

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine électrique

Thème

*Contrôle des puissance d'un systemé eolien basé sur une
MADA*

Realiséé par :

-GHEMAM AMARA SEDDIK

-GHEMAM AMARA ABDELLATIF

-SADOUN ABDELKADER

Devant le jury composé de Président:

Dr.TRIA FATMA ZOHRA

ABDELAZIZ AZA MOHAMED

IDRIS BABAARBI

2020-2021

Remerciement

Je voudrais d'abord remercier Dieu tout puissant pour

La force de volonté, la santé et la patience qu'il m'a données pendant toutes ces cinq années et j'adresse mes sincères remerciements à mes généreux parents

Par conséquent, je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à mon superviseur, le Dr Fatma Tria zohra

Pour son suivi continu tout au long de la préparation de cette note.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury, chacun en son nom

Enfin, je tiens à remercier tous les enseignants et

Chefs du département de génie électrique à la Valley University d'loued

Sommaire

Remerciement	
Sommaire	I
Liste de figure	IV
Liste de tableau	VI
Symbole	VII
Introduction générale	1
CHAPITRE : 01 GENERALITES SUR LE SYSTEMES EOLIENNES	
1.1.Introduction	4
1.2. Historique	4
1.3.Développement de l'éolien	5
1.4.Définition d'un système éolienne	6
1.5. Principe de conversion de l'énergie éolienne	07
1.6.Les différents types d'éoliennes :	08
1.6.1 Eoliennes à axe horizontal :	08
1.6.2. Eoliennes à axe vertical (VAWT):	08
1.7. Principaux composants d'une éolienne horizontale	10
1.8. types des machines utilisées dans un system éolien	11
1.8.1. Eoliennes à vitesse fixe	12
1.8.2. Eoliennes à vitesse variable	14
1.9.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	18
1.10.Modélisation d'une turbine éolienne	19
1.10.1.Modélisation de la turbine	19
1.10.2.La puissance d'une éolienne	19
1.10.3.Le coefficient de puissance	20
1.10.4.Modèle du Multiplicateur	20
1.10.5.Equation dynamique de l'arbre	21
1.11 Conclusion	22

CHAPITRE : 02	
ETUDE ET MODELISATION DE LA MADA	
2.1.Introduction	24
2.2.Présentation de système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation:	24
2.3.Description de la MADA	25
2.4.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation	25
2.5.Classification des machines à double alimentation	26
2.6.Domaine d'application de la MADA	27
2.6.1.Fonctionnement moteur dans les applications industriels	27
2.6.2.Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	28
2.6.3.Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur	28
2.6.4.Systèmes de génération éolienne à vitesse variable	28
2.7. Modes de fonctionnement d'une MADA:	29
2.7.1.Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	29
2.7.2.Fonctionnement moteur en mode hyper-synchrone	30
2.7.3.Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	30
2.7.4. Fonctionnement génératrice en mode hyper-synchrone	31
2.8 .Avantages et inconvénients de la MADA	31
2.9.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice	32
2.9.1. Hypothèses simplificatrices	33
2.9.2.Référentiel de travail	33
2.10.Modèle de la MADA dans le repère a,b,c	34
2.10.1.Equations électriques dans le repère a, b, c	34
2.10.2.Equations magnétiques dans le repère a, b, c	35
2.10.3.Modèle de la MADA dans le repère d, q	37
2.10.4.Choix du référentiel	39
2.10.5.Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant	39
2.10.6 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park	39
2.10.7.Mise sous forme d'équation d'état	40
2.11.Conclusion	41
CHAPITRE : 03	
CONTROLE DES PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE D'UN SYSTEM EOLIEN	

Sommaire

3.1 Introduction	43
3.2. Commande vectorielle de la machine	43
3.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA	43
3.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	44
3.2.3. Expressions des puissances active et réactive statoriques	46
3.2.4. Expressions des tensions rotoriques	46
3.3. Stratégie de commande de la turbine éolienne	47
3.3.1. Techniques d'extraction du maximum de la puissance	48
3.4. Modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux	52
3.5. Résultats de simulation	53
3.5.1. Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe	53
3.5.2. Essai 02 : fonctionnement à vitesse réelle:	55
3.7. Conclusion	57
Conclusion générale	59
Bibliographie	61

Liste de figure

Figure	page
Figure.1.1 : Principe de la conversion d'énergie éolienne	07
Figure.1.2 Principe de la conversion de l'énergie éolienne	07
Figure.1.3 : Type de montage de la voile a) upwind b) downwind	08
Figure.1.4 : Éolienne à axe vertical de type Savonius	09
Figure.1.5 :Éolienne à axe vertical de type Darrieus	09
Figure.1.6: Éolienne à axe vertical et à voile tournante	10
Figure 1.7 :Éléments constituant une éolienne	10
Figure 1.8: Eolienne à base d'une MAS connecté réseau	12
Figure 1.9:Eolienne à base d'une machine asynchrone à double stator	14
Figure 1.10 : Eolienne basé sur une machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	16
Figure 1.11 : Eolienne basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable	16
Figure 1.12 Eolienne basé sur une MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.	17
Figure 1.13 :Eolienne basée sur une MADA, structure de Kramer	17
Figure 1.14 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	18
Figure 1.15: Schéma de la turbine éolienne.	19
Figure 1.16 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio	20
Figure 1.17 : Schéma bloc du modèle de la turbine.	21
Figure. 2.1 : Eolienne à base d'une MADA à vitesse variable	24
Figure.2.2 : Schéma d'une MADA à rotor bobiné	25
Figure.2.3: Schéma de principe d'une simple MADA	26
Figure.2.4: Schéma de principe de deux MADA en cascade	26
Figure 2.5: Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.	27
Figure 2.6: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs	28
Figure 2.7: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur	28
Figure 2.8: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	29
Figure. 2.9 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	30

Liste de tableau

Figure. 2.10 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	30
Figure.2.11 : Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	31
Figure.2.12: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone	31
Figure 2.13 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA	34
Figure 2.14: Représentation de la MADA dans les deux repères	37
Figure. 3.1: Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.	44
Figure. 3.2 : Orientation de la tension et de flux statorique.	45
Figure.3.3 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension	47
Figure. 3.4 : La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1.5 MW.	48
Figure 3.5: maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	49
Figure. 3.6 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	51
Figure. 3.7 : Onduleur de tension à deux niveaux.	52
Figure(3.8):le vitesse de vent (m/s)	53
Figure(3.9): les puissance active (w)	53
Figure(3.10): couple electromagnetique(N.m)	54
Figure(3.11): les puissance reactive (var) Figure (3.12): le courant rotorique a lax	54
Figure (3.13): le courant rotorique a laxe d	54
Figure(3.14): les courant rotorique(A)	54
Figure(3.15): les courant statorique(A)	54
Figure(3.16):le vitesse de vent (m/s)	55
Figure(3.17): les puissance active (w)	55
Figure(3.18): les puissance reactive (var)	55
Figure(3.19): le couple electromagnetique (N. m)	55
Figure (3.20): le courant rotorique a laxe d	56
Figure (3.21): le courant rotorique a laxe q	56
Figure (3.22): le courant statorique	56
Figure (3.23): le courant rotorique	56

Liste de tableau

Tableau	page
Tableau 1.1 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW	06

Symbole

Symbole	Signification	Unité
C	Capacité du filtre	F
C_P	Coefficient de puissance	
C_e	couple électromagnétique	$N.m$
C_r	couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
J	moment d'inertie des parties tournantes	$K.g.m^2$
f	coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m$ $.s/r$ ad
G	Rapport de vitesse du multiplicateur	
G	Glissement	
$K_e,$	Facteurs d'échelles du régulateur flou	
K_p, K_i	Gains du régulateur PI classique	
R_f	Resistance du filtre passe bas	Ω
M_{sr}	inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_s	Puissance active statorique	W
P_v	Puissance portée par le vent	W
$P_{rés}$	Puissance de réseau	W
Q_s	Puissance réactive statorique	VA R
R	Rayon de la turbine	m
R_s	résistances statorique	Ω
R_r	résistances rotorique	Ω
L_s	inductances propres statorique	H

symbole

L_r	inductances propres rotorique	H
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	m^2
V_{dc}	Tension filtrée	V
v_{abcr}	Tensions instantané des phases rotoriques	V
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques	A
v_{abcs}	Tensions instantané des phases statoriques	V
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
i_f	Courant filtré	A
p	Nombre de paires de pôles	
s	Opérateur de Laplace	
v_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
v_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
β	Angle de calage des pales	$^\circ$
Ω	vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
Ω_{ref}	vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique .	Rd
θ_s	Position de stator	Rd
θ_r	Position électrique de rotor	Rd
Λ	Vitesse spécifique	
λ_{cpmax}	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne	
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	rd/sec
ω_s	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
Φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	Wb
Φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	Wb

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La croissance continue de la consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique dénotent encore, une fois de l'importance des énergies renouvelables. Plusieurs sources d'énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche donc le but de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique[48][49] .

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels : la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodes de contrôle des turbines à vitesse variable. Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse de vent d'une autre part[50] .

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique -types des machines utilisées- et la qualité de l'énergie fournie.

De nos jours et concernant les types des machine utilisée dans l'industrie éolien, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'application des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à haute puissance et à vitesse variable. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de développer différentes stratégies de commande pour améliorer leurs performances en régime statique et dynamique. Ceci présente un autre avantage d'utilisation de ces machines et élargit son domaine d'exploitation. L'alimentation du circuit rotorique de la MADA à travers un onduleur de tension à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce système d'entraînement possède de nombreux avantages: une structure de machine simple, robuste et bon marché. De plus, la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau.

Introduction

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation.

Le premier chapitre sera un état de l'art sur l'aérogénérateur. Qui donne en plus quelques généralités sur les systèmes éoliens notamment sa description tout en donnant ses parties constitutives, son principe de fonctionnement, son énergie de production et les différents types de machines utilisées dans les systèmes éoliens en façon générale ; et en particulier le MADA en donnant son principe de fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur la MADA pour les deux modes de fonctionnement moteur ou générateur, en couvrant tous les modes d'alimentation des deux armatures. Les avantages et les inconvénients de cette machine, ainsi que les domaines d'utilisation et une modélisation détaillée de cette machine sont présentés.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des lois de la commande vectorielle appliquées aux machines électriques. Son principe, ses différentes classifications, les causes et les conséquences de son application sont aussi présentés. On présente également une étude de l'onduleur de tension triphasé.

Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants de ce travail et ouvrira une perspective afin de guider les initiatives futures d'évolution et de recherche.

CHAPITRE : 01

GENERALITES SUR LE SYSTEMES EOLIENNES

1.1.Introduction

L'énergie éolienne est employée pendant longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou l'eau de pompe sous forme de moulin de vent. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Aujourd'hui, ce principe est appliqué à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation, mais on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations: d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs continue d'évoluer. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

1.2. Historique

L'époque actuelle connaît sous la pression d'une crise des prix de l'énergie, une floraison de publication traitée des énergies dites nouvelles et dont pour la plus part seule l'opportunité connaît un renouveau. L'énergie éolienne, la plus ancienne sans doute dans l'histoire de l'humanité après l'énergie tirée de la biomasse n'échappe pas à cet intérêt justifié ; encore ne faudrait-il pas commettre l'erreur d'en faire la panacée de nos problème énergétique [1].

Les premiers moulins à vent ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulin les grains depuis le 7^{ème} siècle avant Jésus-Christ. Les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et Europe centrale [2], [3].

Les premiers moulins à axe horizontal sont apparus en Angleterre vers 1180, en France en 1190 et en Allemagne en 1222. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12^{ème} et le 19^{ème} siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moulin des grains mais aussi pour le pompage d'eau [3].

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent. En 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle Hollandaise et Allemagne avait plus de 18000 unités installées.

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multipales ne se développe pas par les Européens mais en Amérique en 1890. Elle écrase tous les pays en Europe, lieu de sa conception en 1876 où elle se simplifie alors sous le nom moulin Américain.

Après la crise pétrolière de 1947, avec la diminution du stock mondiale en hydrocarbure et la pollution de plus en plus augmente, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement courant. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années. On installe des parcs à éoliennes multipales produisant plusieurs mégawatts. Au coure des dix dernières années, la puissance de génération d'électricité pour une seule éolienne est d'environ 100kW à 2MW. Entre 1995 et 2003 environ de 76% des nouvelles connexions d'aérogénérateurs au réseau étaient installés en Europe. Les pays les plus avancées dans la production de cette énergiesont :

L'Allemagne avec une puissance de production de 14609MW, le Danemark 3110MW, l'Espagne 6202MW, et le reste des pays Européens 4785MW. La puissance installée en Amérique du nord est de 6677MW et en Amérique du sud est 139MW, en Asie 3034MW en, Afrique 150MW [3, 4].

