

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar-
El-Oued
Faculté de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière: Génie Électrique
Spécialité: Commande Électriques

Thème

**Etude et simulation d'un système éolien base sur une
machine asynchrone à double alimentation**

Encadré par

Dr. Guediri Abdelkrim

Réalisé par

Berrahal Omar El Haythem

Lorbi Abdelkader

Gherbi Ilias

Soutenu en juin 2019

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude, ainsi que nos familles pour leur soutien et leur aide, nos collègues et tous nos amis

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants de L'université d' EL OUED , notamment à notre encadreur Dr.Guediri Abdelkrim d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui nous ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Mes vives salutations.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَّاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ
مِنْ رَحْمَتِهِ

Résumé :

L'objectif d'appliquer la commande PI pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à double alimentation raccordée au réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel.

Mots clés : System éolien, MADA, Convertisseur, Modélisation

abstract:

the objective of applying the PI command to control the exchange of active and reactive powers generated by the asynchronous doubly-fed machine connected to the grid by acting on the rotor signals by a Bi-directional converter.

keywords: Wind system, DFAM, Converter, Modeling

المخلص:

الهدف من تطبيق التحكم طردي-تكاملية (PI) للتحكم في القوى النشطة والمتفاعلة الناتجة عن الماكينة اللاآزامية ازدواجية التغذية المتصلة بالشبكة من خلال العمل على إشارات الدوار عبر محول ثنائي الاتجاه.

الكلمات الرئيسية: نظام الرياح ، ماكينة لاتزامية ازدواجية التغذية ، محول ، النمذجة

Introduction général..... 1

Chapitre I

Modélisation de la machine asynchrone

I.1 Introduction.....3

I.2. Prédiction optimale de l'énergie3

 I.2.1. Fonctionnant à vitesse fixe..... 3

 I.2.2. Systèmes de génération éolienne à vitesse variable..... 4

I.3. Machine utilisées dans les systèmes éoliens 5

 I.3.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobine" 5

 I.3.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil..... 9

 I.3.3 Générateur asynchrone à double stator 10

 I.3.4 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface
d'électronique de puissance 10

 I.3.5 Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" 11

I.3.6 Systèmes utilisant la machine synchrone..... 12

 I.4 Configurations de l'Association MADA(DFAM)/Convertisseur de Puissance.....13

 I.4.1 Fonctionnement en Moteur avec un Seul Convertisseur13

 I.4.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs15

 I.4.3. Fonctionnement en génératrice16

I.5. Conclusion..... 18

I.6. Références bibliographiques 19

Chapitre II

Modélisation et Simulation de la GADA

II.1. Introduction23

II.2. GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION23

 II.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation23

II.3. Mode de fonctionnement de MADA	24
II.3.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	24
II.3.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	25
II.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	25
II.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	25
II.4.Avantages et inconvénients de la MADA	26
II.5.Application des machines asynchrones à double alimentation	26
II.5.1 Application moteur	26
II.5.2 Application génératrice	27
II.6. Fonctionnement et Modélisation de la MADA	27
II.6.1 Fonctionnement à vitesse variable.....	28
II.6.1.1 Fonctionnement Moteur	28
II.6.1.2 Fonctionnement génératrice.....	28
II.7. Hypothèses simplificatrices.....	29
II.7.1 Représentation de la MADA dans repère triphasé (abc)	29
II.7.2 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)	30
II.8 Choix du référentiel.....	31
II.9 Application de la transformation de Park à la GADA.....	32
II.9.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)	32
II.10. Résultats de la Simulation	34
II.11. Conclusion.....	37
II.12. Références bibliographiques	38

Chapitre III

Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

III.1. Introduction	40
II.2.L'Aérogénérateur.....	40
III.3. Etat de l'art sur l'énergie éolienne	41
III.3.1. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne.....	41

III.3.2. Eoliennes à vitesse variable.....	42
III.3.3. Éoliennes à axe horizontal.....	43
III.3.4. Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	43
III.3.5. Le vent.....	44
III.3.5.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	45
III.3.5.2. Définition de l'énergie éolienne.....	46
III.3.5.3. Variabilité temporelle.....	47
III.3.5.4. Variabilité spatiale.....	48
III.3.5.5. Mesure de la vitesse du vent.....	48
III.3.5.6. Pylônes de mesure.....	48
III.3.6. Energie éolienne en Algérie.....	50
III.3.6.1. Gisement éolien en Algérie.....	50
III.3.6.2. Carte des vents en Algérie.....	50
III.3.6.3. Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie.....	51
III.3.6.4 Production mondiale d'électricité éolienne.....	53
III.4. Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	54
III.4.1. Loi de Betz.....	54
III.4.2. Production d'énergie mécanique.....	56
III.5. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	57
III.5.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall".....	57
III.5.2 Système d'orientation des pales « Pitch ».....	58
III.6. Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne à vitesse variable.....	58
III.6.1. Avantages des éoliennes fonctionnant à vitesse variable.....	59
III.7. Modélisation du système éolien à vitesse variable base sur une MADA.....	60
III.7.1. Description du système éolien.....	60
III.7.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.....	60
III.7.3 Modélisation de la vitesse du vent.....	60
III.7.4 Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal.....	61
II.8. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	61
III.8.1 Modélisation de la turbine.....	63
III.8.1.1 Modèle du multiplicateur.....	65

III.8.1.2 Equation dynamique de l'arbre	65
III.8.2 Stratégie de commande de la turbine.....	67
III.8.3 Maximisation de la puissance extraite.....	67
III.8.2.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	68
III.9. Résultats de Simulation et interprétations.....	69
III.10. Conclusion	73
III.11. Références bibliographiques.....	74

