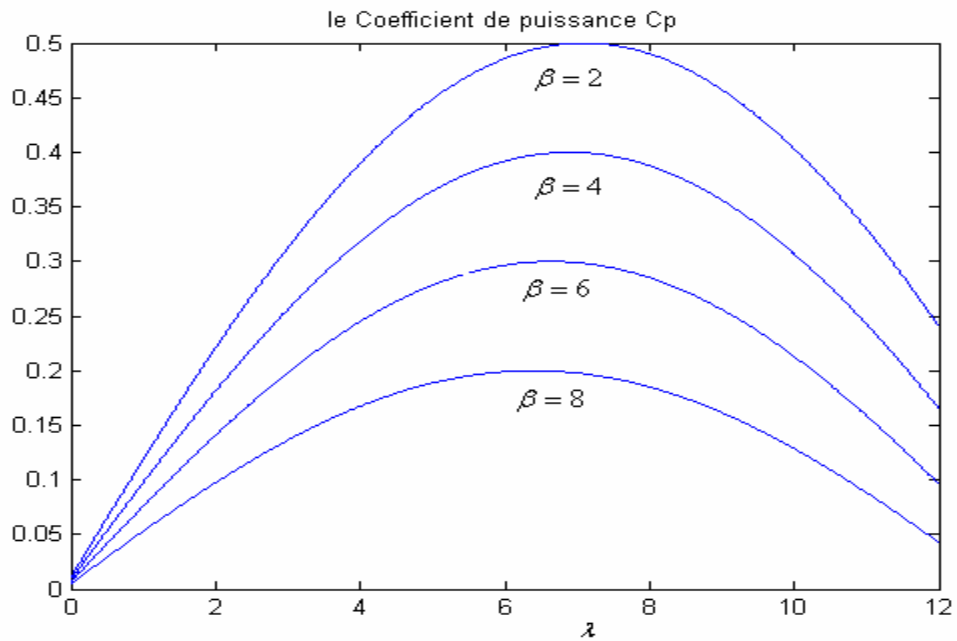


Figure I.5: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine[8].

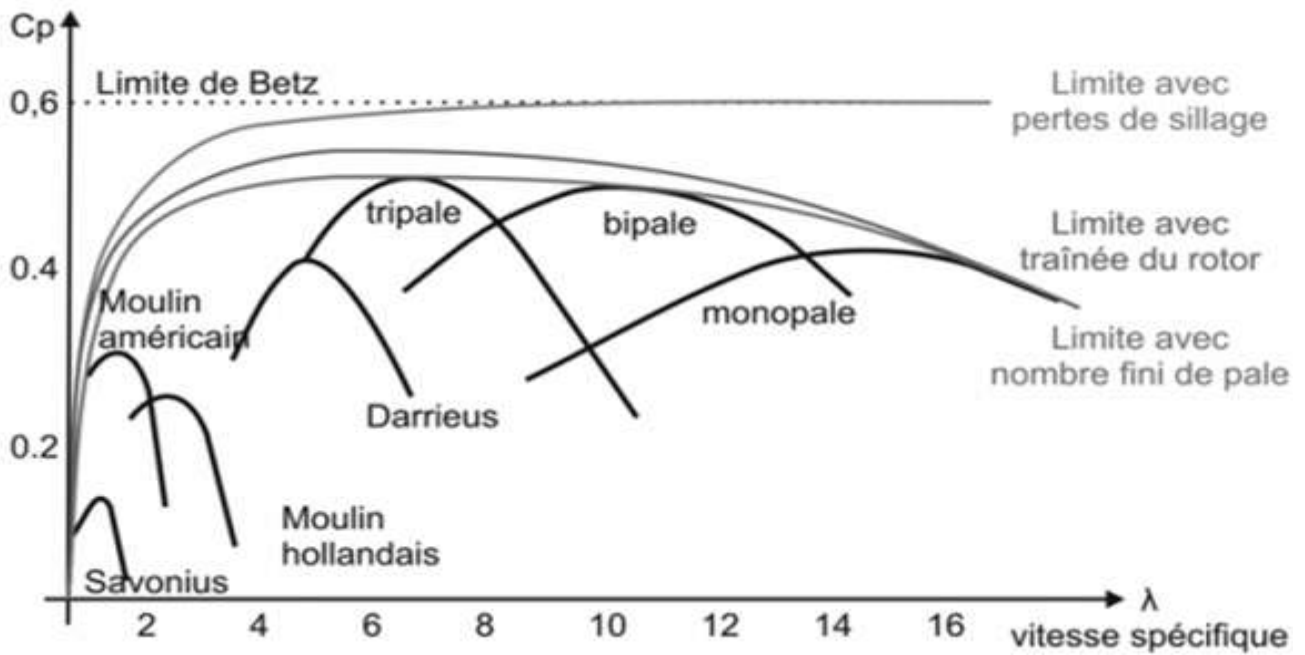


Figure I.6: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [18]:

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2). \tag{I.7}$$

β : L'angle de l'orientation des pales.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \tag{I.8}$$

I.9.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes[15]:

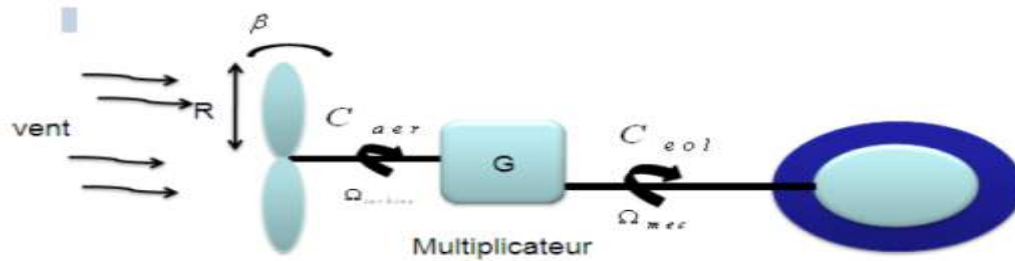


Figure I.7: schéma de la turbine éolienne.

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (I.9)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.10)$$

$$\Omega_{mec} = \Omega_g \cdot \Omega_{turbine} \cdot G \quad (I.11)$$

I.9.4. Equation dynamique de l'arbre :

Le modèle mécanique est illustré par :

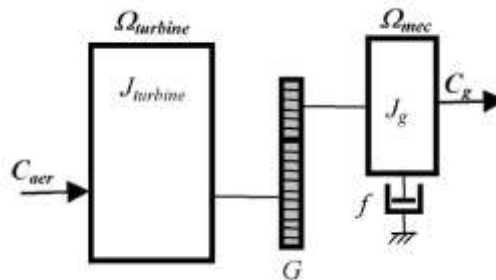


Figure I.8: Modèle mécanique simplifié Du multiplicateur[13].

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice[8].

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (I.12)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{I.13}$$

J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{I.14}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{I.15}$$

On pose :

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \tag{I.16}$$

En remplaçant les équations (I.12), (I.13), (I.15) et (I.16) dans l'équation (I.14):

$$C_{mec} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g \tag{I.17}$$

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g \tag{I.18}$$

C_T, C_{mec}, C_g Sont respectivement : le couple de la turbine, le couple mécanique issu du multiplicateur et le couple électromagnétique généré par la génératrice;

J_T, J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur;

f_T, f_g : les coefficients des frottements visqueux respectivement de la turbine et de la génératrice;

G : le rapport du multiplicateur de vitesse;

Ω_g : la vitesse de rotation de la génératrice (axe rapide).

A partir de ce qui précède, on aboutit au schéma bloc de notre aérogénérateur :

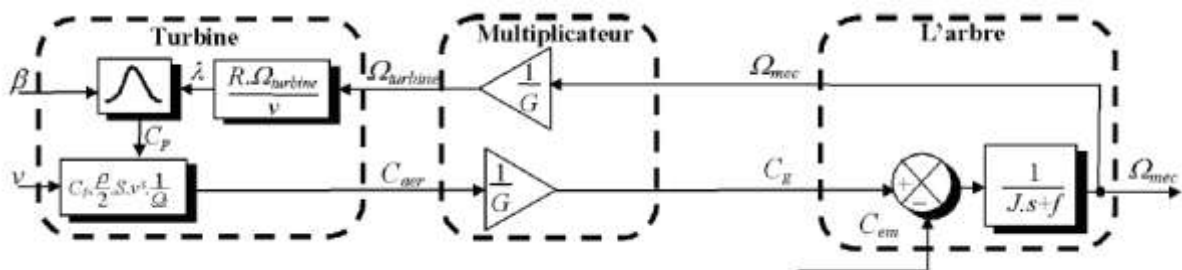


Figure I.9 : Modèle de schéma bloc de l' aérogénérateur [13].

I.10. Stratégies de commande:

Avant d'entamer l'objet de notre étude qui est la simulation des stratégies de commande adoptée pour chacune des zones de fonctionnement de la turbine, selon la force du vent, nous allons exposer la théorie qui nous a permis de développer les schémas de simulation pour ces différentes zones de fonctionnement. En effet; selon la vitesse du vent, la caractéristique de fonctionnement de la turbine d'une éolienne peut être divisée en quatre zones différentes[13].

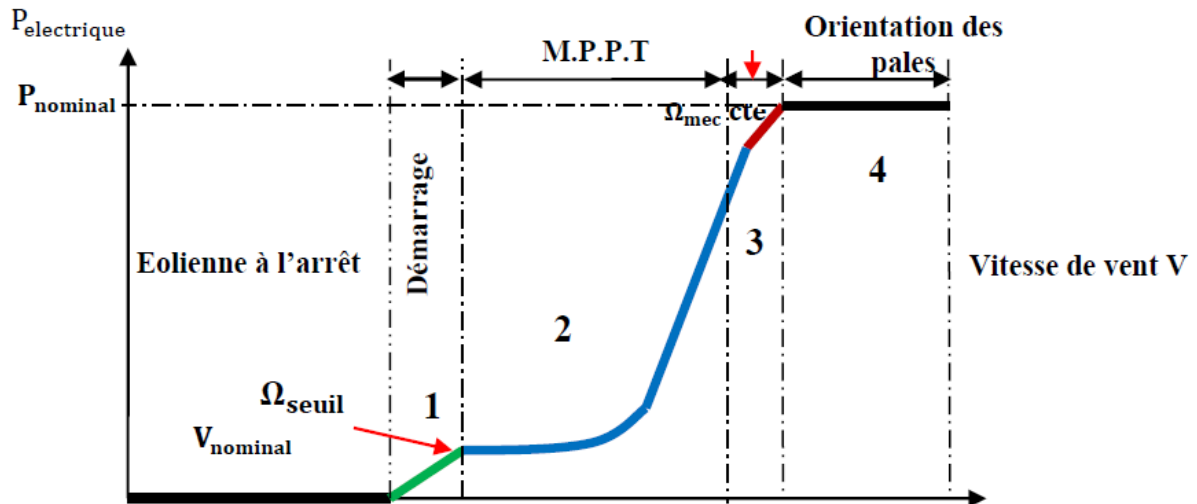


Figure I.10 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

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

Zone 3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale.

Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale, une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (Angle de calage), c'est le «**Pitch Control**».

- Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

I.11. MPPT (Maximum Power Point Tracking):

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique pour une source variante (par exemple la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou générateurs éoliens. Le MPPT a été créé pour avoir la meilleure connexion possible entre la source non linéaire et le réseau et ainsi toujours extraire le maximum de puissance [19].

I.12. Commande indirecte de la vitesse:

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons : L'anémomètre est située derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent. Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important, une variation sensible du vent apparait selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [13] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = (C_g - C_{em} - C_{vis}) \quad (I.19)$$

On a:

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (I.20)$$

$C_{T_{opt}}$: Le couple optimal.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Cette équation écrite est sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G .

$$C_{G_{opt}} = \frac{1}{2G} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (I.21)$$

Si le couple électromagnétique C_G est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal.

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, La vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \quad (I.22)$$

En remplaçant la vitesse du vent dans l'équation (I.20), le couple optimal devient :

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{P_{opt}}^3} \cdot \Omega_T^2 \quad (I.23)$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor:

$$C_{T_{opt}} = K_{opt} \cdot \Omega_T^2 \quad (I.24)$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_P(\lambda_{opt})}{\lambda_{P_{opt}}^3} \quad (I.25)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme.

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (I.26)$$

En remplaçant (I.24) dans l'équation(I.26), l'équation mécanique devient :

$$\frac{k_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \quad (I.27)$$

Avec : $\Omega_g = G \cdot \Omega_T$

D'où

$$C_{G_{opt}} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g \quad (I.28)$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimal de l'éolienne . Le schéma bloc de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous:

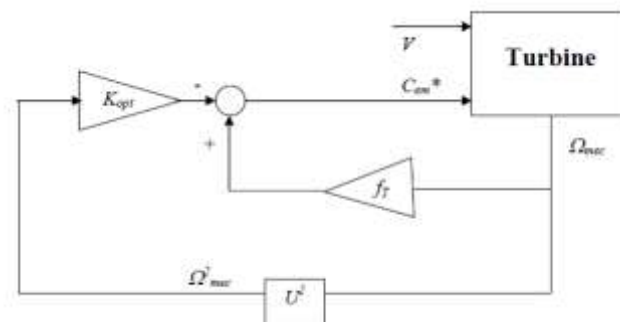


Figure I.11 : Commande indirecte de vitesse [20].