1.3.Développement de l'éolien

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème du réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont des facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source d'énergie alternative et durable ,la comparant avec d'autres sources d'énergie ,l'énergie éolienne est renouvelable et produit une énergie propre , elle est devenue un moyen trop important dans la production de l'énergie électrique dans plusieurs pays ,l'électricité produite par l'énergie éolienne ces dernières années s'est considérablement développée de manière très remarquable ,comme dans les tableaux suivante:

Country/Region	2020	New Capacity 2020	2019	2018
China*	290'000	52'000	237'029	209'529
United States	122'328	16'895	105'433	96'363
Germany	62'784	1'427	61'357	59'313
India	38'625	1'096	37'529	35'129
Spain	27'446	1'638	25'808	23'494
United Kingdom	24'167	652	23'515	20'743
France*	17'949	1303	16'646	15'313
Brazil	18'010	2'558	15'452	14'707
Canada	13'588	175	13'413	12'816
Italy*	10'850	280	10'512	9'958
Turkey	9'305	1'249	8'056	7'369
Rest of the World*	110'000	14'000	96'035	84'814
Total*	744'000	93'000	650'785	589'547

Tableau 1.1 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW [5]

1.4. Définition d'un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne est un système de conversion d'énergie a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système connus sous l'appellation anglaise : *Wind Energy Conversion Systems* (figure 1.1).

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

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

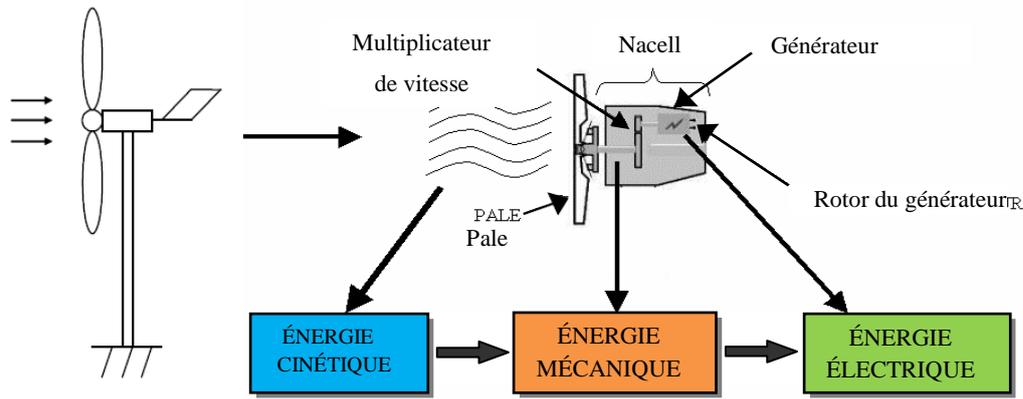


Figure.1.1 - Principe de la conversion d'énergie éolienne

1.5. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

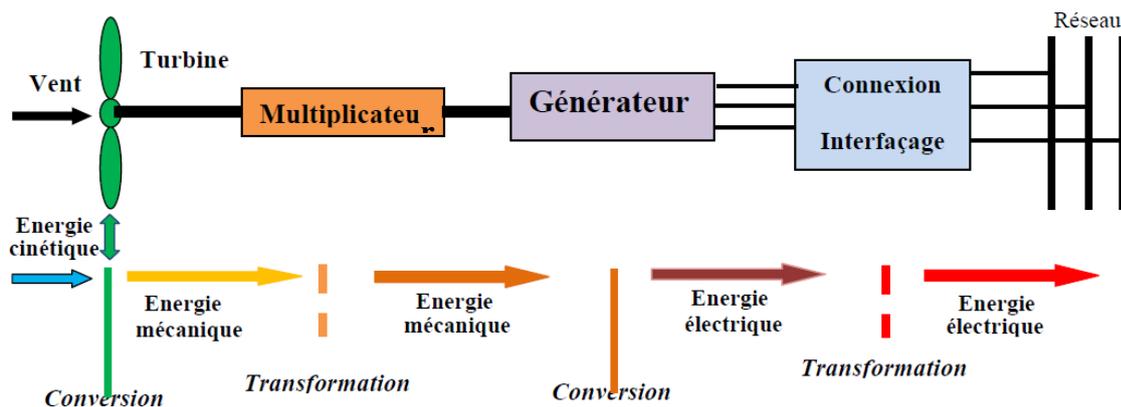


Figure.1.2 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

1.6. Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontale.

1.6.1 Eoliennes à axe horizontal :

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales.

La voilure peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. La figure 1.3 montre les deux procédés [6].

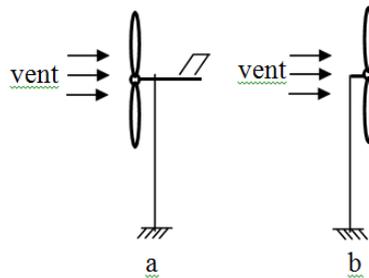


Figure.1.3 : Type de montage de la voilure a) upwind b) downwind

1.6.2. Eoliennes à axe vertical (VAWT):

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues mais il en existe d'autres. En effet, les éoliennes peuvent aussi être à axe vertical, comme c'est le cas des éoliennes de type Savonius, celles de type Darrieus ou encore celles à voilure tournante.:

- **Type Savonius.**

Constitué de demi-cylindres reliés à un axe vertical, ce type d'éolienne utilise la force de traînée du vent, sur le principe des moulins à vent. Son rendement est plus faible que celui des éoliennes qui utilisent la force de portance, mais ce type de machine permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles.

De faible encombrement et plus silencieuses que les autres éoliennes, les éoliennes de type Savonius sont idéales pour l'intégration en milieu urbain.



Figure.1.4 : Éolienne à axe vertical de type Savonius

- **Type Darrieus.**

À pales verticales, paraboliques ou hélicoïdales, les éoliennes de type Darrieus utilisent la force de portance du vent, comme les éoliennes classiques. Cependant, leur encombrement plus faible est un avantage en termes d'intégrations paysagère et architecturale.

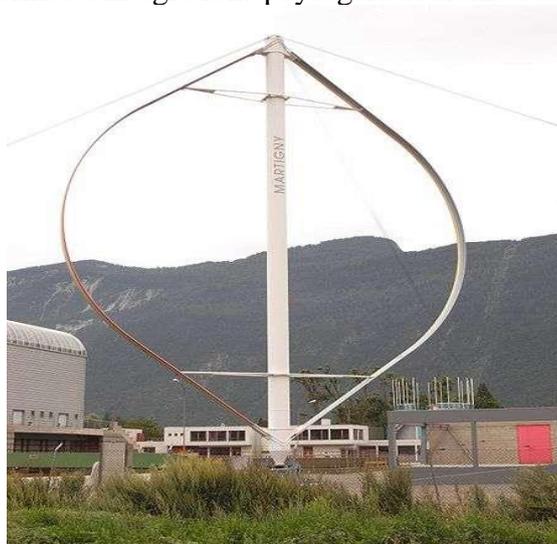


Figure.1.5 Éolienne à axe vertical de type Darrieus

- Type à voilure tournante.

Les éoliennes à voilure tournante sont équipées de pales dont l'orientation dynamique permet de mieux exploiter l'énergie du vent, à la manière d'un navire à voile.

Ce mécanisme rend possible l'exploitation de vents plus puissants que ceux que peuvent exploiter les éoliennes classiques à trois pales. En outre, le bruit généré est fortement réduit par ce système.



Figure.1.6 Éolienne à axe vertical et à voilure tournante

1.7. Principaux composants d'une éolienne horizontale:

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux :

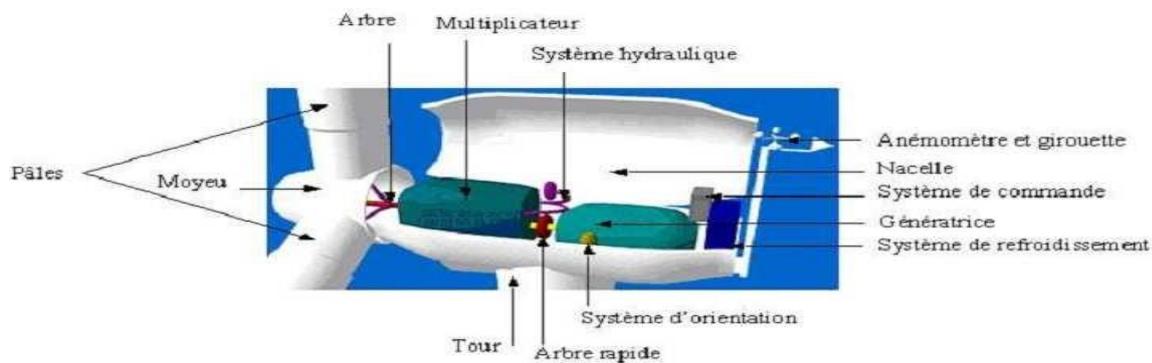


Figure 1.7 Eléments constituant une éolienne

- La tour :

C'est un élément porteur généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique ou fabriqué en béton, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près

du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur est disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle [2].

-La nacelle :

La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie en énergie électrique, et divers actionneur de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (1.7) [7, 8,9].

La nacelle est constituée par des différents éléments:

-Système de commande

Le système de commande- contrôle est un ordinateur qui contrôle les différentes composantes de l'éolienne. En cas de la défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur), le système arrête automatiquement l'éolienne.

-Multiplicateur :

Le rotor tourne d'environ de 22 tour/min. la génératrice elle doit tourner à quelque 1500 tour/min, le multiplicateur accélère donc les 22 tours à 1500 tours.

-Le système d'orientation :

Le grand système d'orientation est monté sur la tour. La roue dentée du moteur d'orientation entraîner la grande couronne dentée et orienter la nacelle avec le rotor par rapport à la direction de vent.

-Génératrice :

La génératrice produit l'électricité en tournant. Le courant est conduit à travers la tour par des câbles électriques.

-Anémomètre

Mesuré la vitesse du vent. Il informe conditionnellement le système de commande de la vitesse du vent.

1.8. types des machines utilisées dans un system éolien

Dans cette partie, nous dresserons une liste du système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone. Nous avons subdivisé ces systèmes en deux grandes familles ; il s'agit des éoliennes fonctionnant a vitesse fixe et celles fonctionnant a vitesse variable.

1.8.1. Eoliennes à vitesse fixe

1.8.1.1. Eoliennes à vitesse fixe Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les premières éoliennes de grandes puissances mises en œuvre, reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (fig 1.8). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. [10], [11].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche de synchronisme (point $g=0$)[12]. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure 1.8).

La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la (voir la figure 1.8) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

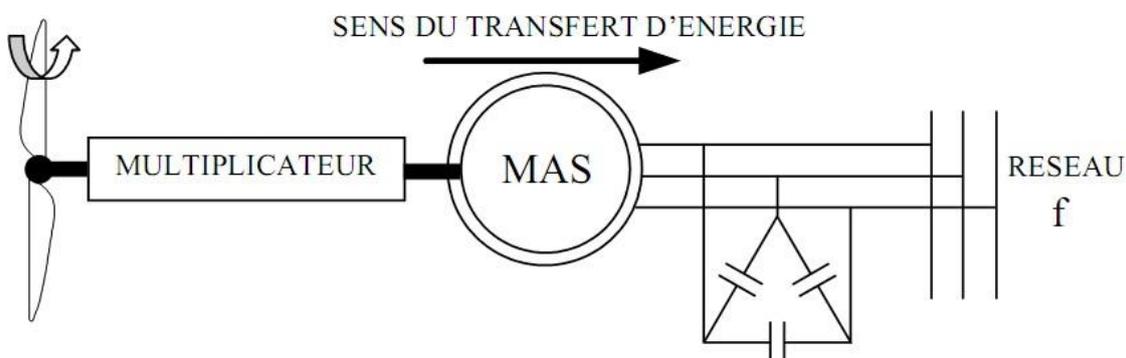


Figure 1.8: Eolienne à base d'une MAS connecté réseau

Permet ses avantages [13] :

- ✓ Elles possèdent un système électrique simple, car elles n'ont pas besoin d'un système de commande.
- ✓ Elles ont une très grande fiabilité.
- ✓ Il ya peu de probabilités d'excitation de fréquence de résonance des éléments d'une éolienne.
- ✓ Elles sont moins chères.

Ses inconvénients sont:

- ✓ La puissance extraite est non optimisée.
- ✓ La nécessité de maintenance de la boîte à vitesse.
- ✓ Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive.
- ✓ La magnétisation de la machine est imposée par le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses du vent élevées.