I.13. Résultats de simulation :

I.13.1 Schéma de simulation :

Les équations (I.4), (I.6), (I.7), (I.8), (I.9), (I.10) et (I.13) permettent d'établir un schéma bloc de la turbine (figure I.12) :

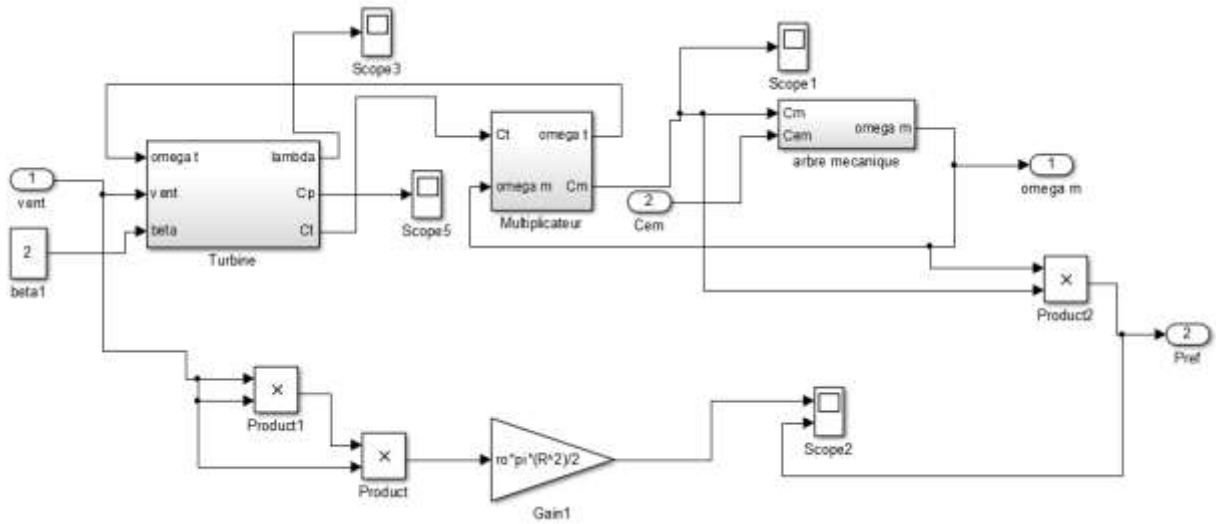


Figure I.12: schéma bloc de la turbine éolienne.

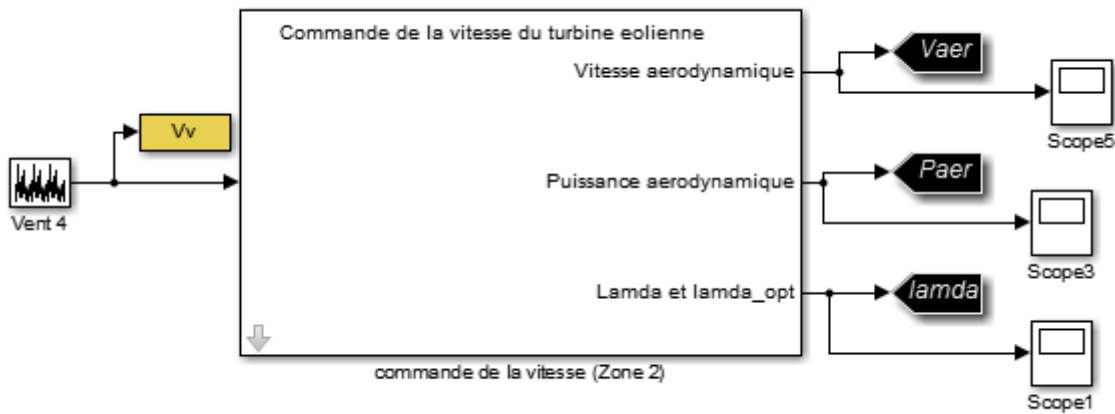


Figure I.13 : schéma bloc de commande MPPT de la turbine.

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne.

Sur la figure (I.14), le courbe est caractérisée par le point optimal ($Cp_{max} = 0.50, \beta = 2^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance (Cp_{max}).

La figure (I.16) présente la vitesse spécifique λ et le profil du vent appliqué à la turbine éolienne la valeur du vent est variée de 6 à 9.5 m/s.

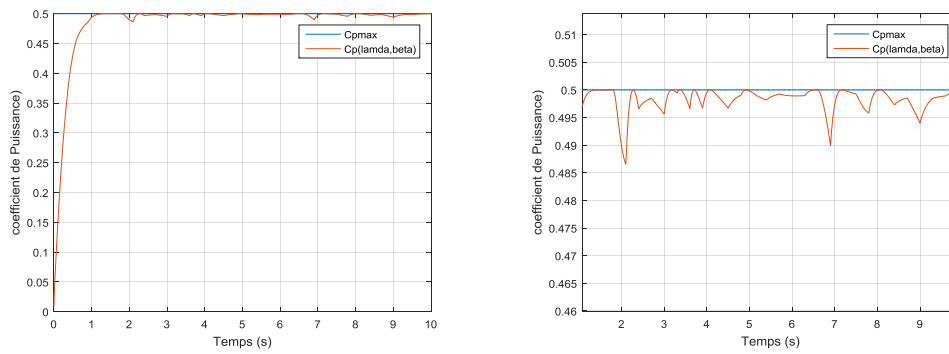


Figure I.14: coefficient de puissance de la turbine

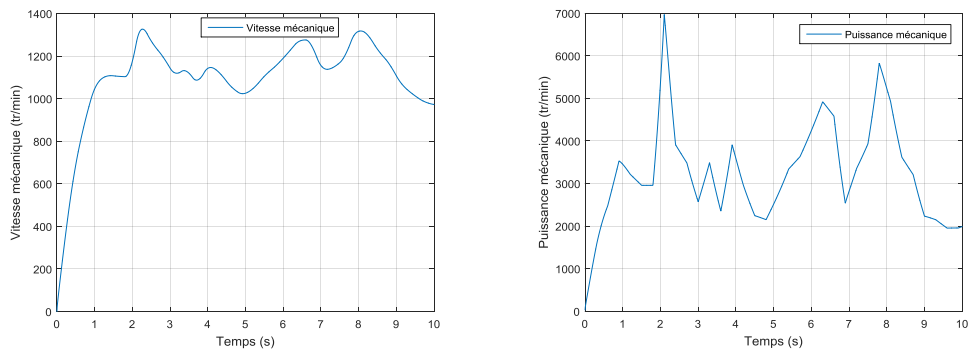


Figure I.15: Vitesse mécanique et la puissance mécanique produite par la turbine

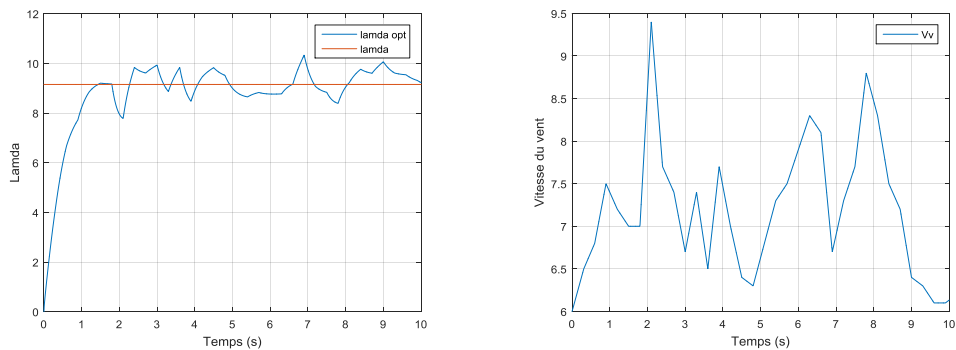


Figure I.16: Vitesse spécifique λ et le profil du vent appliqué à la turbine

I.13.2. Interprétation des résultats :

Les résultats de simulations nous montrent que la variation de la vitesse mécanique est adaptée à celle du vent et la vitesse spécifique λ suit sa référence optimale, le coefficient de puissance suit également le coefficient de puissance maximal et il ne le dépasse pas.

Donc ces résultats nous ont permet de vérifier notre commande.

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, pour la première partie, nous avons présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, et son historique; puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes, et ces composants avec leurs définitions.

Dans la deuxième partie nous avons ce extraite du vent en fonction de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent. Nous avons donné aussi le principe des techniques de réglage de puissance 'MPPT' afin de maximiser la puissance nominale disponible sur l'arbre du générateur.

Dans le deuxième chapitre, l'étude va traiter la modélisation des machines asynchrone double alimentée et les différents convertisseurs électroniques assurant la commande de la MADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent.

Chapitre II

Modélisation de La Génératrice
Asynchrone a Double Alimentation

II .1. Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes. Le travail présente des outils numériques pour dériver les lois de commande permettant à la MADA de fonctionner sur ses points de fonctionnement tout en optimisant ses performances. Ces lois peuvent être efficacement utilisées dans un environnement de conception globale et optimale de la chaîne de conversion électromécanique utilisant la MADA [21].

II .2. Composition de la MADA

La MADA est une génératrice permettant le fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne en ajustant la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. La MADA est composée d'une machine asynchrone, de deux convertisseurs de puissance et en général d'un transformateur pour adapter la tension au réseau. On observe sur la Figure (II.1) que le rotor est branché au redresseur alors que le stator est directement branché au réseau. Les grandeurs alternatives au stator (courants et tensions) ont la même fréquence que celle du réseau.

C'est pourquoi elles n'ont pas besoin de passer par des convertisseurs de puissance pour transférer la puissance électrique statorique au réseau. En revanche, les grandeurs alternatives à la sortie du rotor n'ont pas la même fréquence que les grandeurs alternatives du réseau. Elles dépendent de la vitesse du rotor et donc de la vitesse du vent. On utilise alors des convertisseurs de puissance pour adapter leur fréquence à celle du réseau (Tremblay, 2009). On utilise un convertisseur statique back-to-back. Il est composé d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur. La MADA pouvant fonctionner en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone, la chaîne de conversion électronique doit être bidirectionnelle [4].

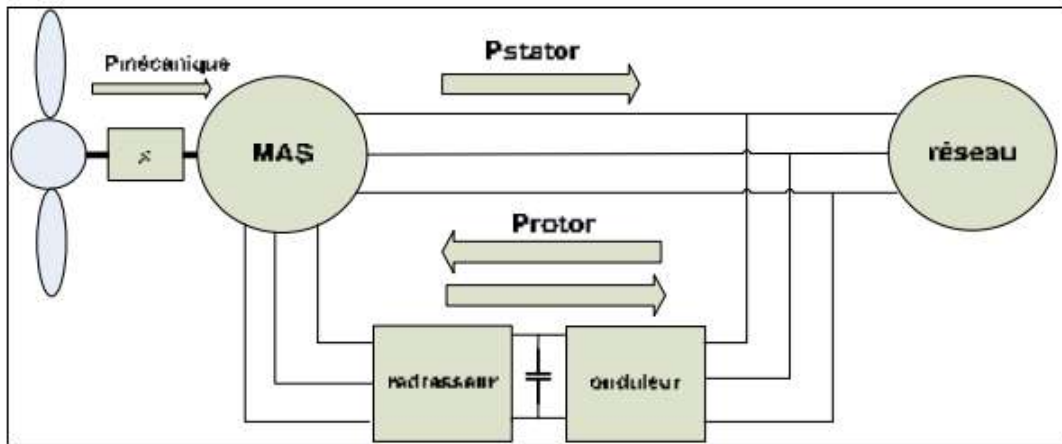


Figure II. 1: Schéma d'un système de conversion d'énergie éolienne.

La majeure partie de la puissance transmise de l'éolienne au réseau passe par le stator. La MADA fonctionne à vitesse variable, si la variation de la vitesse ne dépasse pas 30% au-dessus ou en dessous de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de fournir une puissance allant de 0.7 à 1.3 fois la puissance nominale de cette machine. La quantité de puissance électrique fournie ou consommée par le rotor correspond à $\pm 30\%$ de la puissance nominale de la machine. Les convertisseurs de puissances (redresseur et onduleur) ne sont donc traversés que par 30% de la puissance nominale de la machine (e-LEE, 2011). La MADA utilise donc des convertisseurs sous dimensionnés et donc moins coûteux. Cette technologie est mûre, solide et très fiable. On peut l'utiliser pour des applications à grande puissance et à vitesse variable. Elle possède actuellement un meilleur rendement que les nouvelles machines synchrones à aimants permanents [19].

II .3. Présentation de la machine à double alimentation

La première apparition de cette machine asynchrone à double alimentation "doubly fed induction machine (DFIM) ", date de l'année 1899; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation.

La MADA est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principale surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et où le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou les deux à la fois [22].