La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse du vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

1.8.1.2.Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (voir la figure 1.9).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses du vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [14].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente

le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

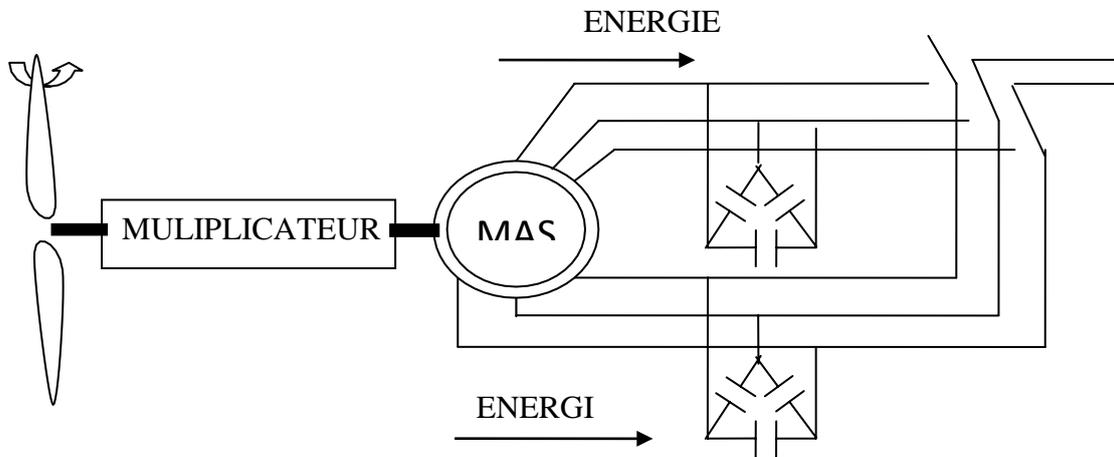


Figure 1. 9:Éolienne à base d'une machine asynchrone à double stator

1.8.2. Éoliennes à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, d'un multiplicateur, d'un générateur et d'un convertisseur électronique de puissance destiné à assurer les conditions de couplage au réseau.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparées aux éoliennes à vitesse fixe sont les suivants [11], [15] :

- ✓ Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité .
- ✓ Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique) .
- ✓ Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses du vent élevées.
- ✓ En conséquence pour de faibles vitesses de vent, l'angle de d'orientation des pales devient .fixe .
- ✓ Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance (vitesse lente) .
- ✓ Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique .

✓ Elles sont moins exigeantes en termes d'entretien.

Ses inconvénients sont : [13], [15]

✓ Utilisation de machines spéciales .

✓ Convertisseur de puissance complexe .

✓ Nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence .

✓ Gestion de transfert de puissance entre le redresseur MLI et l'onduleur (régulation du bus continu) et le placement au point de puissance optimale de l'éolienne.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent à vitesse variable.

1.8.2.1.Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la (figure 1.10) Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. L'onduleur permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus,

la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur présenté par la (figure 1.10).

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine, le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire

leur durée de vie [16], [17]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

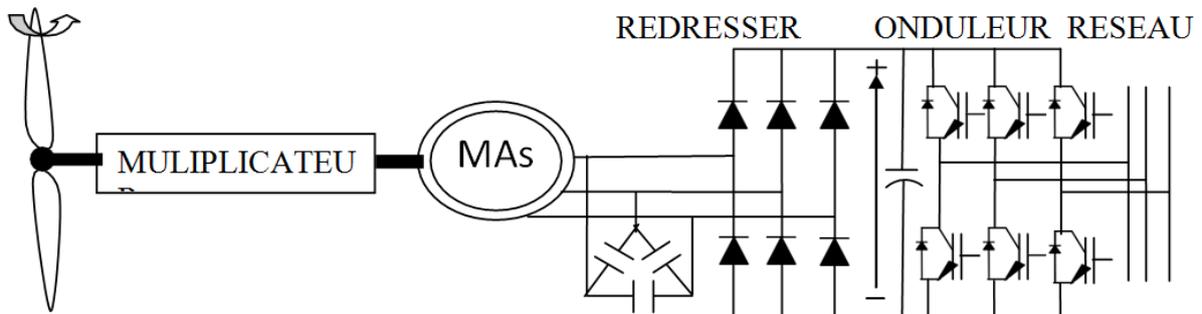


Figure 1.10 : Eolienne basé sur une machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

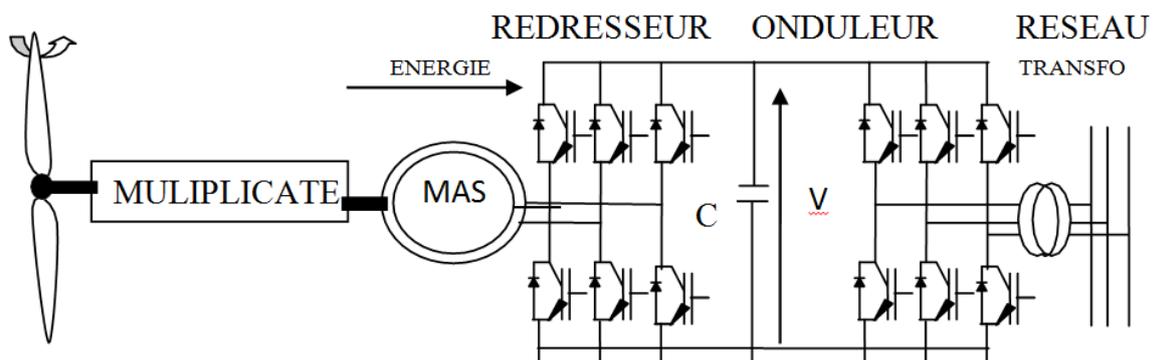


Figure 1.11 : Eolienne basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

1.8.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine à rotor bobiné, elle présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones à cage et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. La MADA fera l'objet d'une étude détaillée dans les chapitres 2, de ce mémoire.

1.8.2.3. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure 1.12), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou à GTO [16],[18].

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [19], [20].

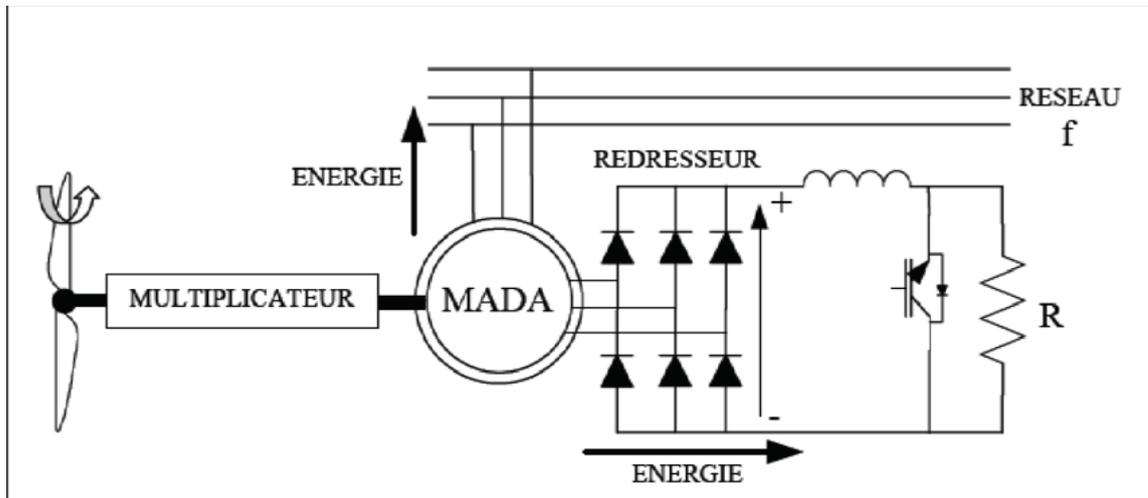


Figure. 1.12 : Eolienne basé sur une MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

1.8.2.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, figure 1.13) [16], [22].

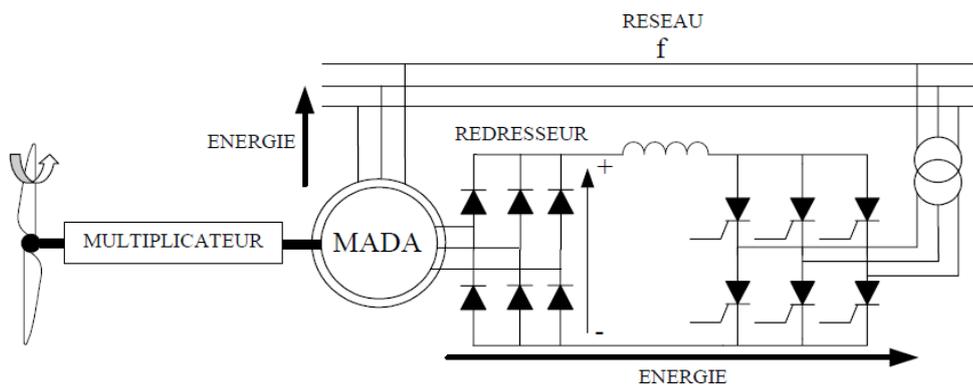


Figure. 1.13 : Eolienne basée sur une MADA, structure de Kramer

1.8.2.5.Machine asynchrone à double alimentation-structure de Scherbius avec convertisseurs MLI-

Le schéma de la (figure 1.14) montre la structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. Cette structure possède le net avantage de permettre un transfert bidirectionnel de puissance [16],[23].

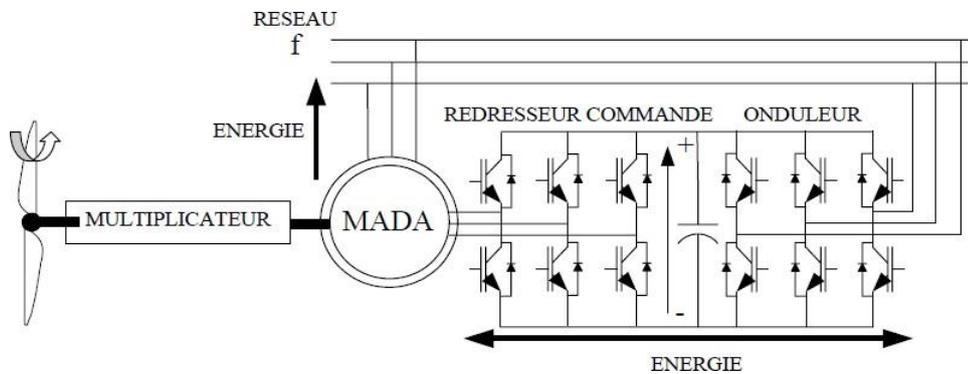


Figure. 1.14 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

1.9.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

- Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède 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 minimales.

-Inconvénients

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

1.10.Modélisation d'une turbine éolienne

1.10.1.Modélisation de la turbine

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse turbine , qui entraînera une génératrice (GADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .La figure (1.15) montre le schéma d'une turbine éolienne.

1.10.2.La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R, est donnée parla relation suivante [24],[25] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \tag{1.1}$$

ρ : masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale) .

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

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale .

V_{vent} : est la vitesse du vent (en m/s).

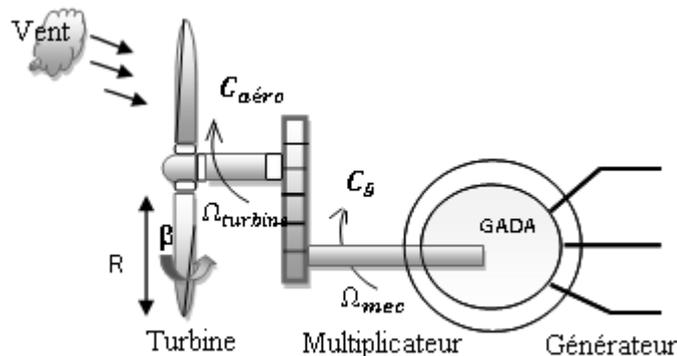


Figure 1.15: Schéma de la turbine éolienne.

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

$$P_{aéro} = C_p \cdot P_v = C_p (\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \tag{1.2}$$

λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales

Ω_{turbi} , R, et la vitesse du vent V.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine}}{v} \cdot R \quad (1.3)$$

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

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (1.4)$$

1.10.3. Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (1.16) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β pour une éolienne de 1.5 MW prise comme exemple d'application dans cette étude .

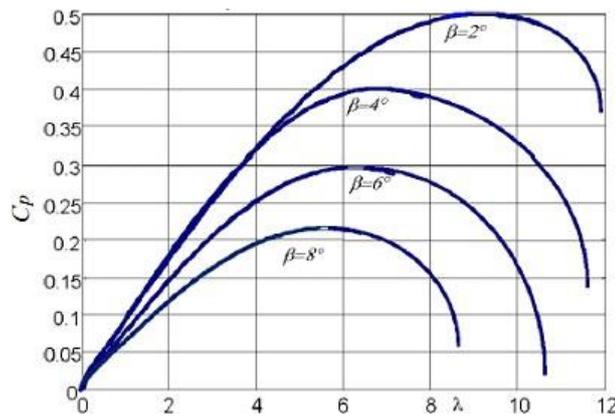


Figure 1.16 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW.

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [26] :

$$c_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(18.5 - 0.3\beta)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (1.5)$$

β : angle d'orientation des pales ;

1.10.4. Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \tag{1.6}$$

C_g : couple issu du multiplicateur .

$C_{aéro}$: couple aerodynamique.

G:Gain multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{1.7}$$

1.10.5.Equation dynamique de l'arbre

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

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couple} = C_{mec} \tag{1.8}$$

J_t : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{mec} : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice C , le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{1.9}$$

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient defrottements visqueux f :

$$C_{vis} = F \cdot \Omega_{mec} \tag{1.10}$$

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (1.17) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

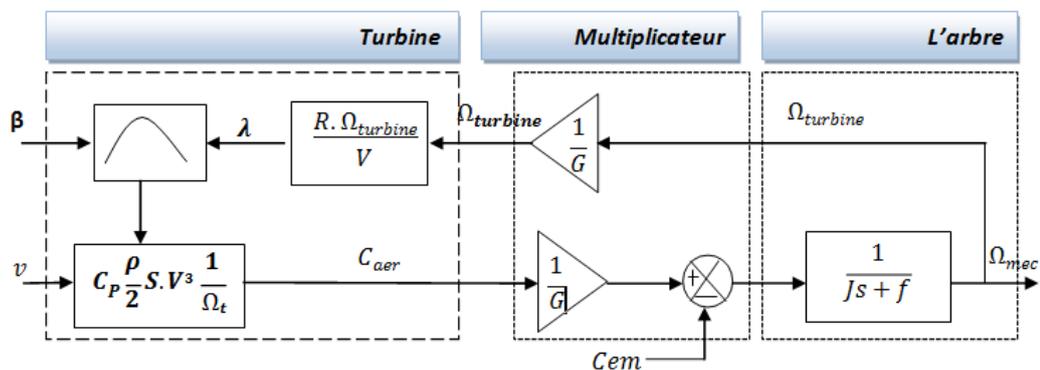


Figure 1.17 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents systèmes utilisant la machine asynchrone soit en vitesse fixe ou en vitesse variable ainsi que les différentes structures de la machines asynchrone à double alimentation. L'objectif du projet consiste à utiliser la commande en puissance de cette dernière.

La seconde partie a présenté la modélisation du système éolien, en passant par le modèle aérodynamique dont l'expression de la vitesse du vent, à celui de la partie mécanique du système qui nous ont permis d'établir l'équation dynamique de l'arbre mécanique et nous ont permis de présenter le schéma bloc de la modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

CHAPITRE : 02

ETUDE ET MODELISATION DE LA MADA

2.1.Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent les différentes technologies de génératrices éoliennes proposées sur le marché dont les éoliennes à base des génératrices asynchrones à double alimentation qui permet le fonctionnement sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude sur la machine asynchrone à double alimentation MADA, concernant sa structure, son principe et mode de fonctionnement, afin d'évaluer les qualités apportés par cette machine.

Ensuite, la mise sous forme d'un modèle mathématique de la machine est nécessaire pour son étude et sa commande dans les différents régimes de fonctionnement. On s'intéresse essentiellement à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) afin d'élaborer un modèle simple qui nous permettra de décrire le comportement de cette machine.

2.2.Présentation de système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation:

Actuellement la majorité des progrès éoliens (supérieur à 1MW) reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). La MADA n'est qu'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par le stator et le rotor. Ce dispositif permet le fonctionnement à vitesse variable et a l'avantage d'utiliser un convertisseur dimensionné seulement à un tiers de la puissance fournie (30% de la puissance nominale fournie au réseau)[27].

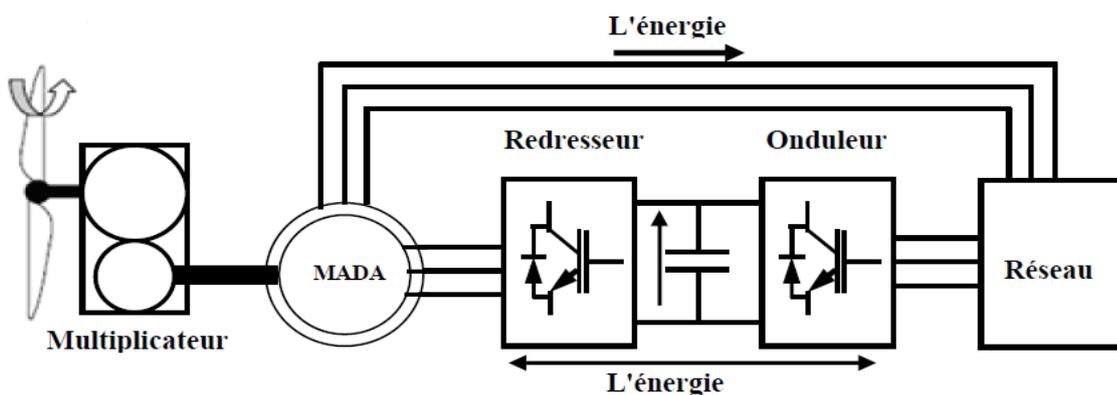


Figure. 2.1 : Eolienne à base d'une MADA à vitesse variable

Dans notre travail, on s'intéressera uniquement à la modélisation et la commande de la MADA au mode génératrice, la modélisation de l'interface électronique ne sera pas abordé.

2.3. Description de la MADA

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

Pour être classée comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération à vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator [27] [28].

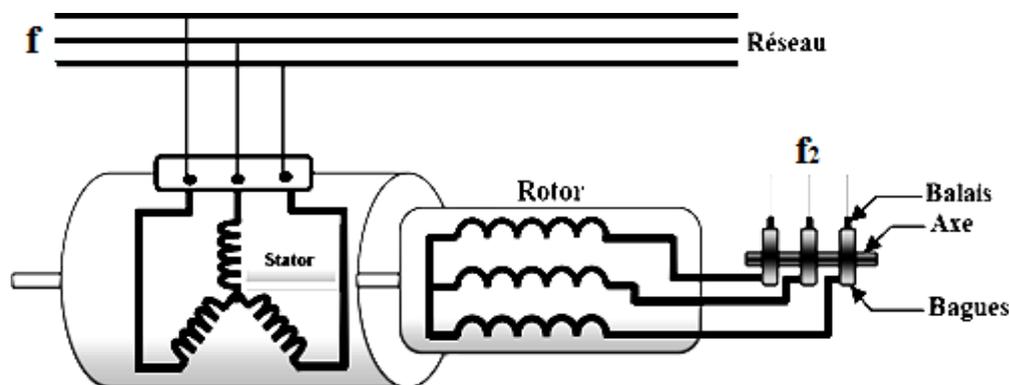


Figure.2.2 : Schéma d'une MADA à rotor bobiné

2.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation

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 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 $= 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω 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 :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \tag{2.1}$$

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

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 enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à

$$\text{partir de } \omega = 2\pi f \quad \text{c st à dire : } f_r = g \cdot f_s \quad (2.2)$$

2.5. Classification des machines à double alimentation

En effet, la dénomination Machine à double alimentation concerne aussi bien le fonctionnement en mode générateur que le fonctionnement en mode moteur et peut s'adresser à une multitude de configurations. Nous pourrions trouver un recensement de certains travaux où les MADA sont classées suivant leur architecture. Dans chacune des classes, les auteurs rappellent les équations fondamentales, et les principales applications. On ne citera ici que les six grandes classes qu'ils distinguent [29]:

a. MADA simple dont les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (2.3) présente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.

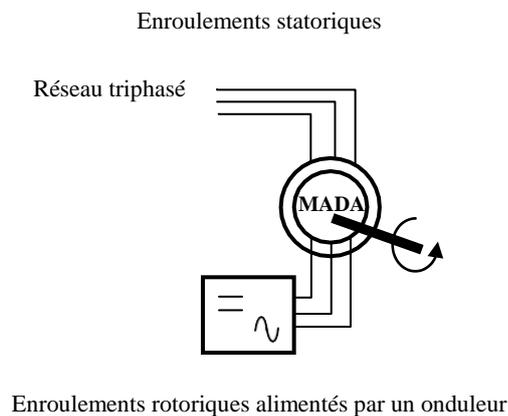


Figure.2.3: Schéma de principe d'une simple MADA

b. MADA en "cascade" (Cascaded Doubly Fed Induction Machine), deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, la figure (.2.4) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées.

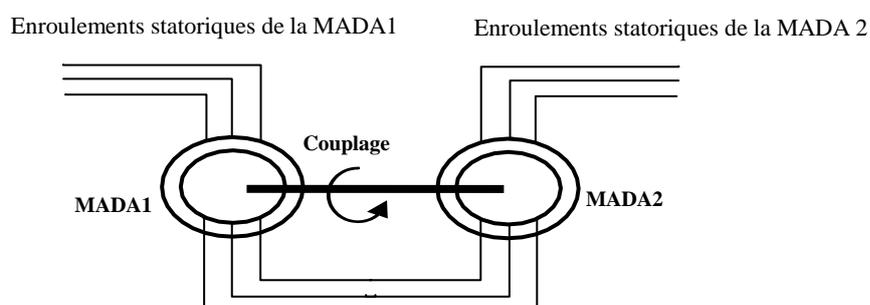


Figure.2.4: Schéma de principe de deux MADA en cascade

c. MADA cascadée à un repère, il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines. Une machine a son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur. (Single Frame Cascade Doubly Fed Induction Machine).

d. MADA sans balai, machine très proche de la précédente sauf que cette fois ci, les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil. (Brushless Doubly Fed Machine). Nous présentons sur la figure (2.5) un schéma de principe de ce type de machine.

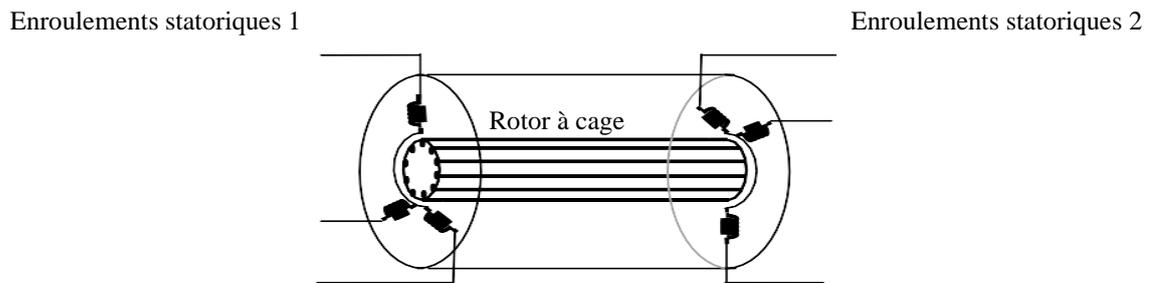


Figure 2.5: Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

e. MADA à réluctance, machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à réluctance variable. Elle est nommée « Doubly Fed Reluctance Machine».

f. MADA "tandem" (Tandem Induction Machine), machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques. Un stator est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

2 .6.Domaine d’application de la MADA :

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [30].

2 .6.1.Fonctionnement moteur dans les applications industriels

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L utilisation d une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d environ 70% [31].

La MADA peut être utilisée aussi dans d autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [32]:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...
- On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

2.6.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure (2.6),
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun,
- Deux cyclo-convertisseurs.

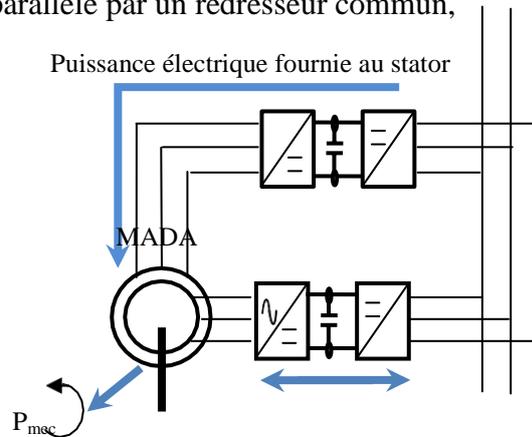


Figure 2.6: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

2.6.3. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cyclo-convertisseur ou une association redresseur-onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure (2.7) présente le schéma de principe de cette catégorie [33].

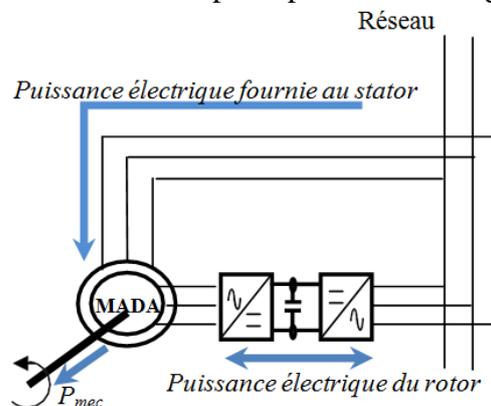


Figure 2.7: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

2.6.4. Systèmes de génération éolienne à vitesse variable :

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Dans les systèmes éoliens de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme dont l'objectif d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20-30 % de toute la puissance du système, et qui permet de minimiser les pertes et réduire le coût de celui-ci [33].

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA, est représentée par la figure (2.8). Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [30].