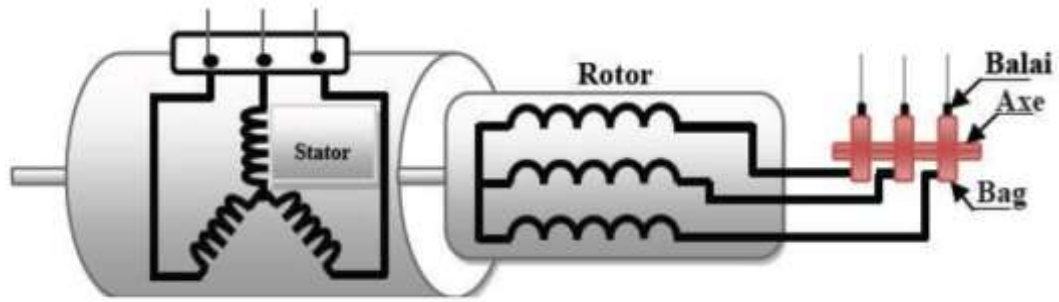


Figure II. 2 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.4. Principe de fonctionnement de la MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g$$

Où : g est le glissement ω_{gl} et est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_{gl} = 2 \cdot \pi \cdot f_r$; c'est-à-dire [23]:

$$f_r = g \cdot f_s$$

II.5. Mode de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur ou générateur [24].

II.5.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchronisme

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.

- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissant est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

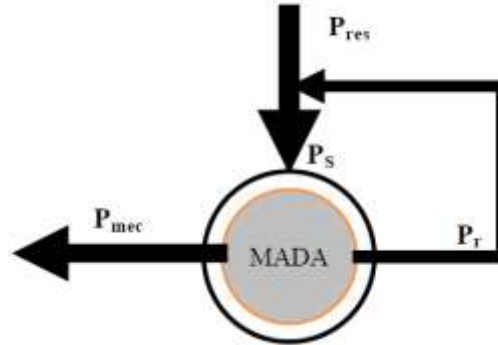


Figure II. 3 : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

II.5.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- La puissance fournie par le réseau va à rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement .

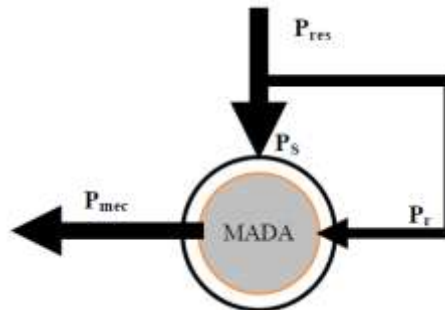


Figure II. 4 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

II.5.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement .

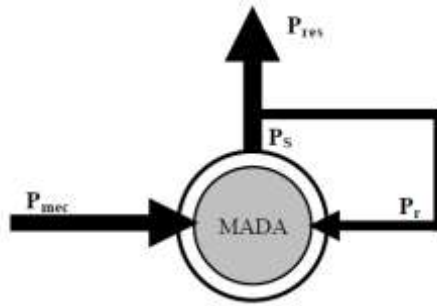


Figure II. 5 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

II.5.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [7].

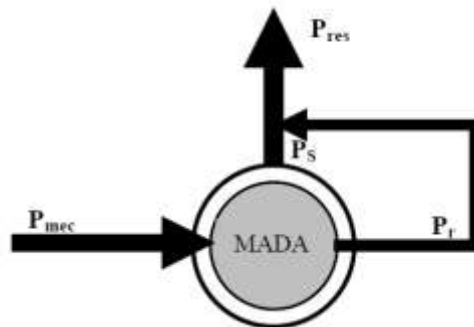


Figure II. 6) : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

II.6. Différentes topologies de la MADA

A travers nos lectures, nous avons distingué deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un générateur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable utilisant une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce dernier est appelé communément machine asynchrone à double alimentation (MADA). Toutefois il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement. Pour cela notre travail s'est restreint aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu

distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant tous une MADA pour la conversion électromécanique [11].

II.7. Domaines d'application de la MADA

La MADA offre de nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone classique et synchrone. Surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice.

De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau[25].

II.8. 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[26].

II.9. Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

II.9.1. Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible, ce qui offre une grande flexibilité et précision au contrôle de flux et du couple électromagnétique;
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale;

- La possibilité de reconfiguration grâce à sa double alimentation, ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application.
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance;
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des Enroulements rotoriques.

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

II.9.2. Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- le cout total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA[27].

II.10. Modélisation de la MADA

II.10.1. Représentation de la machine dans l'espace électrique

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.7) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (OAR) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (OAS)[28].

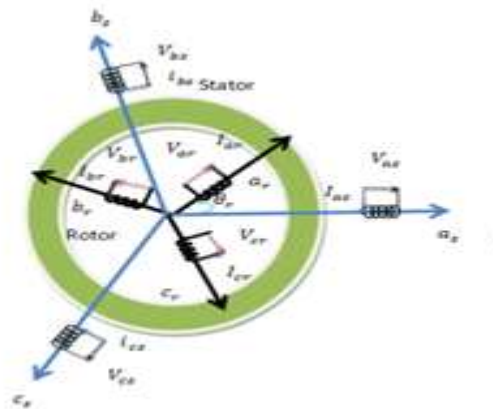


Figure II.7 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation dans l'espace électrique.

II.10.2. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices[29].

- Entrefer constant, l'effet des encoches négligeable.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- La répartition de l'induction, le long de l'entrefer, est sinusoïdale.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

II.10.3. Modèle et Identification des paramètres de la machine

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. A cet effet, lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé (voir figure (II.8)). La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après, ne sont pas nulles[8].

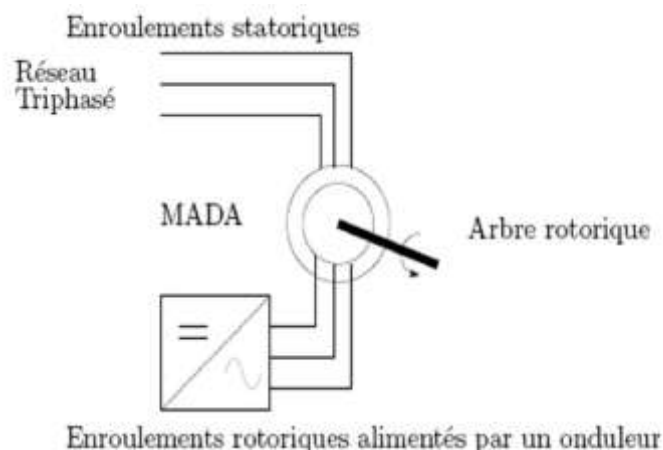


Figure II.8 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

II.10.4. Modèle triphasé de la MADA

II.10.4.1. Equations électriques :

Les équations électriques en notation matricielle sont :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

II.10.4.2. Equations des flux

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants.

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit:

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

L_s, L_r : Inductances de fuites statorique et rotorique.

M_s, M_r : Inductances mutuel.

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta e) & \cos(\theta e + 2\pi/3) & \cos(\theta e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta e - 2\pi/3) & \cos(\theta e) & \cos(\theta e + 2\pi/3) \\ \cos(\theta e + 2\pi/3) & \cos(\theta e - 2\pi/3) & \cos(\theta e) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant (II.3) dans (II.1) et (II.4) dans (II.2), on obtient le système suivant:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{II.7})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}] \cdot [I_s]) \quad (\text{II.8})$$

II.10.4.3. L'équation mécanique de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante[3]:

$$C_{em} = p[I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{II.9})$$

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

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \omega + J \frac{d}{dt} \omega \quad (\text{II.10})$$

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

II.10.5. Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park[8].

II.10.6. Application de la transformation de Park à la MADA

La machine asynchrone à double alimentation 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 biphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé

S'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature.

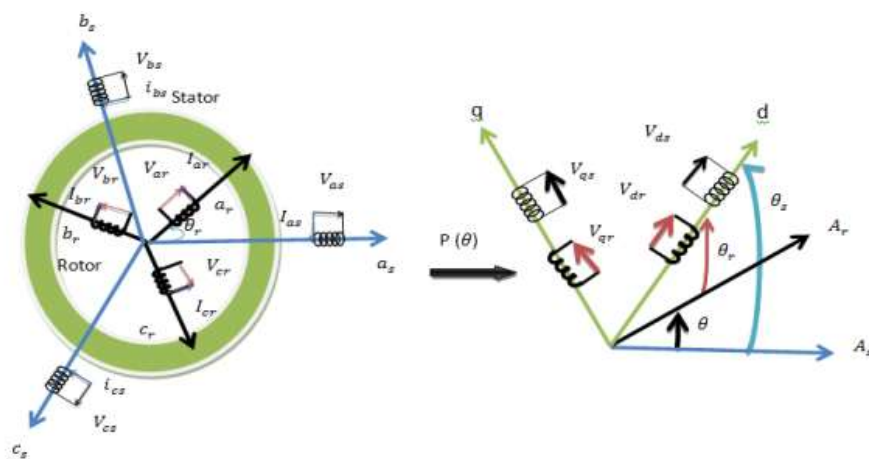


Figure II.9 : Le principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

Représentation de la MADA dans le repère de Park :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la Transformation :

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} = P(\theta) \begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- 0 : indice de l'axe homopolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $P = (\theta)^{-1}$:

$$(P(\theta))^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées:

$$\begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{pmatrix} = (P(\theta))^{-1} \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Les tensions rotorique V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} et les tensions statorique V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} sont transformées en composantes directes et en quadratures $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$.

Les tensions de statoriques et rotoriques sont :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\ V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

$$V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot \omega_r$$

$$V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot \omega_r$$

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} : sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques et rotoriques;

R_r, R_s : Sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques;

ω_s, ω_r : sont les pulsations statorique et rotorique;

$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}$, Sont les composantes directs et en quadratures des flux statoriques et rotoriques:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sd} i_{rd} - \Phi_{sq} i_{rq}) \quad (\text{II.18})$$

II.11. Mise sous forme d'équation d'état

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit :

$$[\dot{X}] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U]$$

$$\text{Avec : } [X] = [\varphi_{sd} \varphi_{sq} i_{rd} i_{rq}]^t; \quad [U] = [v_{sd} v_{sq} v_{rd} v_{rq}]^t;$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & W_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -W_s & -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(W_s - W_r) & -\delta & W_r \\ \beta(W_s - W_r) & \alpha & -W_r & -\delta \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

α, β et δ sont des constantes définies comme suit:

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r}; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r}; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

σ : paramètre de la machine.

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice $[A]$ comme suit :

$$[A] = [A_1] + \omega_s \cdot [A_2] + \omega_r \cdot [A_3]$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

II.12. Résultats de simulation (MADA)

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

Les figures ci dessous sont obtenues pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V_s = \sqrt{2} \cdot 220 V$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $V_r = 12V$.

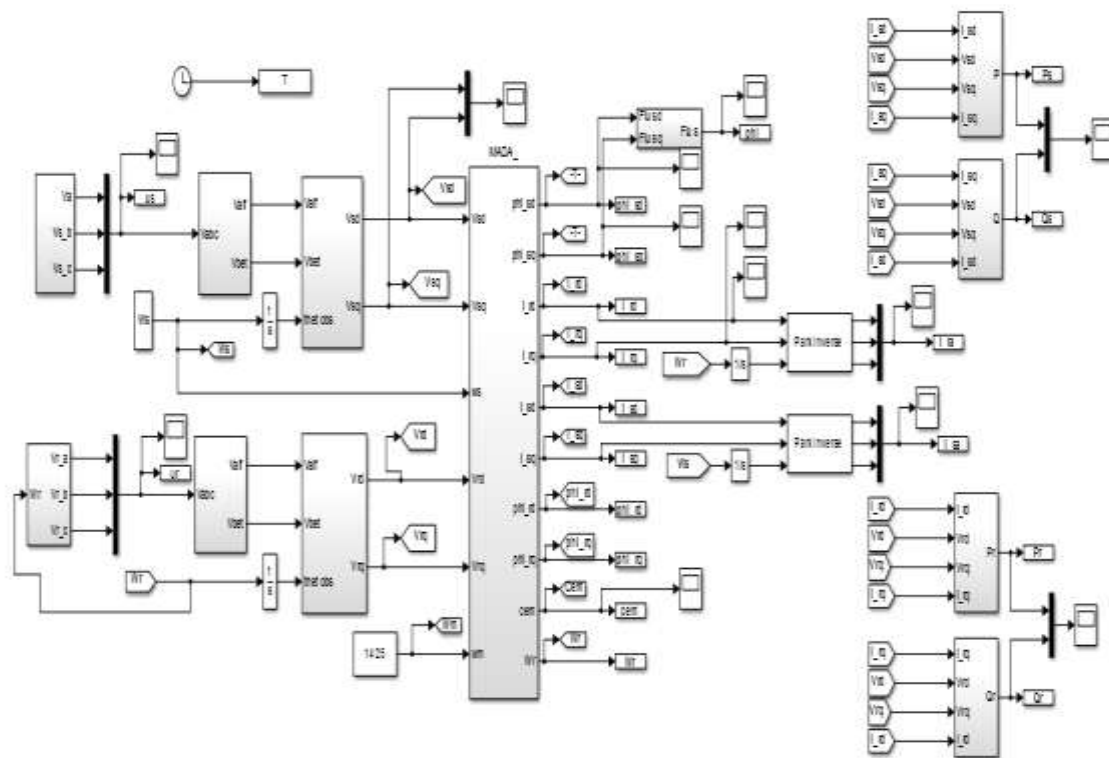


Figure II.10: schéma bloc des sources des tensions (Rotorique et Statorique)