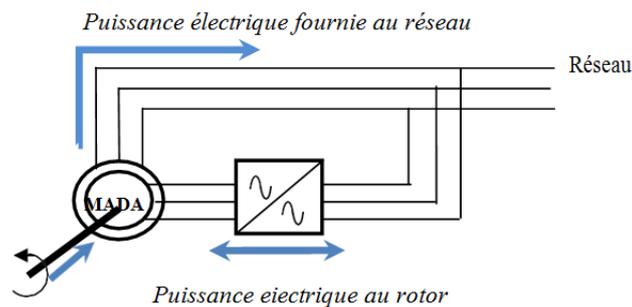


Figure 2.8: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

2.7. Modes de fonctionnement d'une MADA:

Il a noté que la machine asynchrone à double alimentation « MADA » peut fonctionner à la fois en mode moteur ou génératrice. C'est la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ($0 < g < 1$) ou génératrice ($-1 < g < 0$).

L'avantage de la MADA est qu'il suffit de commandé les courant rotoriques permettant de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine pour avoir la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

2.7. 1.Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [31]

La puissance est fournie par le réseau au stator.

La puissance de glissement est renvoyée au réseau.

La vitesse de rotation est inférieure à la vitesse synchronisme ($g > 0$).

La machine asynchrone à cage peut fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

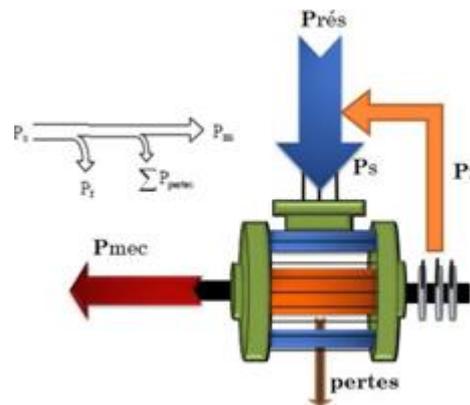


Figure. 2.9 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

Près : Puissance de réseau.

Pmec : Puissance mécanique.

Pr : Puissance de rotor.

Ps : Puissance de stator.

2.7. 2.Fonctionnement moteur en mode hyper-synchrone [32]:

La puissance fournie par le réseau alimente à la fois le rotor et le stator.

La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme ($g < 0$).

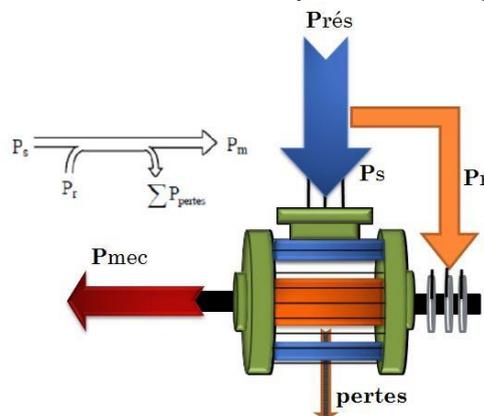


Figure. 2.10 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

2.7.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone [31]:

La puissance est fournie au réseau par le stator .

Une partie de la puissance du réseau est absorbée par le rotor .

La vitesse de rotation est en dessous de la vitesse de synchronisme ($g > 0$).

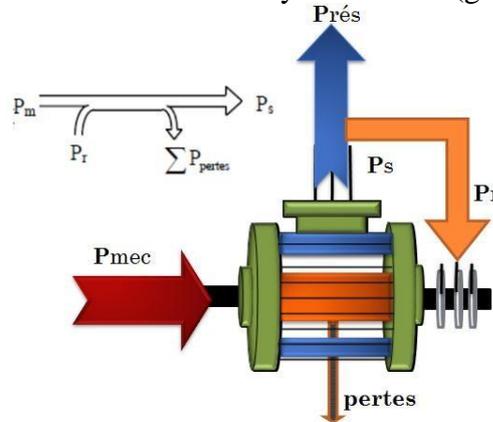


Figure.2.11 : Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

2.7.4. Fonctionnement génératrice en mode hyper-synchrone [33]:

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 ($g < 0$).

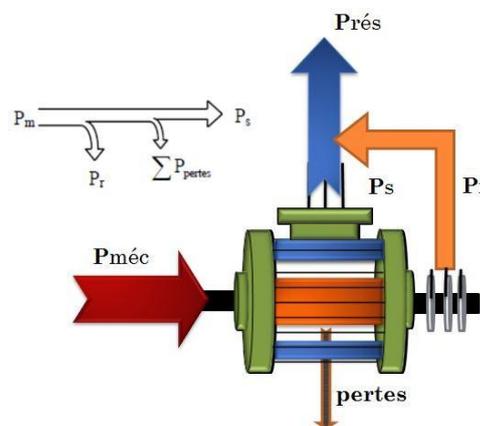


Figure.2.12: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

2.8 .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.

***Avantages de la MADA**

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- 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.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- 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.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable.
- permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [36], [37], [38]. [39].

***Inconvénients de la MADA :**

- Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Nous utilisons un nombre des convertisseurs (parfois on utilise deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (toujours un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent,
- les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [36], [37], [38], [39].

2.9.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice

Dans cette partie, le travail que nous allons présenter, concerne la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne et fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'extraire à tout instant le maximum de la puissance quelle que soit la vitesse du vent.

2.9.1. Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle de la MADA, en vue de sa commande, on prend quelques hypothèses simplificatrices, qui sont [41], [42], [43]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La machine est symétrique.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté il en résulte que les pertes fer et pertes par hystérésis (les courants de Foucault) sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans chaque phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

2.9.2.Référentiel de travail

Un référentiel de travail est un système d'axe associé à sa vitesse de rotation. Ce changement de repère de travail a pour but de simplifier les équations, en rendant notamment la matrice inductance à coefficients constants.

Les équations de la MADA peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié. Il existe trois choix importants, on peut fixer le référentiel (d, q) :

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant

On définit :

ω_s : Vitesse du champ tournant ou pulsation des courants statoriques.

ω_r : Vitesse électrique du rotor (rd/s). $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ Glissement

g. ω_s : Pulsations des courants rotoriques.

On pose :

$$\frac{d\theta_s - d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (2.3)$$

2.9.2.1.référentiel lié au stator

Ce référentiel est utilisé pour étudier les variations importantes de la vitesse rotation.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0; \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (2.4)$$

2.9.2.2.référentiel lié au rotor

Ce référentiel est lié au rotor, donc il tourne à la même vitesse que lui. Un observateur placé sur ce référentiel verrait la vitesse de rotation constante. Ce référentiel est donc préférable pour l'étude des systèmes où la vitesse de rotation peut être considérée comme constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0; \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r \quad (2.5)$$

2.9.2.3.référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est lié au champ tournant, donc il tourne à la vitesse de synchronisme. Il est préférable pour l'étude des systèmes où la fréquence d'alimentation est constante. Il est aussi utilisé dans l'alimentation des moteurs à fréquence variable, lorsque l'on désire étudier sa

fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations. IL est donc preferable de travaille dans ce repere lors d'une étude de la commande des machine.vu lavantage que importe ce derniere referentieie, nous allons iutliser dans la suite de notre travaille.

2.10.Modèle de la MADA dans le repère a,b,c

L'enroulement des trois phases statoriques et rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué dans la figure(2.13)

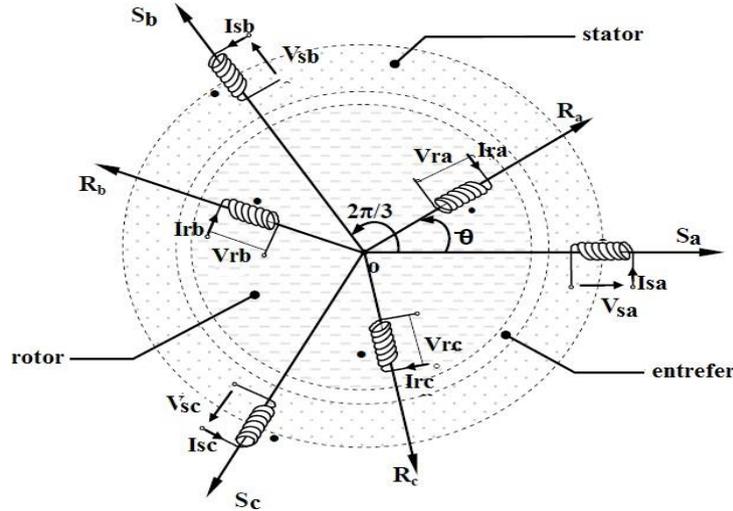


Figure 2.13 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

2.10.1. Equations électriques dans le repère a, b, c

Le modèle de la MADA comporte trois équations statoriques et trois équations rotoriques :

$$\text{equations statorique} \begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{equations rotorique} \begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (2.7)$$

Les équations de la MADA peuvent être représentées sous forme matricielle comme suit

Au stator

Les équations de la MADA peuvent être représentées sous forme matricielle comme suit

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$[V_{as} V_{bs} V_{cs}]$, $[V_{ar} V_{br} V_{cr}]$; Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[I_{as} I_{bs} I_{cs}]$, $[I_{ar} I_{br} I_{cr}]$; Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\varphi_a \varphi_{bs} \varphi_c]$, $[\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

R_s et R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

2.10.2. Equations magnétiques dans le repère a, b, c:

Coté stator:

$$[\boldsymbol{\varphi}_s] = [\mathbf{L}_s][\mathbf{I}_s] + [\mathbf{M}_{sr}][\mathbf{I}_r] \quad (2.10)$$

Coté rotor:

$$[\boldsymbol{\varphi}_r] = [\mathbf{L}_r][\mathbf{I}_r] + [\mathbf{M}_{rs}][\mathbf{I}_s] \quad (2.11)$$

Les équations en notation matricielles :

Cote stator:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_{as} \\ \boldsymbol{\varphi}_{bs} \\ \boldsymbol{\varphi}_{cs} \end{bmatrix} = [\mathbf{L}_s] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{as} \\ \mathbf{I}_{bs} \\ \mathbf{I}_{cs} \end{bmatrix} + [\mathbf{M}_{sr}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ar} \\ \mathbf{I}_{br} \\ \mathbf{I}_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Cote rotor:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_{ar} \\ \boldsymbol{\varphi}_{br} \\ \boldsymbol{\varphi}_{cr} \end{bmatrix} = [\mathbf{L}_r] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ar} \\ \mathbf{I}_{br} \\ \mathbf{I}_{cr} \end{bmatrix} + [\mathbf{M}_{rs}] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{as} \\ \mathbf{I}_{bs} \\ \mathbf{I}_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[\mathbf{L}_{ss}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{I}_s & \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s & \mathbf{I}_s \end{bmatrix} [\mathbf{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{I}_r & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_r & \mathbf{I}_r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

L_s : inductance propre de la phase statorique.

L_r : inductance propre de la phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phases statorique.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_{sr} et M_{rs} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

En remplaçant le flux par ses expressions dans les équations (2-8) et (2-9), on obtient :

Au Stator:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [L_s] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = [R_r] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [L_r] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Equation mécanique:

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f. \Omega \quad (2.18)$$

J : moment d'inertie des masses tournantes (Kg.m²) f: Coefficient de frottement en (Nm.s/rad).

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA en (Nm) .

C_m : Couple moteur fourni par l'organe d'entraînement en (Nm) .

Ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor. Modèle de la MADA dans le repère d, q

2.10.3.Modèle de la MADA dans le repère d, q:

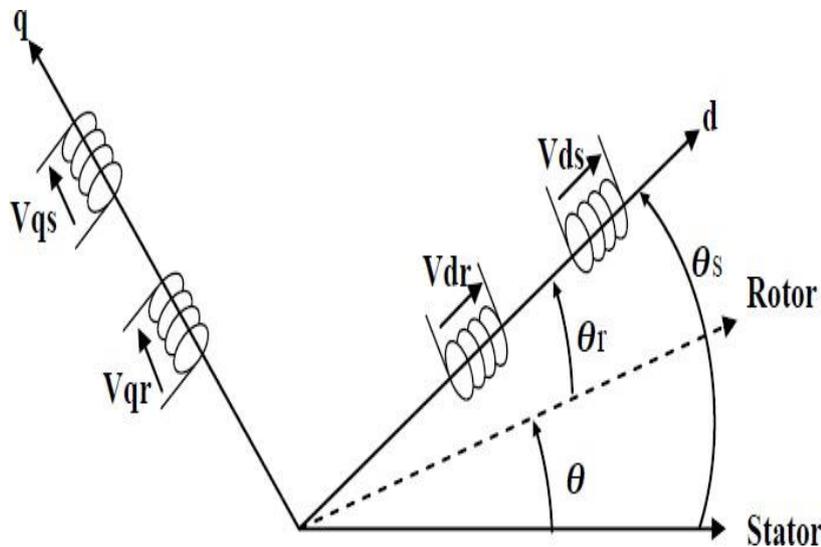


Figure 2.14: Représentation de la MADA dans les deux repères.

2.10.3.1.Application de transformation de Park à la MADA

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c en un système équivalent à deux enroulements biphasés

tournants d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système

transformé, l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan d, q . La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles.

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Son inverse est donnée par:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.10.3.2 Equations électriques dans le plan d et q

En appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électrique pour le stator et le rotor, on aura :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_{\text{coor}} \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_{\text{coor}} \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.21)$$

ω : Vitesse du système d'axe (d, q).

V_{ds} et V_{qs} : Les tensions statoriques dans le repère dq .

V_{dr} et V_{qr} : Les tensions rotoriques dans le repère dq .

I_{ds} et I_{qs} : Les courants statoriques dans le repère dq.

I_{dr} et I_{qr} : Les courants rotoriques dans le repère dq.

φ_{ds} et φ_{qs} : Les flux statoriques dans le repère dq.

φ_{dr} et φ_{qr} : Les flux rotoriques dans le repère dq.

R_s et R_r : Les résistances respectives des bobinages statoriques et rotoriques.

θ_s et θ_r : Les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les relations entre les flux et les courants sont exprimées par les équations suivantes:

flux stator et flux rotor:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.22)$$

2.10.4.Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d axes de référence qui permet d aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe.

A partir du système d axe (d, q) on peut avoir d autres axes qui sont des cas particuliers.

Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

- Référentiel fixé par rapport au stator : $\omega_{coord}=0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor : $\omega_{coord} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant : $\omega_{coord} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

2.10.5.Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant :

On exprime les tensions par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.23)$$

2.10.6 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park:

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot n_p \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} + \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (2.24)$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statique et rotorique sont données par :

Puissance statique :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{qs} - V_{ds} I_{ds}) \end{cases} \quad (2.25)$$

Puissance rotorique :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} I_{qr} - V_{dr} I_{dr}) \end{cases} \quad (2.26)$$

2.10.7.Mise sous forme d'équation d'état :

Les équations (2.22) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = [\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle:

$$\begin{cases} L \frac{dx}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (2.27)$$

Avec : $U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^t$, $B = [I]_{4 \times 4}$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s} (\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s} (\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

et

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\sigma = - \left(\frac{M^2}{L_s L_r} \right) \text{Coefficient de dispersion.}$$

ou

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.11.Conclusion

Ce chapitre a traité de la modélisation et simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi ce système éolien est le plus utilisé actuellement, notamment en raison des économies réalisées grâce au faible dimensionnement des convertisseurs statiques triphasés mis en œuvre

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé, dans lequel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans lequel les équations sont devenues à coefficients constants dans le temps. Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle en puissance de la MADA.

CHAPITRE : 03

**CONTROLE DES PUISSANCE ACTIVE ET
REACTIVE D'UN SYSTEM EOLIEN**

3.1 Introduction

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement génératrice.

3.2. Commande vectorielle de la machine

3.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la figure (3.1).[24]. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone Φ_s , Φ_r ou Φ_m au choix, afin d'obtenir un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux figure(3.1)[44].

Cependant, le développement des nouvelles technologies de semi-conducteurs et de convertisseurs électroniques a facilité l'application de nouveaux algorithmes de commande sur le modèle de la machine à courant alternatif dans le repère de Park, avec l'orientation du flux statorique ou du flux rotorique sur l'un des deux axes d ou q ce qui permet de découpler des grandeurs internes dans la machine en régime transitoire et permanent et de lui donner une meilleure place dans le domaine de la conversion d'énergie électrique-mécanique en tant que moteur avec le contrôle indépendant du flux et du couple, ou mécanique-électrique en tant que générateur avec le contrôle indépendant des puissances active et réactive[43].

Prenons l'expressions du couple électromagnétique trouvées dans le chapitre précédent, par l'équation (3 .1) suivante :

$$C_e = p(\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (3.1)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\Phi_s = \Phi_{ds} \Rightarrow \Phi_{qs} = 0 \quad (3.2)$$

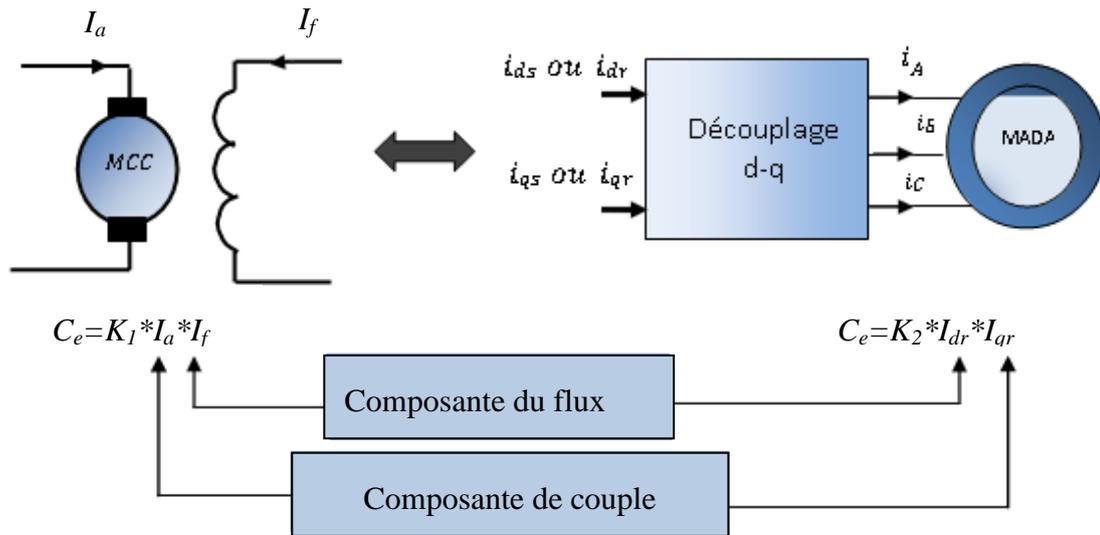


Figure. 3.1: Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

Donc l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_e = p\Phi_{ds} \cdot i_{qs} \tag{3.3}$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple qui est l'objectif de la commande vectorielle [44].

3.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques [45]. L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (3.2)

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\Phi_{qs} = 0$, $\Phi_{ds} = \Phi_s$) [45], [44], [26], [43] et le modèle de la machine sera plus simple comme il est présenté dans les équations (3.3).

3.2.3. Expressions des puissances active et réactive statoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{qs} - V_{ds} i_{ds} \end{cases} \quad (3.11)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme [46],[44],[47] :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (3.12)$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques i_{qs} et i_{ds} respectivement, sur les quels nous avons au qu'une 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 [46] :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.13)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s v_s} - \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (3.14)$$

Il ressort de l'expression (3.14) 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 proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ impose par le réseau.

3.2.4. Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (3.8-3.9) les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s v_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.15)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système on trouve:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g_{\omega_s} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g_{\omega_s} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g_{\omega_s} \frac{M \cdot v_s}{\omega_s v_s} \end{cases} \quad (3.16)$$

A partir des systèmes d'équations (3.14) et (3.16), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

L'expression $g_{\omega_s}(L_r - M^2)$ 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.

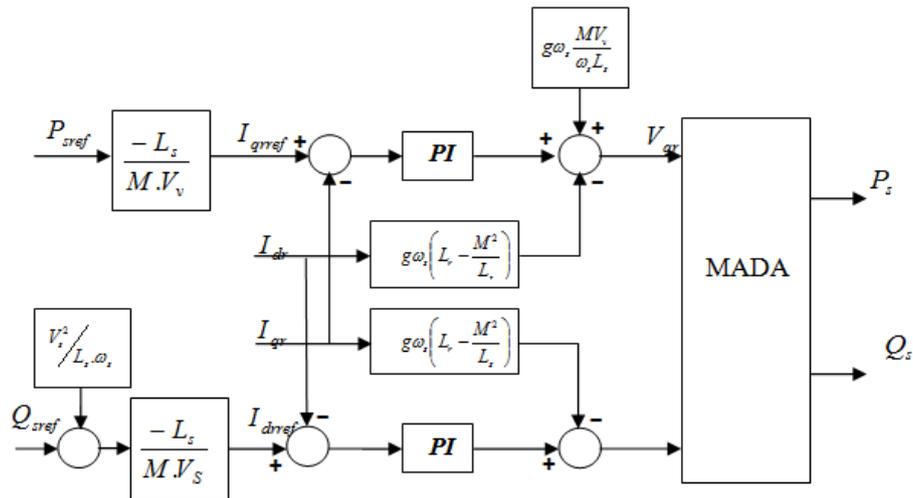


Figure.3.3 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension

3.3.Stratégie de commande de la turbine éolienne

On distingue quatre zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable comme l'indique

la figure (3.4) concernant une éolienne de 1.5 MW. La première zone concerne la période de démarrage, la deuxième est la zone d'extraction de la puissance maximale "MPPT", la troisième zone est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale et la quatrième à la limitation de la puissance. Puisque nous sommes intéressés à la deuxième zone de fonctionnement, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant fixe, on ajuste rotoriquement le couple électromagnétique de la génératrice afin de régler la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne λ à sa valeur optimale et le coefficient de puissance C_P à sa valeur maximale[43].

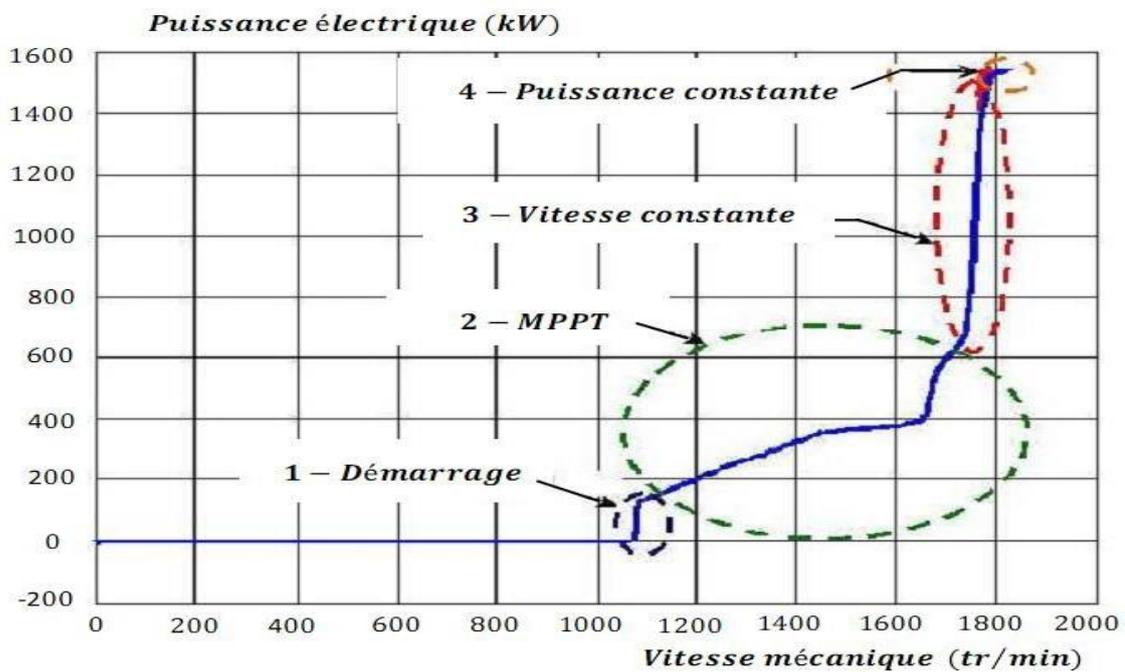


Figure. 3.4 : La puissance électrique en fonction de la vitesse d'uneéolienne de 1.5 MW.

3.3.1Techniques d'extraction du maximum de la puissance

3.3.1.1 .Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse [26]

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux ,donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé està tout instant égale à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em} - C_{ref} \tag{3.17}$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em}) \quad (3.18)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence le couple électromagnétique de référence

C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{em} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.19)$$

PI : est le régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence ;

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine-ref} \quad (3.20)$$

selon la figure(3.5) La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{CPmax} = 9$ (à β constant et égal à 2°) permettant d'obtenir la valeur maximale du $C_{Pmax} = 0.5$. la figure (3.5) représente le schéma bloc de cette maximisation.

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{CPmax} \cdot v}{R} \quad (3.21)$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.22)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul.

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), on obtient :

$$C_g = C_{em} \quad (3.23)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aer_estimé}}{G} \quad (3.24)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique .

$$C_{aer_estimé} = C_P \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{V^3_{estimé}}{\Omega_{turbine_estimé}} \quad (3.25)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine_estimé}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (3.26)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenu :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (3.27)$$

En regroupant ces quatre équations:

$$C_{em-ref} = \frac{C_P}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (3.28)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{Cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} figure (3.4). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_P}{\lambda^3 C_{pmax}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (3.29)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice :

$$C_{em_ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (3.30)$$

$$A = \frac{C_P}{\lambda_{CPmax}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \tag{3.31}$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée a la figure (3.6).