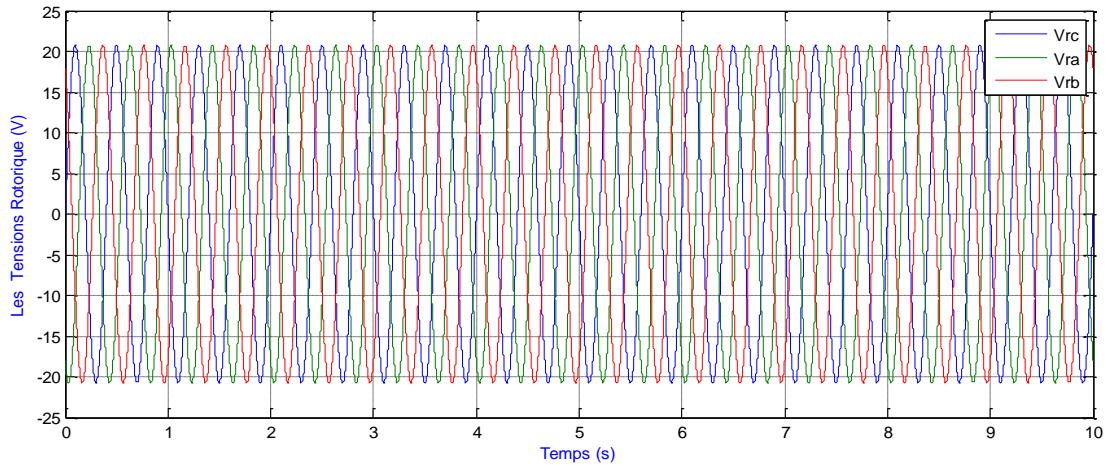


Figure II-11: Les tensions d'alimentations au rotor.

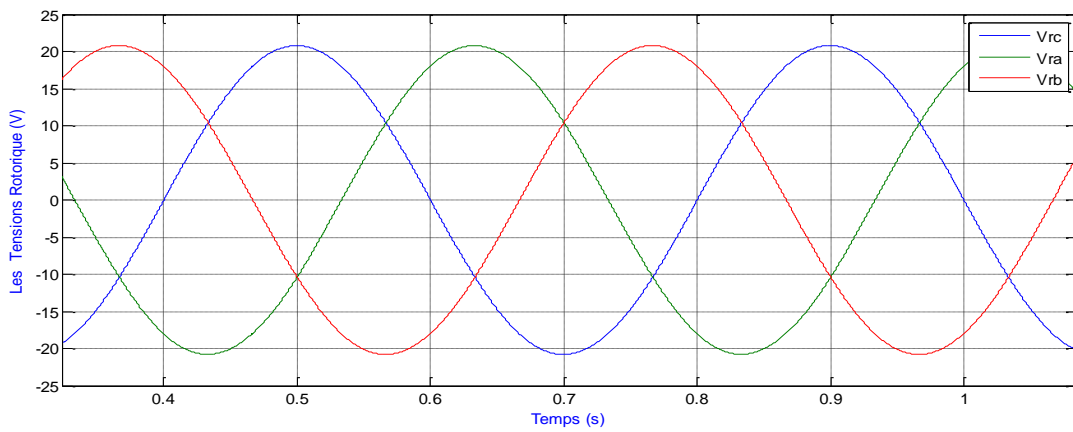


Figure II-12: les tensions d'alimentations au rotor (Zoom).

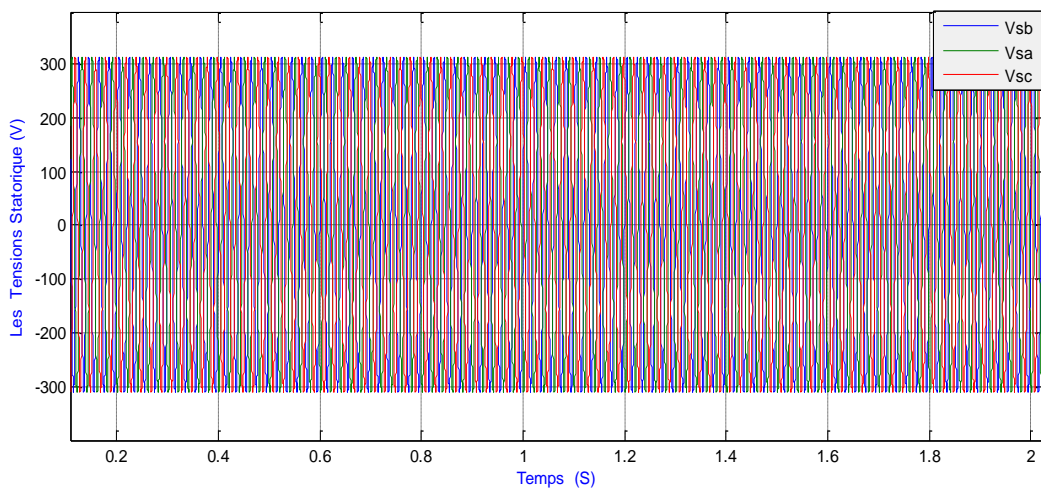


Figure II-13 : Les tensions d'alimentations au stator.

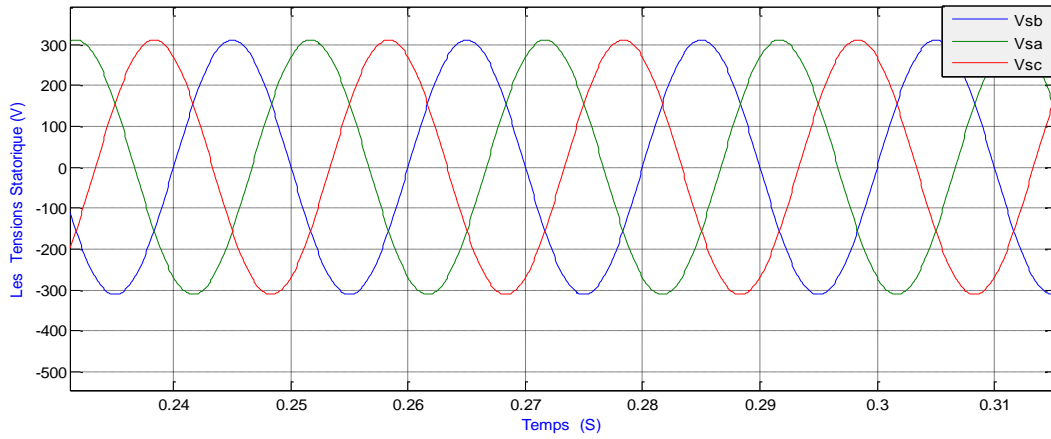


Figure II-14 : Les tensions d'alimentations au stator (Zoom).

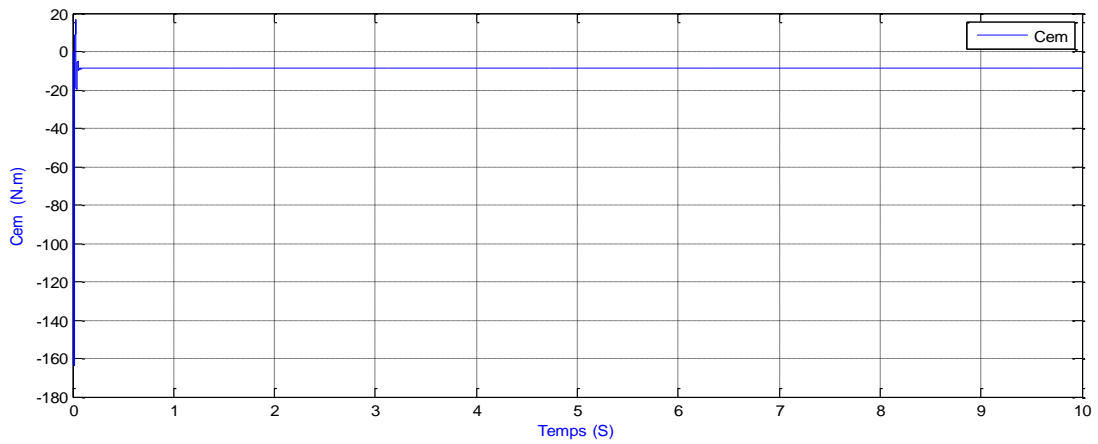


Figure II-15: Le couple électromagnétique.

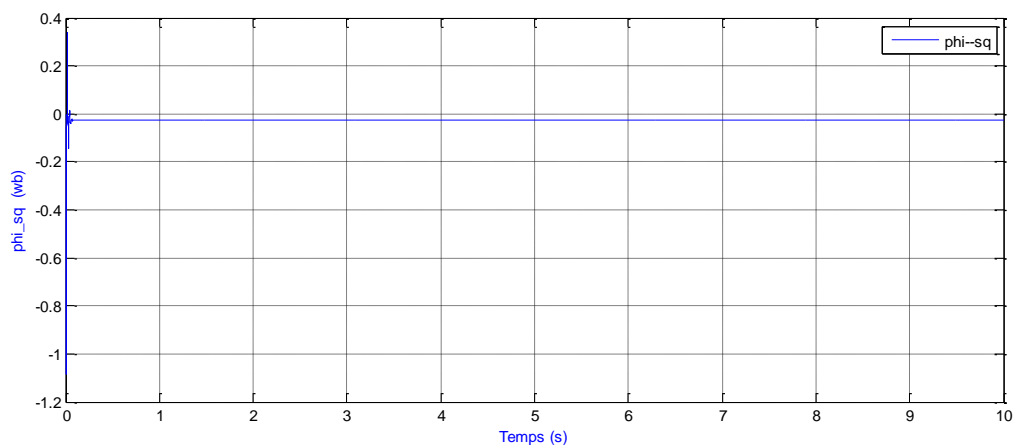


Figure II-16 :Fluxstatorique quadrature (wb).

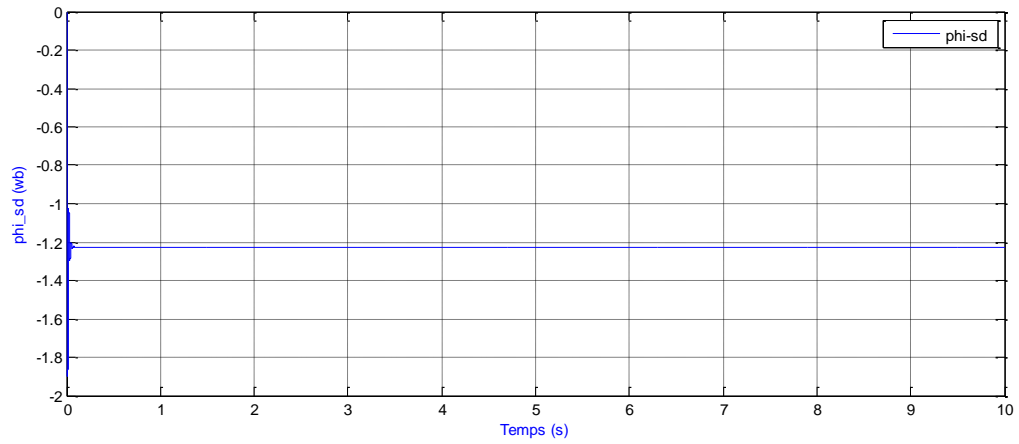


Figure II-17 :Flux statorique directs (wb).

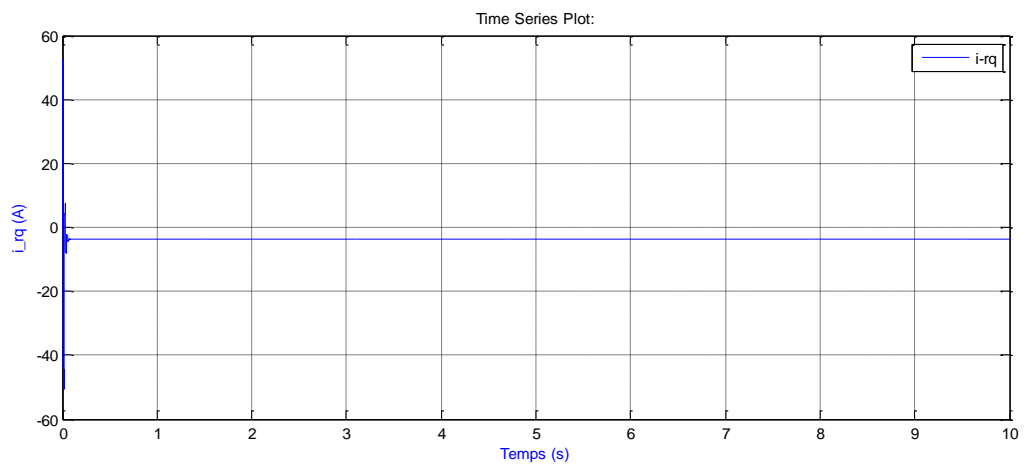


Figure II-18 :courant rotorique quadrature (A).