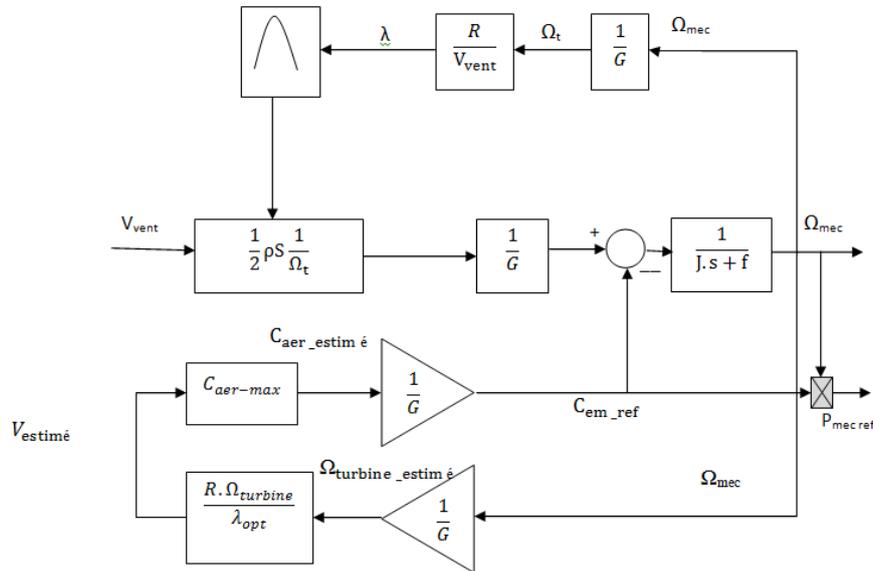


Figure. 3.6 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

3.4. Modele de l'onduleur de tension a deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfait figure (3.7).

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_b, S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

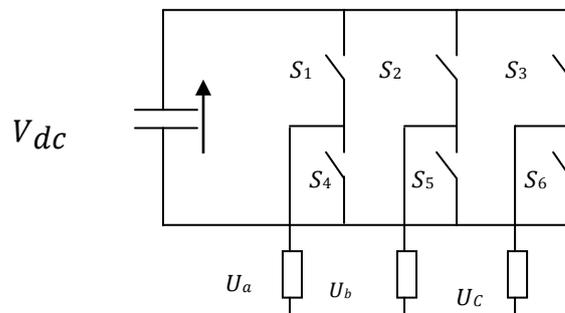


Figure. 3.7 : Onduleur de tension à deux niveaux.

➤ Branche1

$S_a = 0$ si S_1 est en position off et S_4 est à on

$S_a = 1$ si S_1 est en position on et S_4 est à off

➤ **Branche2**

$S_b = 0$ si S_2 est en position off et S_5 est à on

$S_b = 1$ si S_2 est en position on et S_5 est à off

➤ **Branche3**

$S_c = 0$ si S_3 est en position off et S_6 est à on

$S_c = 1$ si S_3 est en position on et S_6 est à off

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

Si on prend en compte l'équilibre des tensions : $U_a + U_b + U_c = 0$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit:

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - u_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - u_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - u_{bc}) \end{cases} \quad (3.32)$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3}(2s_a - s_b - s_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3}(2s_b - 2s_a - s_c) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3}(2s_c - s_a - 2s_b) \end{cases} \quad (3.33)$$

Ou encore sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de sortie.

3.5. Résultats de simulation

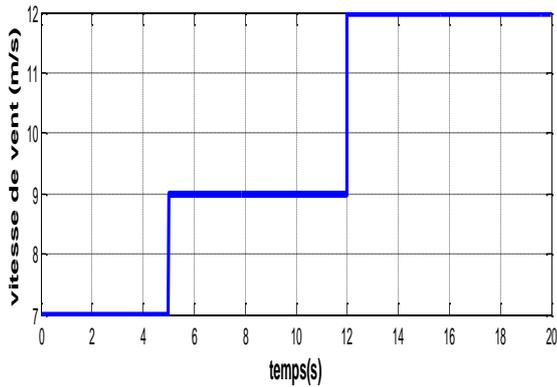
3.5.1 . Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons

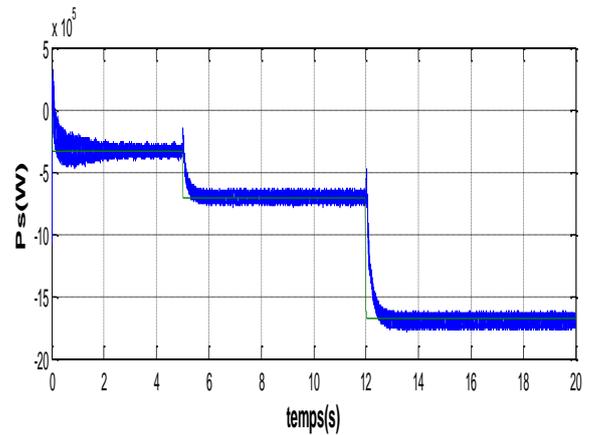
On a effectue le schéma bloc de la CMG de la MADA avec une variation de la vitesse suivant:

Echelon comme montre de 0 à 4.5 s une vitesse de 7m/s --- de 4.5 à 12 s une vitesse de 9m/s

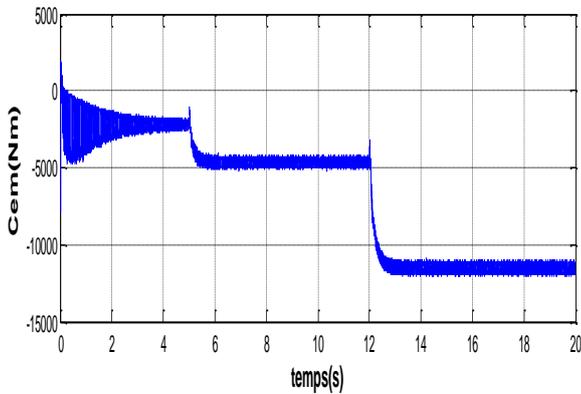
de 12 à 20 s une vitesse de 12 m/s



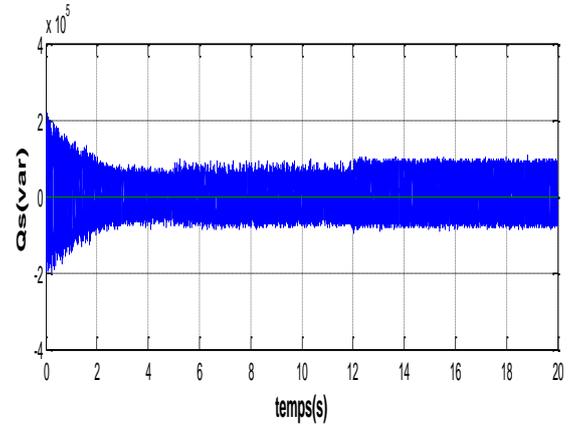
Figure(3.8):le vitesse de vent (m/s)



Figure(3.9): les puissance active (w)



Figure(3.10): couple electromagnetique(N.m)



Figure(3.11): les puissance reactive(var)

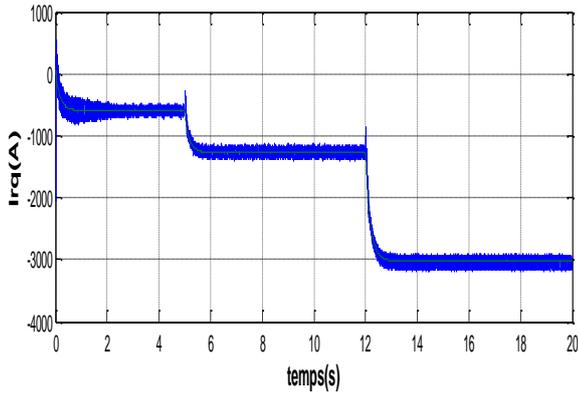


Figure (3.12): le courant rotorique a laxe q

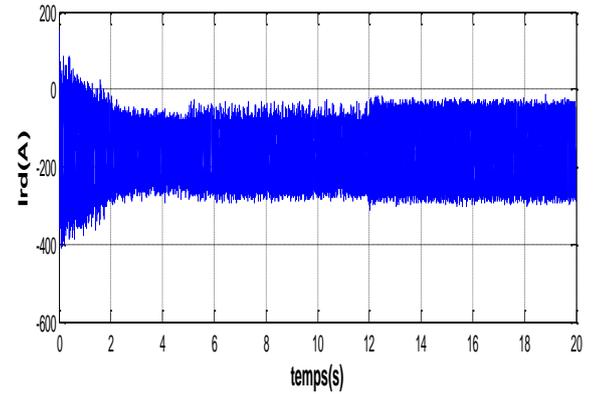
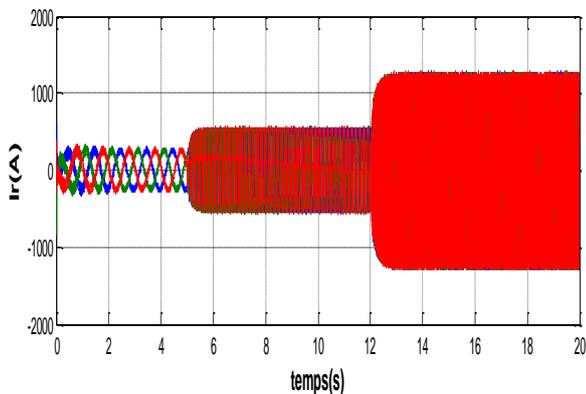
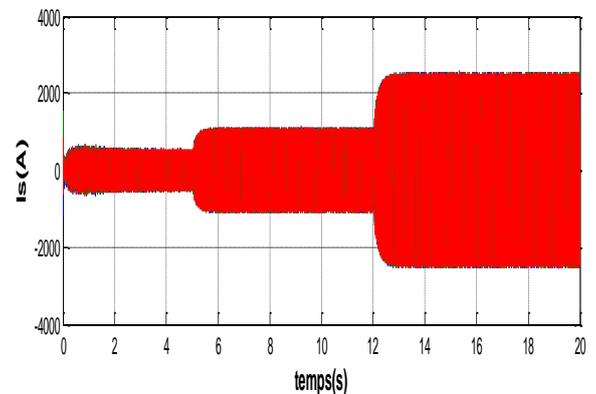


Figure (3.13): le courant rotorique a laxe d



Figure(3.14): les courant rotorique(A)



Figure(3.15): les courant statorique(A)

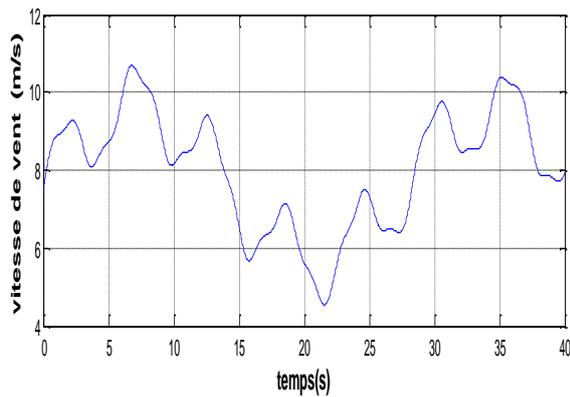
Les figures (3.8—3.9), montrent que les puissances active de la machine dans le cas régulateur PI et la vitesse de vent constant, allure la puissance active correspondant la forme de la vitesse de vent si le vent augmente la puissance générée augmente, mise il y a un retard dans la réponse presque egale 0.01s on remarque aussi un oscillation de le puissance autour de la référence

La puissance réactive figure (3.11) est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le $\cos(\varphi)$) et les deux sont découplées entre eux (la puissance active est commandée par la composante I_{qr} et la puissance réactive par le composante I_{dr}) La figure (3.12-3.13).

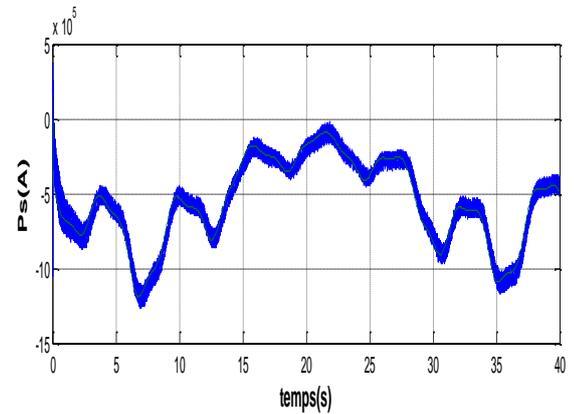
Avec un délai de réponse du tout les allure Généralement le temps de réponse de ce régulateur est 0.01s. On observe un peu de sensibilité à la variation des grandeurs de référence.