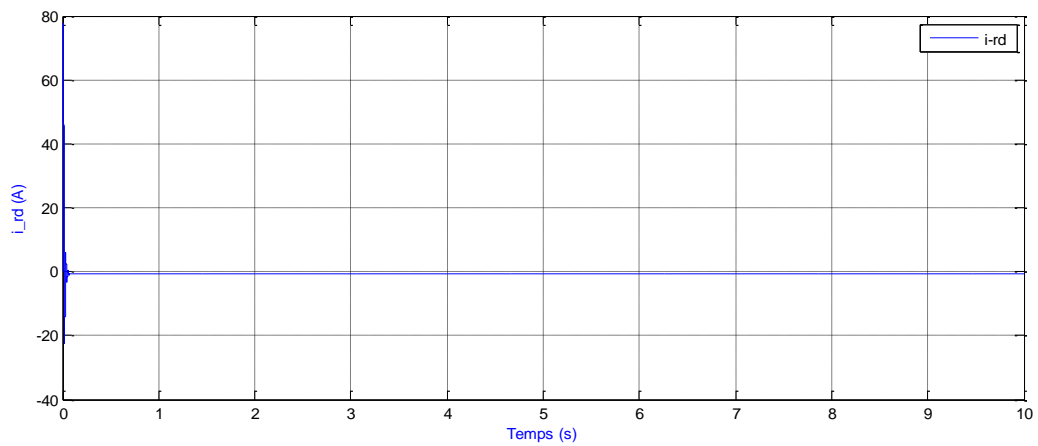


Figure II-19 :courant rotorique directe (A).

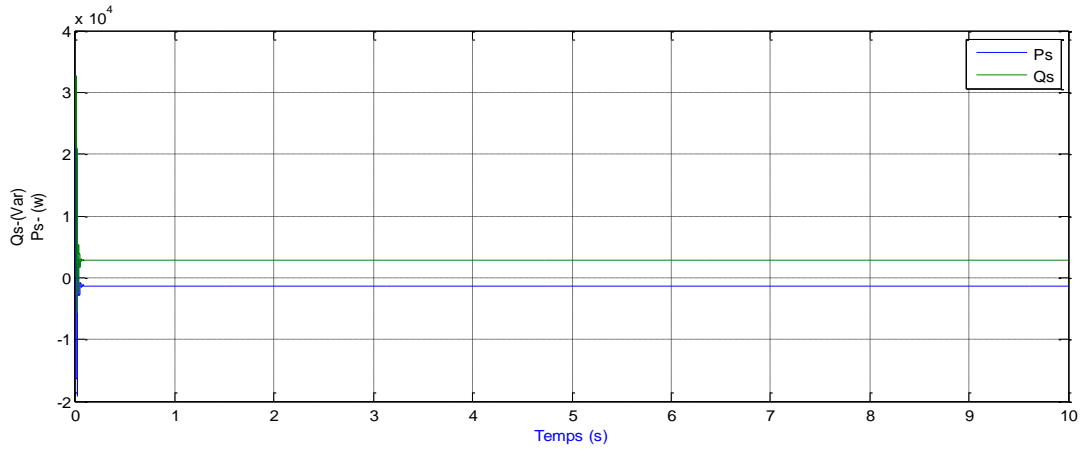


Figure II-20 : La puissance active et réactive statorique.

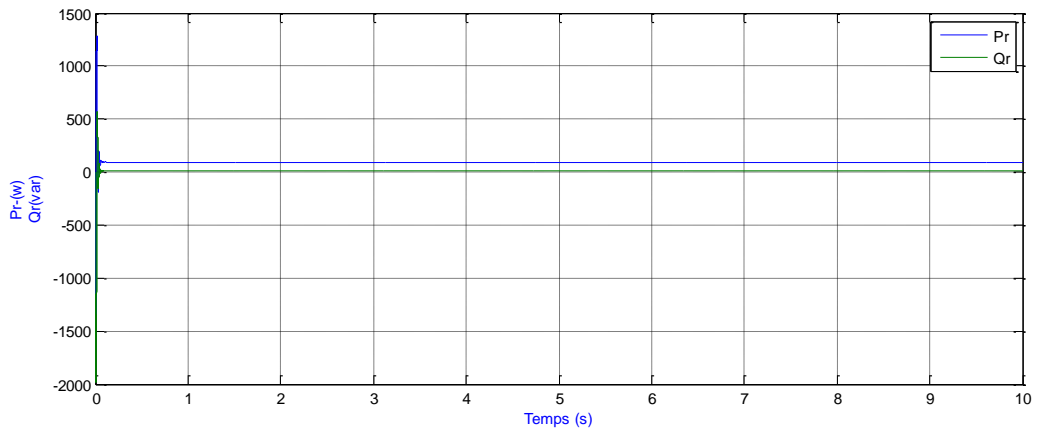


Figure II-21 : La puissance active et réactive rotorique.

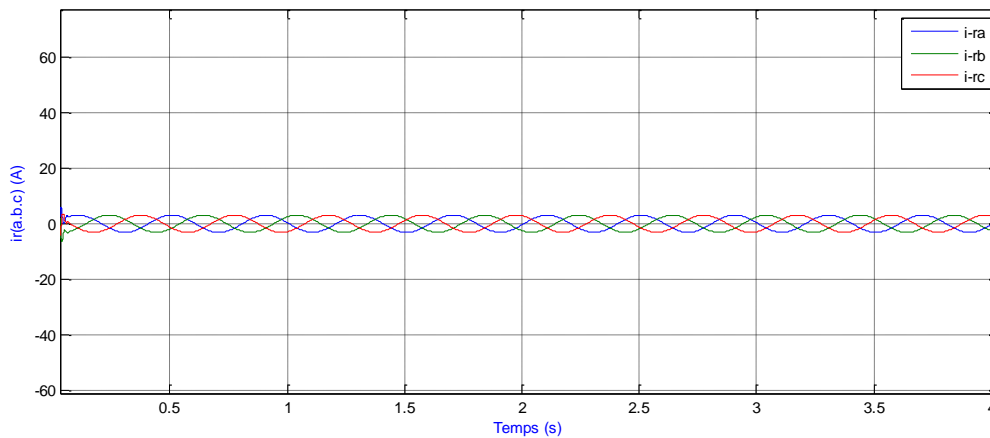


Figure II-22 : Courants rotoriques

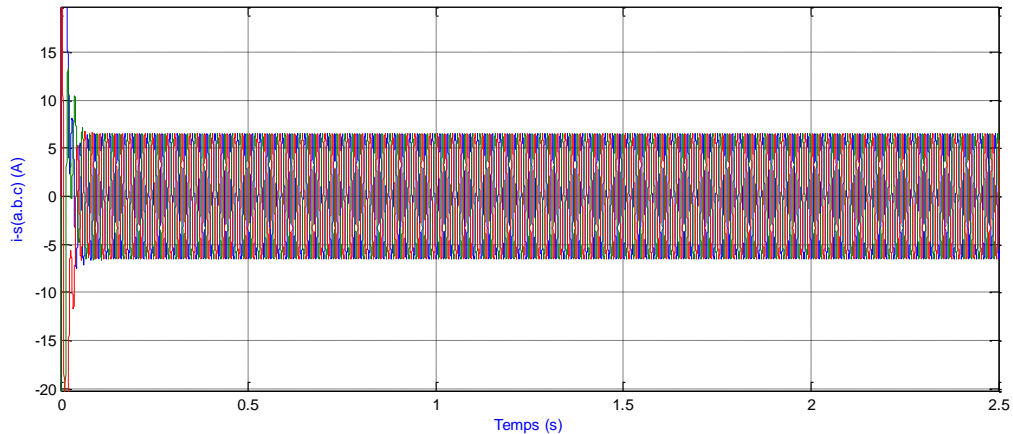


Figure II-23 : Courants statoriques

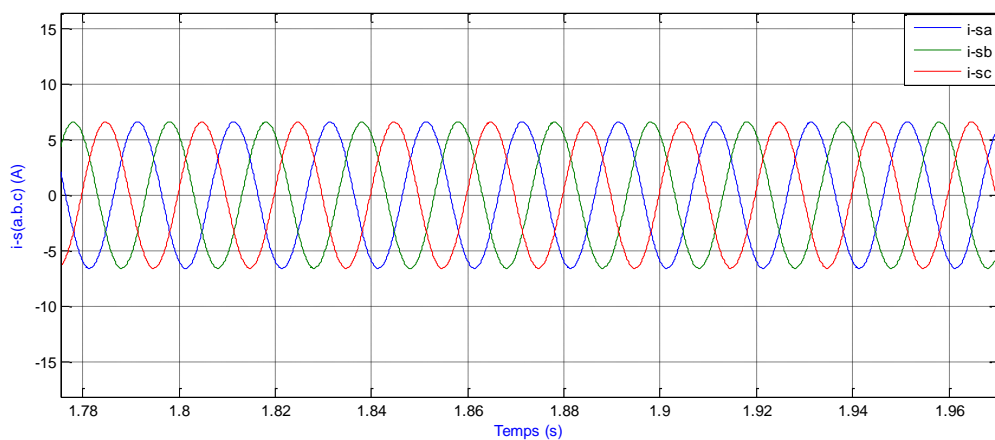


Figure II-24 : Courants statoriques (Zoom).

II.9.1. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique, après un temps ($t = 0.1s$). On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage. Des courants statoriques se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de $50Hz$.

Le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale $-60 N.m$.

II.9.2. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (abc). Ce modèle est non linéaire et fortement couplé.

Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park. Le module dynamique de la machine écrit dans le repère de Park sous forme d'équations mathématique, a été simulé. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

On remarque également que le modèle de la machine met évidence le couplage indésirable existant entre les axes d et q. L'élimination de ce couplage passe par la commande vectorielle à flux orienté; cela sera étudié dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Commande Vectorielle De La GADA

III.1. Introduction :

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants [30]. Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant, le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active dépendent uniquement du courant rotorique d'axe q.

À travers ce chapitre, nous allons présenter la stratégie de la commande vectorielle à flux orienté appliqué à une MADA [31].

III.2. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation :

Dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine asynchrone, Blaschke et Hasse ont proposé une méthode du contrôle vectoriel de la machine asynchrone. La commande vectorielle dite aussi « commande à flux orienté » est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine [32].

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment.

La plus part des travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par Blaschke.
- Méthode indirecte développée par Hasse.

Suivant la source d'énergie Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

- Commande en tension ;
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d, q) :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux de l'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

Dans notre cas, nous nous intéressons à une commande en tension avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique.

III.3. Principe de la commande vectorielle :

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu.

Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, i_{rd} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{rq} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{rd} et i_{rq} sont mutuellement découplées[13].

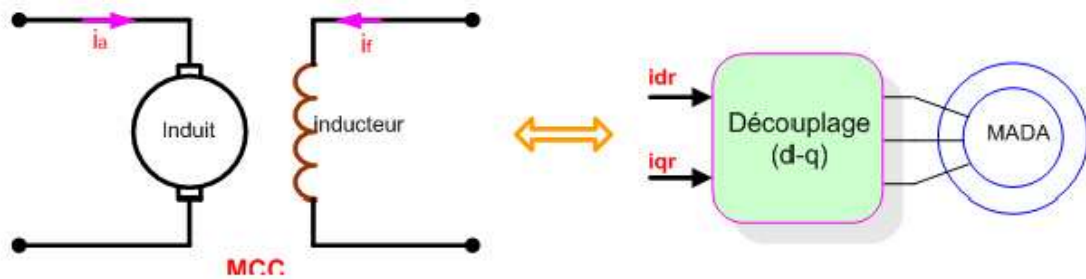


Figure III-1 :Principe de la commande vectorielle[33].

III.4. Modèle de la MADA à flux statorique orienté :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine.

Rappelons le système d'équations différentielles (II.16), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Avec un flux statorique constant et orienté ($\varphi_s = \varphi_{ds}$ et $\varphi_{qs} = 0$).

Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [1]:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s + \varphi_s \cdot \omega_s \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{V_s}{\omega_s} i_{sq} \quad (\text{III.5})$$

C_{em} : Le couple électromagnétique.

p : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances actives et réactives aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

III.4.1. Expressions des puissances active et réactive statoriques :

Les puissances active et réactive statoriques, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques I_{qs} et I_{ds} respectivement, sur lesquels nous n'avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s}{\omega_s L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans (III.6), on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Il ressort de l'expression (III.9) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive est proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ imposée par le réseau [34].

III.4.2. Expressions des tensions rotoriques :

A partir du système d'équations (III.4), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.3), on trouve:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{dr} + s L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} - g \omega_s L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{qr} + s L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} + g \omega_s L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

A partir des systèmes d'équations (III.9) et (III.11), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

Ou: g est le glissement de la machine;

s : est le variable fréquentiel;

$\frac{M.V_s}{L_s}$: le terme de couplage entre les deux axes;

$g - \frac{M^2}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

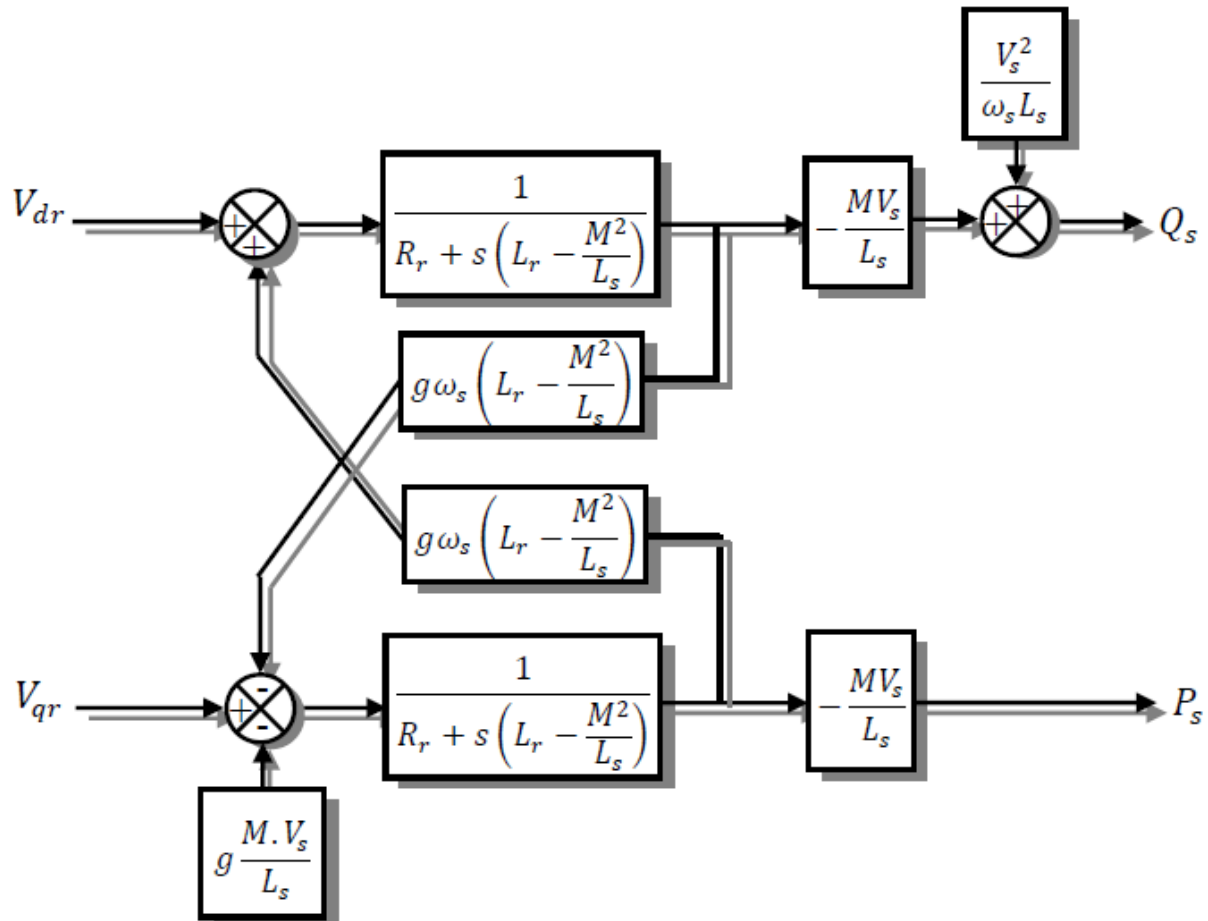


Figure III.2 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

L'expression $g\omega_s L_r - \frac{M^2}{L_s}$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature.

Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre[35].

III.5. Types de la commande vectorielle:

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui à été développé par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par k.Hasse.

III.5.1. Commande vectorielle directe

Pour déterminer la position et la norme du flux (contrôler par contre réaction) il faut utiliser les capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (ceci nécessite des moteur spéciaux), ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions sévères telles que les vibrations et. Les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes:

La non fiabilité de la mesure du flux

- problème de filtrage du signal mesuré.
- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs+filtre).

Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux[36].

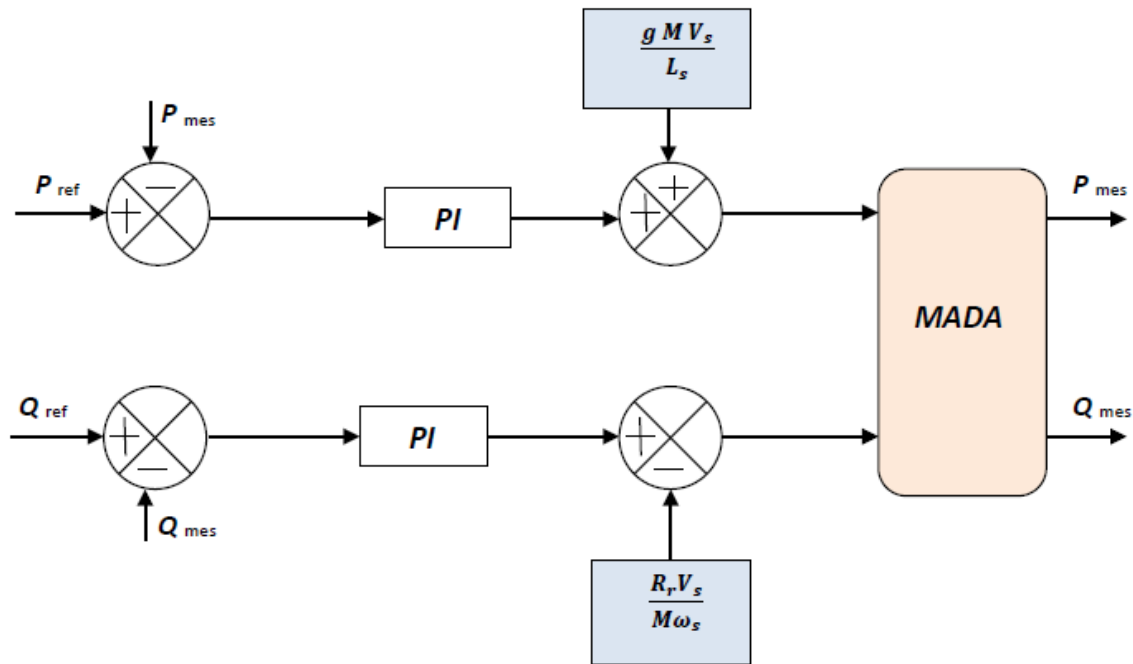


Figure III.3 : schéma bloc de la commande directe en puissance de la MADA[13].

III.5.2. Commande vectorielle indirecte:

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

- Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.

- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique T_r . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué.

Dans ce qui suit, nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimenté en tension avec convertisseur [36].

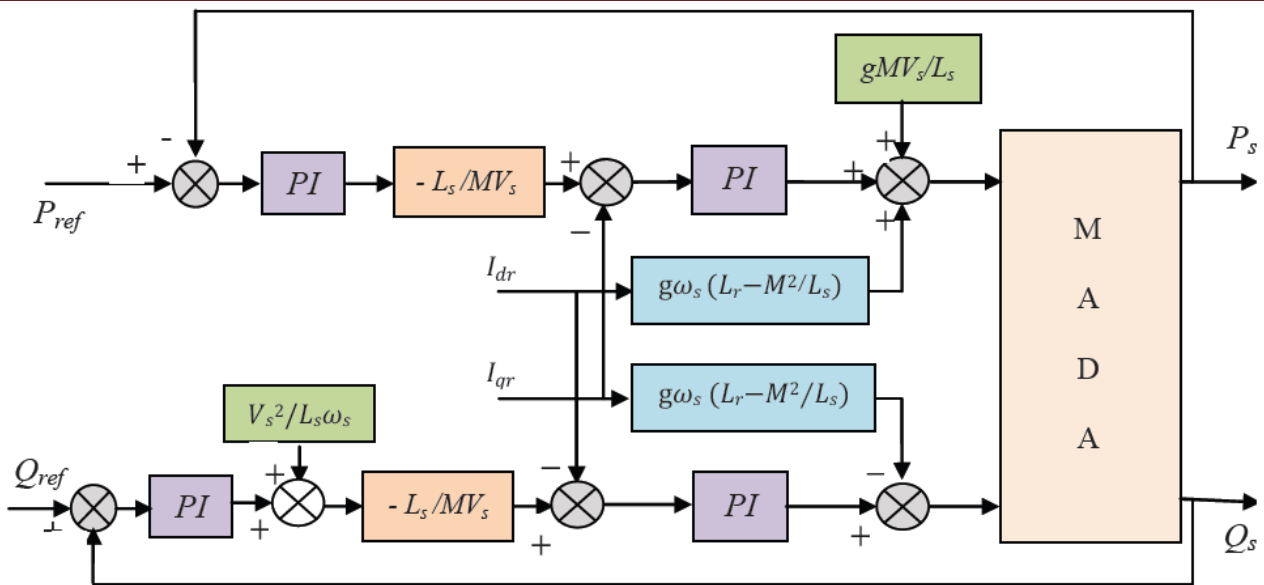


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte [37].

III.6. Résultats de Simulation

Ce paragraphe va permettre d’analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse (vérification de découplage) avec un démarrage à vide puis avec application d’une puissance active $P_s = -3.5 \text{ KW}$ entre $t = 1\text{s}$ et $t = 2\text{s}$ et une puissance réactive $Q_s = 2\text{Kvar}$ entre $t = 3\text{s}$ et $t = 4\text{s}$, la machine est entraînée à une vitesse fixe $N = 1425 \text{ tr/min}$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA.

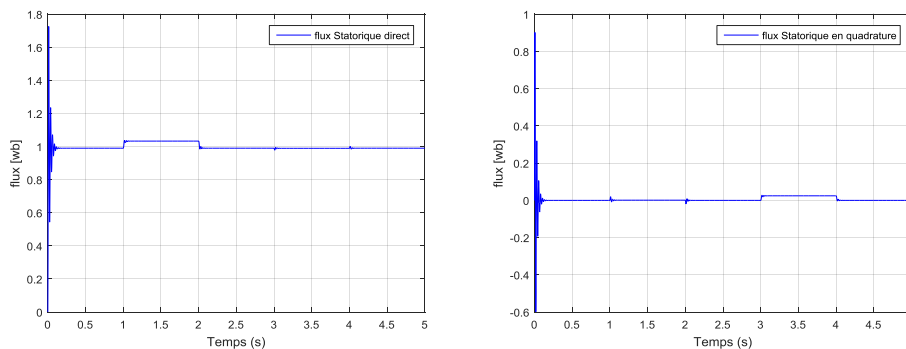


Figure III.5 : Les composantes du flux statorique.