3.5.2. Essai 02 : fonctionnement à vitesse réelle:

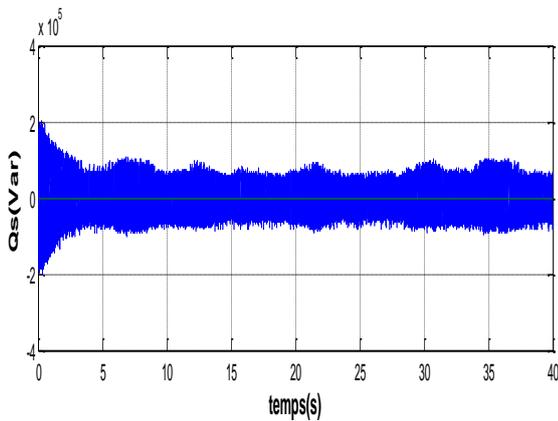
le profile de vent réel est stochastique et prend avec lui des fluctuations qui peuvent affecter notre système de commende, et pour montrer la validité de notre stratégie de commande contre ces fluctuations et les variations stochastique de vent, nous avons appliqué ce profile de vent à l'entrée de la commande vectorielle.



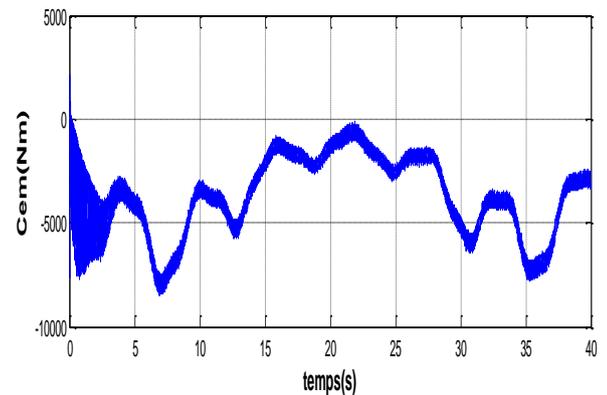
Figure(3.16) le vitesse de vent (m/s)



Figure(3.17): les puissance active (W)



Figure(3.18):les puissance reactive (var)



Figure(3.19): le couple electromagnetique (N. m)

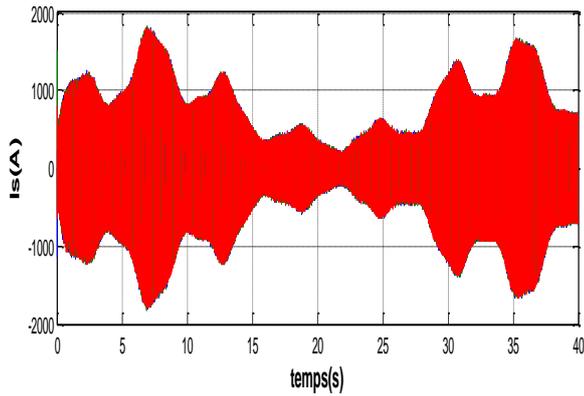
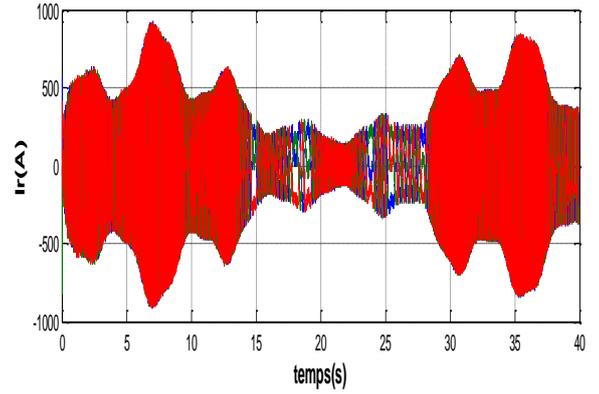
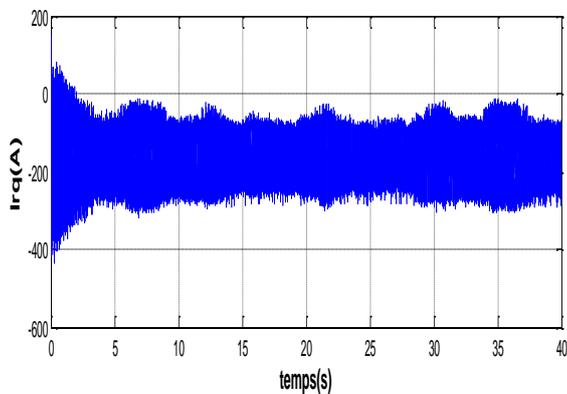


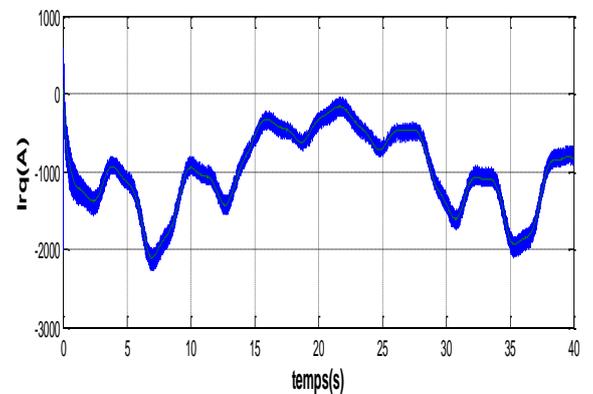
Figure (20): les courant statorique (A)



Figure(21): le courant rotorique(A)



Figure(22): le courant rotorique a laxe d



Figure(23):le courant rotorique a laxe q

La commande offre toujours une bonne poursuite des références appliquées, aussi elle garde le découplage entre le contrôle de la puissance active et réactive, le facteur de puissance reste unitaire ce qui justifie la qualité d'énergie fournie au réseau électrique. pour une application comme le notre, la commande vectorielle avec le régulateur PI sera très satisfaisante.

3.7.Conclusion

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

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Ce système est basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production de l'électricité commandée par un onduleur à deux niveaux.

On commence avec une étude théorique sur les énergies éolienne et nous exposons le principe de la conversion de l'énergie du vent a une énergie mécanique après a une énergie électrique. On choisi de travailler avec la commandée vectorielle direct dans le but de commander les puissances active et réactive.

Dans le troisième chapitre, nous avons expose le fonctionnement, la modélisation et la stratégie de commande de la machine la commande vectorielle par orientation du flux statorique a été utilisée pour contrôler les puissances active et réactive en se basant sur le modèle équivalent de Park, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices usuelles pour la modélisation de la MADA. les régulateurs PI ont été utilisés dans ce chapitre pour contrôler le facteur de puissance coté stator de la machine.

Les résultats de simulation montre une telle performance de la stratégie choisie qui reste un peu limite concernant la variation des paramètres interne de la machine, mais elle est très satisfaisante pour des applications comme la notre.

ce modeste travail peut être une introduction pour d'autre future travaux comme les perspectives suivantes :

*utilisation de technique MPPT avancee(logique floue....)

*des systemes hybrides energie eolienne avec d autre source (solaire,hydrolique,biomasse)

*realisation pratique si on trouve le materiel convenable

Résumé:

Dans ce travail présente une technique de contrôle des puissance de système conversion dénergie éolienne équipée dune génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification aux problèmes dincertitudes du modèle par lutilisation dune loi de commande non linéaire. Lobjectif est dappliquer cette commande pour contrôler léchange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone avec le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent lintérêt croissant dune telle commande dans les systèmes électriques.

Mots clés : génératrice asynchrone à double alimentation, mode glissant, commande vectorielle, contrôle des puissances

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

- [1]: F. INSTITUTE PRESS, " énergie éolienne", SCM, Paris France 1980.
- [2]: A .SAKI et M. BELAID, " étude de générateur asynchrone dans la production de l'énergie électrique par éolienne ", mémoire d'ingénieur d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2006.
- [3]: M. SIDDO et S. NOUHOU, " Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", mémoire d'ingénieur d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2007.
- [4]: Thomas Ackermoumm, "wind power in power systems, Royal institue of technology Stockholm", sweden 2005.
- [5]: [www.energie renouvelable.com](http://www.energie-renouvelable.com)
- [6]: **Adam MIRECKI**, « Etude comparative de chaînes de conversion d énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.
- [7]: **Ling PENG**, « Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension », thèses de doctorat, université de Lille, 2010.
- [8]: **Ameziane Sadek**, « implantation expérimentale de l'mppt pour un système de génération hybride solaire-éolien », thèse de magister, université de Batna, 2009.
- [9]: **Haritza Camblong**, « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat, école nationale supérieur d'art et métiers centre de bordeaux, 2003.
- [10]: A. Davigny, "*Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie*", thèse de doctorat, Université de Lille2007.
- [11]: M. Si Brahim, "*Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asunchrone*", Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Juin 2015.
- [12]: S. S. Murphy, O.P. Malik and A. K. Tandon, "*Analysis of self-excited induction generators*", IEE Generation, Transmission and Distribution, Volume 129, Part C, Number 6, November 1982, pp 260-265.
- [13]: H. Camblong, "*Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*" Thèse de

doctorat, Ecole nationale supérieure d'Arts et métiers centre de Bordeaux, décembre 2003.

[14]: A. Tounzi, *"Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité"*, Revue IEEE, Mars 2000, pp. 24-38.

[15]: B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, *"Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension"*, Revue REE, N°5, pp65-74, Mars 2005.

[16]: F. Poitiers, *"Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne"*, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[17]: D. Schreiber, *"State of art of variable speed wind turbines"*, 11th

International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.

[18]: S. Heier, *"Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems"*, Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998

[19]: A. Boyette, *"Control commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne"*, Thèse de doctorat, de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, France, Décembre 2006.

[20]: Y.HOCINI, *"Commande D'une Génératrice Pour Energie Eolienne"*, mémoire de Magistère, Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, Mais 2013.

[21]: L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack *"Analysis and modeling of the steady Statebehavior of the static Kramer induction generator"*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339

[22]: N. Akkari, *"contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation"*, Thèse de doctorat, Université de Batna, Juin 2010.

[24]: I. Hamzaoui, *"Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en Vue de Son Utilisation Comme Aérogénérateur"* Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, 2008 .

[25]: A. Davigny, *"Participation Aux Services Système de Fermes d'Eoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie"*, Thèse doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille. 2007.

- [26]: S. El Aimani, " Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension " , Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [27]: N. HAMDI, Mémoire de magister "*Modélisation et commande des génératrices éoliennes* ", Université Mentouri de Constantine, Janvier 2008.
- [28]: P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "*The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology*", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [29]: Z. Chen and F. Blaabjerg, "Wind Turbines—A Cost Effective Power Source", *Przeglad Elektrotechniczny* R. 80 NR 5/2004 pp 464-469 (Journal, ISSN 0033-2097).
- [30]: F.MERRAHI, Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Application à l'énergie éolienne, Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique ENP d'Alger ,2007.
- [31]: F.POITIERS, Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome –Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [32]: S. E. BEN ELGHALI, « Modélisation et Commande d'une hydrolienne Equipée d'une génératrice Asynchrone Double Alimentation », JGGE'08, 16- 17 Décembre 2008, Lyon (France).
- [33]: K. GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine.
- [36]: F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [37]: G. Salloum. « Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation». Thèse de doctorat Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [38]: Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ». Thèse de magister en électrotechnique, option commande électrique. Université Hadj lakhdar, BATNA, 2009.
- [39]: Y. Zhou, Pavol BAUER, Jan PIERIK, Jan A. FERREIRA. « Integration of large offshore wind farm - doubly fed induction generators with classical HVDC», 2009.
- [40]: B. Robyns, M. Esselin, "*Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator*", *Electromotion*, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.

[41]: M. MACHMOUM, "*contribution à l'étude et la commande numérique de l'ensemble cyclo-convertisseur triphasé-machine asynchrone à double alimentation*", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de LORRAINE, NANCY, 1989.

[42]: M.Y TACHAFINE, "*contribution à la modélisation et à l'étude des machines triphasées associées à des convertisseurs statiques*", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de LORRAINE, NANCY, 1986.

[43]: B.Toual , " Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable ", Mémoire de Magister Université de Batna 2010.

[44]: S. Metatla," Optimisation et Régulation des Puissances d'une Eolienne à Base d'une MADA " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique.2009.

[45]: F.Akel , "Etude et Realisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2009.

[46]: F.Merrahi , "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[47]: G.Aggoun,"Etude Qualitative de l'Association Convertisseur Machine Pour l'Entrainement Electrique d'un Système de Génération Eolienne " , Mémoire de Magister Université de Mouloud Mammeri , Tizi- Ouzou.

[48]: Hemdane ahmed abderrahmane ,si tayeb zohra etude dun chaine de conversion denergie eolienne, mémoire master academique universite mouloud mammeri de tizi-ouzou 2018

[49] :Ali benatallah etude , realisation et exprimention dun petite eolienne autonome de 5-10kw sur site adrar, CDER projet de rechrche ,Domene energie eolienne p 145.146

[50]: <http://www.connaissance-dennergies.org/fiches-pedagogique/energie-eolienne>.