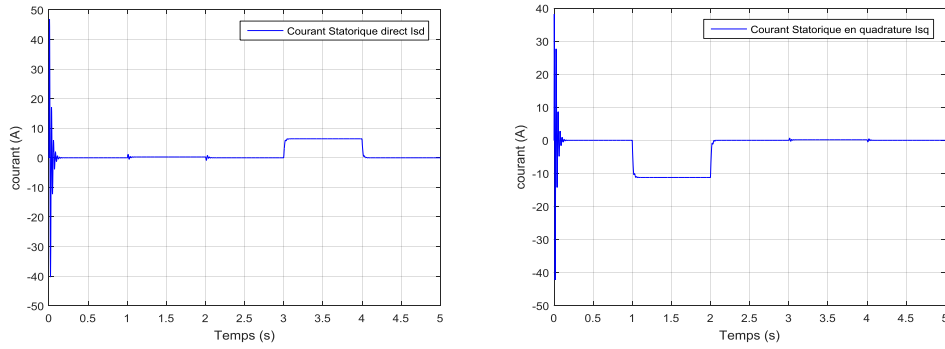


Figure III.6 : Les composantes du courant statoriques

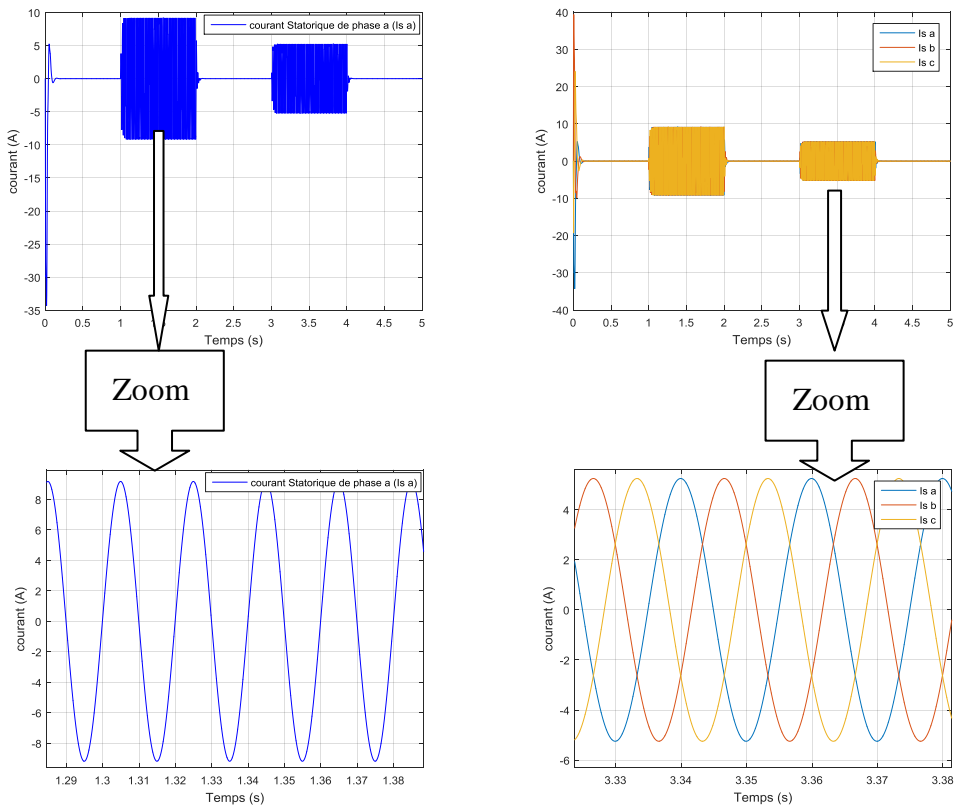


Figure III.7 : Courants statorique avec zoom

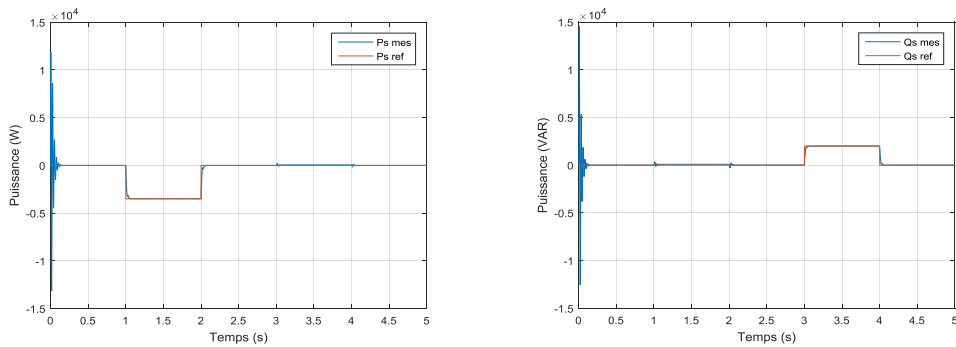


Figure III.8 : La puissance active et réactive statorique.

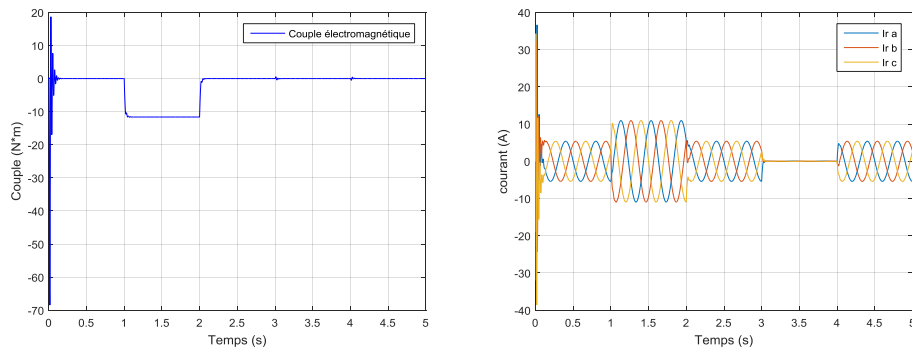


Figure III.9:Le couple électromagnétique et les courants rotoriques

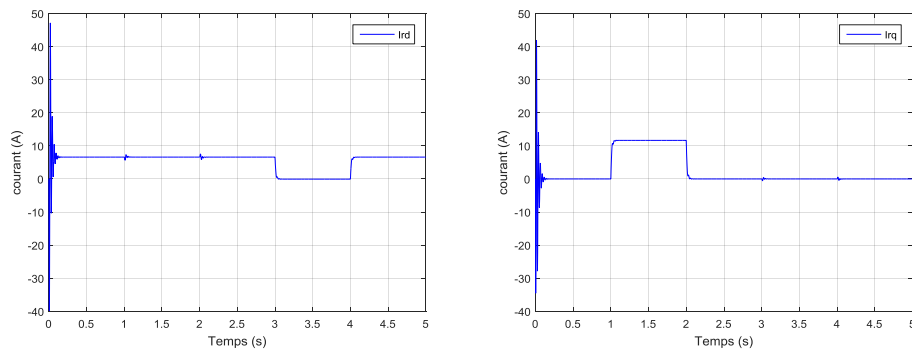


Figure III.10:courant direct et quadrature rotoriques.

III.6.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

III.7. Commande vectorielle de La Gada avec un onduleur à deux niveaux

Dans des domaines d'application les plus variés, Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Le plus connu est celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, contene les composants à semi-conducteurs entièrement commandable, puissants, robustes et rapides, et d'autre part.

Dans ce chapitre, nous présentons, dans la première partie, la modélisation de l'onduleur à deux niveaux. Ensuite, dans la deuxième partie, nous présenterons les résultats de simulation, Après nous présenterons la simulation de l'association MADA-onduleurs,

III.7.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux :

La figure suivante représente l'alimentation globale de notre système.

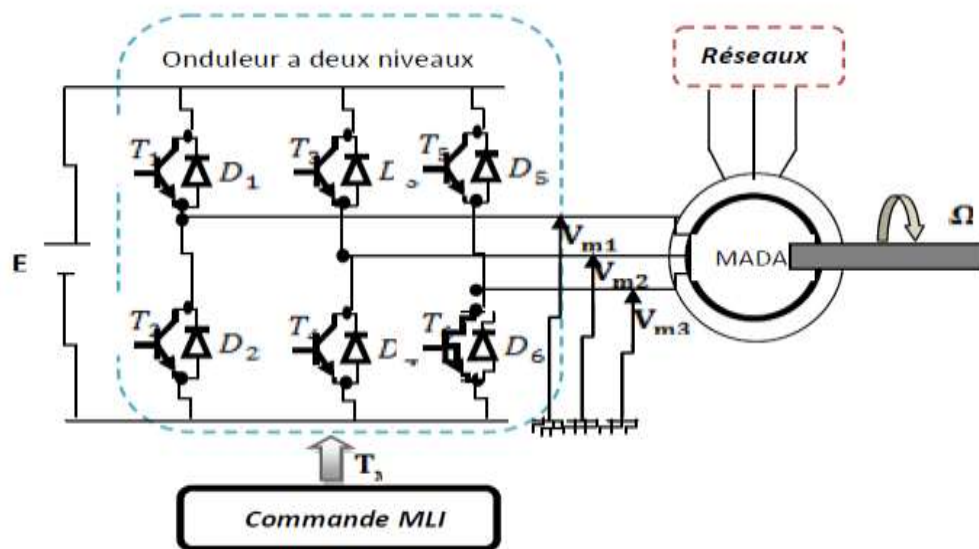


Figure III.11 :Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI [38].

Ou :

E : la tension du bus continu.

V_{m-i} : Avec $i \in \{1,2,3\}$ sont les tensions simples modulées par le convertisseur MLI.

$T_i D_i$: Avec $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$ désignent respectivement le transistor IGBT et la diode en antiparallèle.

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur

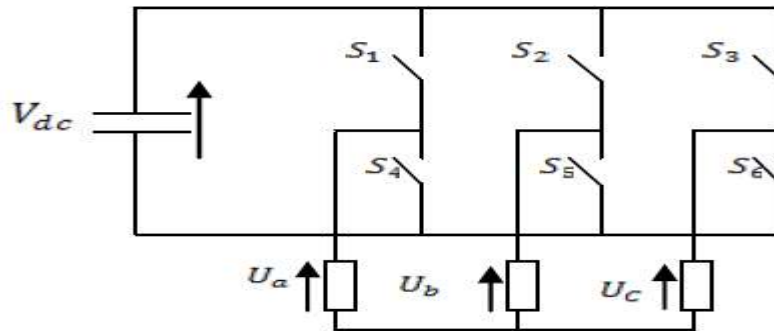


Figure III .12 :Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux[38].

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

Branche1 :

$S_a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert,

Branche2 :

$S_b=0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé ;

$S_b=1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.

Branche3 :

$S_c = 0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé ;

$S_c = 1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

III.7.2. Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangle sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.15})$$

Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (U_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{U_{ref}}{U_p} \quad (\text{III.16})$$

III.7.3. Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes :

Etape 1 :

$$\begin{cases} U_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ U_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

III.8. Résultats de la simulation :**III.8.1. Interprétation des résultats**

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA+ Onduleur) contrôlé par des régulateur PI. , De ce fait, nous reteindrons la commande indirecte pour la suite de nos travaux.

Les résultats présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple.

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

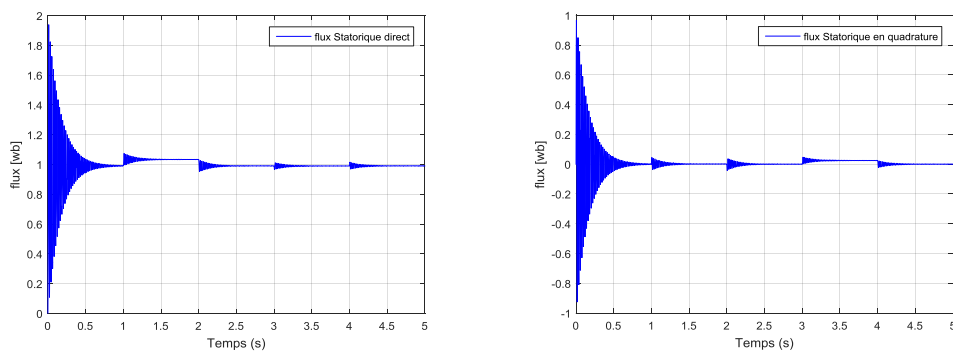


Figure III.13 :Les composantes du flux statorique.

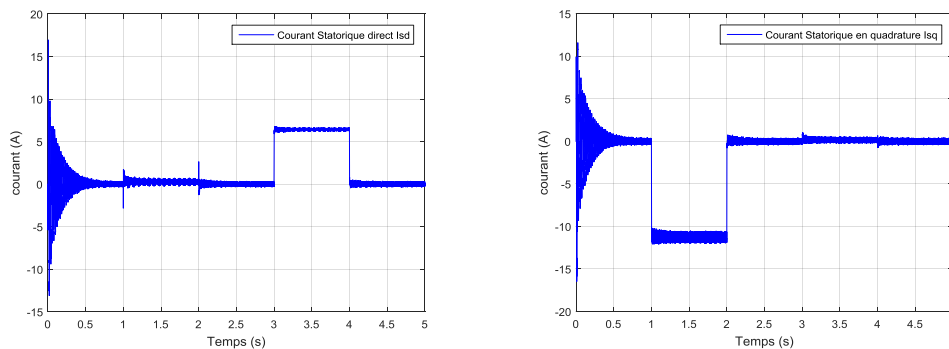


Figure III.14 :Les composantes du courantstatorique.

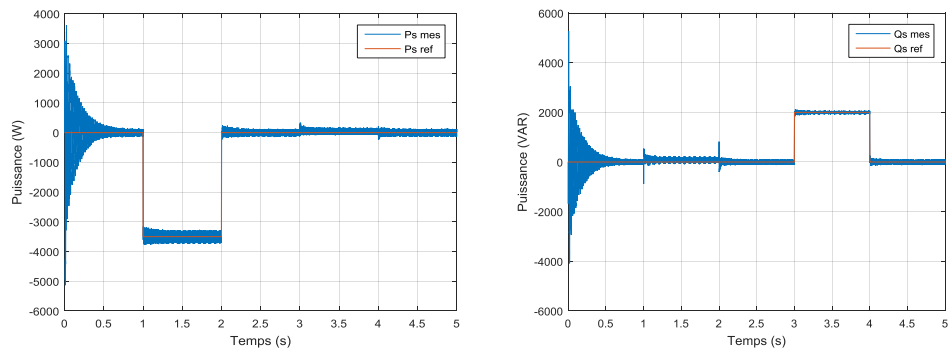


Figure III.15 :La puissance active et réactive statorique.

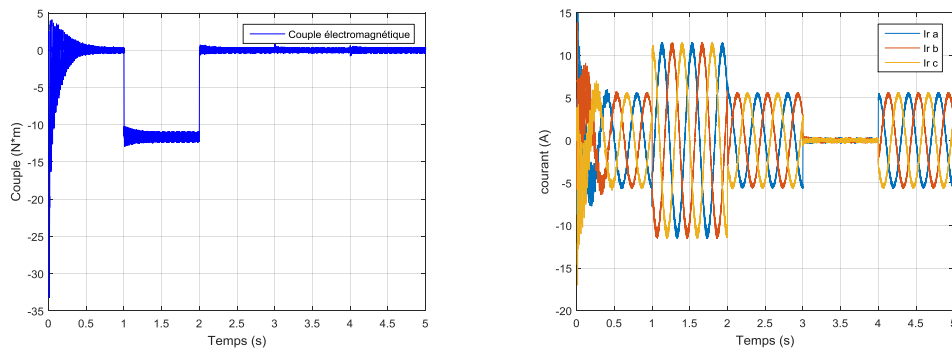


Figure III.16 :Le couple électromagnétique et les courants rotoriques.

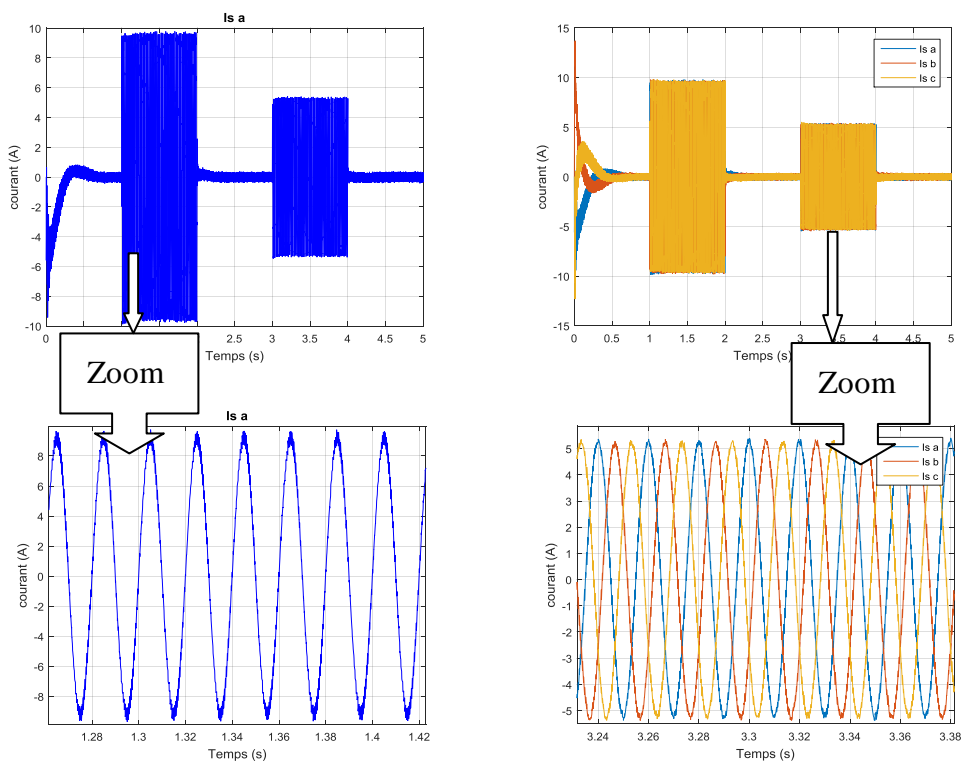


Figure III.17 :Les courants rotoriques avec zoom.

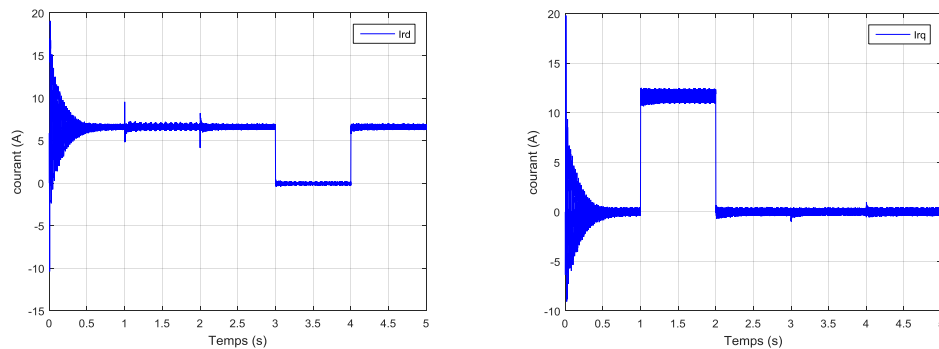


Figure III.18 :courant direct et quadrature rotoriques.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la loi de la commande vectorielle par orientation du flux statorique pour découpler le flux et le couple pour le but de contrôler séparément les puissances actives et réactives fournies au réseau. Puis représenter cette commande de la machine asynchrone double alimentation alimentée par un onduleur de tension à MLI. Il s'agit fondamentalement de définir la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande en vue d'asservir indépendamment les puissances statoriques (puissance Active et Réactive) en fonction des courants rotoriques direct et en quadrature. Les résultats obtenus par simulation nous montrent que le système répond positivement à ce test, les puissances suivent leurs références, on remarque aussi que le réglage à l'aide de régulateurs PI permet d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. En effet les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. 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.

La modélisation et la commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, L'objectif de notre travail était de faire un système de production d'énergie éolienne, la modélisation et la commande non linéaire et contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation,

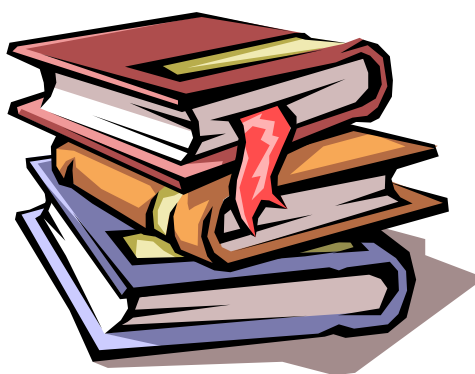
Dans le premier chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, et son historique; puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes, et ces composants avec leurs définitions et présenté la modélisation de la turbine, aussi la loi aérodynamique de **Betz** et la variation de la puissance extraite du vent en fonction de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent. On a donné aussi le principe des techniques de réglage de puissance '**MPPT**' afin de maximiser la puissance nominale disponible sur l'arbre du générateur.

Dans le deuxième chapitre, on a rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (abc). Ce modèle est non linéaire et fortement couplé. Le travail présente des outils numériques pour dériver les lois de commande permettant à la MADA de fonctionner sur ses points de fonctionnement tout en optimisant ses performances. Ces lois peuvent être efficacement utilisées dans un environnement de conception globale et optimale de la chaîne de conversion électromécanique.

En suite dans le troisième chapitre, on a présenté la stratégie de la commande vectorielle à flux statorique orienté appliqué à une MADA, Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande on ajoute un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue supposée parfaite.

Dernièrement le quatrième chapitre, Dans ce chapitre : on a étudié la machine asynchrone associée à un onduleur de tension à MLI, ont été présentés. Les résultats obtenus par simulation montrent que l'alimentation de la machine asynchrone, par un onduleur de tension à MLI présente des ondulations sur toutes les caractéristiques de la machine asynchrone.

Références bibliographiques



- [1] F.Merrahi ,«Alimentation et commande d'une machine asynchrone double alimentation (application à l'énergie éolienne)», Thèse de magister à l'ENP d'Alger,2007.
- [2] [Http: //www.ewea.org](http://www.ewea.org). Wind Energy. European Wind Energy Association.
- [3] El Kabira El Mjabber«Modélisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne»,Master SMTII, Université sidi Mohammed Ben Abdellah,2013.
- [4] A. MAAFA,« étude d'un générateur éolien base sur la cascade de deuxmachines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence », mémoire demagistère, Université de Bejaia, 2011.
- [5] A. MIRECKI ,« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [6] L. Abdelhamid ,« Contribution à l'étude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisésdans les SystèmesEoliens » Thèse de magister,Université de Batna, 2008.
- [7] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératricesasynchrones pour l'utilisation de l'énergieéolienne »,thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [8] NaouelHAMDI ,«Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Faculté des Sciences deL'ingénieur, PFE magister 2008,Université MENTOURI de CONSTANTINE.
- [9] E. HAU, « Wind turbines ». 2nd Ed Springer 2006.
- [10] N.MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèses de Magister, UNIV DE BATNA 2004.
- [11]I. HAMZAOUI, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger,2008.
- [12] Panos M. Pardalos , Steffen Rebennack Mario V. F. Pereira et Niko A. IliadisVijayPappu Editors« Handbook of Wind Power Systems» Sprinker, 2012.
- [13] Mohammed Malki ,Saïd Ali Belarbi, « Etude et Simulation d'un aérogénérateurconnecté au réseau(Turbine +MADA+Réseau) en mode continu et discre»,Mémoire de Master, UniversitéAboubekrBelkaid Tlemcen,2014.
- [14] Corinne Duboise , « guide de l'éolien,technique et pratique » Mémoire de Master,2007.
- [15] KarimBelmokhtar, MamadouLamineDoumbia « Modélisation et commande d'un système éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseauélectrique » QuatrièmeConférenceInternationalesur le GénieElectrique , Université de Bechar, Algérie,2010.
- [16] F. Kendouli, Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation, Mémoire de Master, UniversitéMentouri, Constantine, 2011.

- [17] L. Xu & W. Cheng " Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme ", IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636-642, mai/juin 1995.
- [18] E.S Abdin ,w.xu « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine –induction generator unit» IEEE Trans, on energy conversion , vol 15, N° 1 ,March 2000.
- [19] Rémi Defontaine, « ÉTUDE ET SIMULATION DE LA MADA », Mémoire de Master ,Université du Québec,2012.
- [20] Kelkoul Bahia " Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation" Magister API, Université de TLEMCEM,2011.
- [21] HAKIM BENNANI, « Machine asynchrone à double alimentation Les lois de commande en régime permanent »,Mémoire de Master, l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.),2011.
- [22] R. Abdessemed, " Modélisation et simulation des machines électrique", Edition marketing Paris 2011.
- [23] A.Chaiba, "Commande de la Machine Asynchrone à Double alimentation par des Techniques de l'Intelligence Artificielle", Thèse de Doctorat de l'université deBatna, 2010.
- [24] Thierno Lamarana SOW, «Commande non linéaire de l'éolienne à mada pour une participation au réglage de la fréquence du réseau», université du québec 2012.
- [25] A.salamat, A.tadjine, " Commande Robuste D'ordre non Entier d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation" Mémoire de master, université d'Ouargla, 2014.
- [26] H.S.vicatos , J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « Transient State Analysis of A Doubly .FED induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens, Département of électrique engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE. Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [27] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.
- [28] CH. Bennour " Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.
- [29] KHENGAOUI Nafissa, KHENGAOUI Nessrine " Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation" Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,2015.
- [30] Pena R, Clare J, Asher G. "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation". IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 13(3):231-241.

- [31] Mokrane Smaili "Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur À Machine Asynchrone À Double Alimentaion En Vue De Simulation Des Problème De Cogénération" , Mémoire présenté Comme Exigence Partiale De La Maitrise En Ingénierie, Université Du Québec En Abitibi-Temiscamingue, 2013.
- [32] Blasco-Gimenez, R- Asher G.M.-Sumner M.- Bradley K.J. « Dynamic performance Limitations for MRAS based sensorless induction motor drives» Part 1: Stability Analysis for the Closed Loop Drive . IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol 143, N° 2, pp.113-122, March 1996.
- [33] Guasmi Abdenour , Guelmine Said « Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA » UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA Master académique, 2018.
- [34] L. KHETTACHE « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimenter » Thèse de Magister université de Batna, 2007.
- [35] MELLOUL Ahmed " Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne", Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas –Sétif, 2011.
- [36] TIR Zoheir " Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue ", MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued , 2014.
- [37] Mohamed Allam « Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », Mémoire de Magister, Université de Djillali de Sidi Bel-Abbes, 2014.
- [38] Serhoud Hicham « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued, 2015.

Annexe

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Valeurs nominales :

Puissance nominale :

$$P_n = 4 \text{ kW}$$

Les tensions statorique et rotorique $V_s = \sqrt{2} \cdot 220 \text{ V}$; $V_r = 12 \text{ V}$

La vitesse nominale : $\Omega n = 1425 \text{ tr/min}$.

Nombre de paires de pôles : $P = 2$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale: $N_p = 3$

Diamètre d'une pale : $R_T = 3 \text{ m}$

Inertie: $J = 315 \text{ Kg.m}^2$

Paramètre :

Résistance du stator : $R_s = 1.2 \Omega$

Résistance du rotor : $R_r = 1.8 \Omega$

Inductance stator : $L_s = 0.1554 \text{ H}$

Inductance du rotor: $L_r = 0.1568 \text{ H}$

Inductance mutuelle: $M = 0.15 \text{ H}$

Constantes mécaniques :

Moment Inertie : $J = 0.2 \text{ Kg.m}^2$

Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.S/rad}$

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE RESEAUX ELECTRIQUES**

Proposé et dirigé par : Dr. ZOUGGAR El Oualid.

**Présenté par : Mr. LEBADI Nassireddine.
Mr. LOUAFILeyla.**

Thème :

**CONTROLE DES PUISSANCES ACTIVES REACTIVE DE
LA MADA**

Résumé :

Ce travail présente la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, GADA et onduleur), puis nous avons utilisé la commande vectorielle,

L'objectif principal de cette commande contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation, on les découple par orientation du flux statorique.

mon travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone dans la production de l'énergie éolienne, Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, Le travail que nous avons à réaliser, consiste à une étude sur une chaîne de conversion éolienne et a travers les différentes machines utilisées dans un système éolien. Pour donné un bon rendement au réseau électrique, en a choisi la machine asynchrone à double alimentation MADA, cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelques soit la vitesse de vent.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, modélisation, onduleur, commande vectorielle.