Chapitre IV

Modélisation et commande d'un système éolien par régulateur PI base de MADA

IV.1.Introduction	75
IV.2. Principe de la commande vectorielle de la DFAM	76
IV .3 Schéma bloc réduit de la MADA	79
IV.3.1. Commande directe	80
IV.3.1.1.Synthèse des régulateurs	80
IV.3.2. Commande indirecte	82
IV.3.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte.....	82
IV.3.2.2. Commande indirecte en boucle fermée.....	83
IV.4. Alimentation de la MADA (DFAM)	84
IV.5. Calcul des régulateurs des courants rotoriques	87
IV.6. Résultats de simulations	88
IV.7.Tests de robustesse	92
IV.8. Conclusion	95
IV.9. Références bibliographiques.....	96
Conclusion générale.....	98

Annexes

Figure I.1: Eolienne à vitesse fixe	05
Figure I.2: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	06
Figure I.3: Machine asynchrone a rotor bobine.	07
Figure I.4: MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée	07
Figure I.5: Structure de KRAMER pour la MADA	08
Figure I.6: Structure de SCHERBIUS avec cyclo-convertisseur.....	09
Figure I.7: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.....	10
Figure I.8: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau	11
Figure I.9: Générateur asynchrone à double stator	11
Figure I.10: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	12
Figure I.11 : Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone	12
Figure. I.12: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	13
Figure. I.13: Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.....	13
Figure. I.14: Schéma d'un système utilisant une MADA(DFAM) en moteur alimenté par un seul convertisseur.....	15
Figure. I.15: Schéma d'un système utilisant une MADA(DFAM) en moteur alimenté par deux convertisseurs.....	16
Figure. I.16: Schéma d'un système utilisant une MADA(DFAM). en alternateur alimenté par un seul convertisseur.....	18
Figure II.1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.....	25
Figure II.2: Différents modes de fonctionnement de la MADA.....	26
Figure II.3: Machine à induction à rotor bobiné	28
Figure II.4: Représentation de la MADA dans le repère de Park	32
Figure II.5: Schéma bloque de la modèle de GADA	35
Figure II.6: Courbe du courant rotorique (I_{rd} , I_{rq}).....	36
Figure II.7: Courbe du courant statorique	36

Figure II.8: Courbe du Couple electromagnetique	37
Figure II.9: Courbe du Puissance active statorique	37
Figure II.10: Courbe du Puissance réactive statorique	38
Figure III.1: Exemples d'éoliennes à axe vertical et à axe horizontal	43
Figure III.2: Composants d'une éolienne	44
Figure III.3: La naissance du vent	46
Figure III.4: Principaux organes du système de conversion éolienne	47
Figure III.5: Variations temporelles de la vitesse du vent	48
Figure III.6: Outils de mesure de la vitesse du vent	49
Figure III.7: Station de mesure du vent	50
Figure III.8: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).....	52
Figure III.9: Photo d'une première éolienne installée en Algérie.....	53
Figure III.10: La ferme éolienne à Adrar.....	53
Figure III.11: Prévision de développement des énergies renouvelables en Algérie.....	54
Figure. III.12: Tube de courant autour d'une éolienne.....	55
Figure. III.13: Coefficient de puissance.....	56
Figure III.14: Coefficient de puissance CP (λ) pour différents types des turbines éoliennes.....	56
Figure. III.15: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	57
Figure. III.16: Flux d'air sur un profil de pale " Stall"	58
Figure. III.17: Variation de l'angle de calage d'une pale.....	59
Figure. III.18: Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".....	59
Figure.III.19: Configuration d'une éolienne.....	61
Figure. III.20: Système mécanique de l'éolienne.....	63
Figure. III.21: Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	64
Figure. III.22: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ	66
Figure. III.23: Modèle d'une turbine éolienne.....	67

Figure. III.24: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.....	67
Figure. III.25: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.....	68
Figure. III.26: Stratégies de commande de la turbine.....	69
Figure. III.26.a: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	70
Figure. III.27: Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK.....	70
Figure. III.28: Schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne.....	71
Figure III.29: Profil du vent.....	72
Figure III.30: Coefficient de puissance.....	72
Figure III.31: Vitesse de rotation.....	73
Figure III.32: Couple et Puissance électrique produite.....	73
Figure IV.1: Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.....	80
Figure IV.2: Orientation de la tension et de flux statorique	81
Figure IV.3: Schéma bloc du système à réguler.....	83
Figure IV.4: Schéma de principe de la commande directe	84
Figure IV.5: Schéma bloc d'un système régulé par un PI	84
Figure IV.6 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension.....	86
Figure IV.7: Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	87
Figure. IV.8: Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI.....	88
Figure. IV.9: Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions.....	89
Figure. IV.10: Onduleur de tension avec onde porteuse.....	89
Figure. IV.11: Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur.....	90
Figure. IV.12: Schéma fonctionnel de régulation du courant idr.....	91
Figure. IV.13: Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA.....	92
Figure. IV.14: Tension du bus continu (V).....	93

Figure. IV.15: Couple électromagnétique.....	94
Figure. IV.16: Les courants direct et quadrature rotoriques.....	94
Figure. IV.17: Les courants direct et quadrature statorique	94
Figure. IV.18: Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique.....	94
Figure. IV.19: Courant triphasé rotorique.....	95
Figure. IV.20: Courant triphasé statorique.....	95
Figure. IV.21: Courant par phase statorique.....	95
Figure. IV.22: Courant par phase rotorique.....	95
Figure. IV.23: Le courant et la tension statorique.....	96
Figure. IV.24: Zoom sur le courant et la tension statorique.....	96
Figure. IV.25: Couple électromagnétique.....	97
Figure. IV.26: Les courants direct et quadrature rotoriques.....	97
Figure. IV.27: Les courants direct et quadrature statorique	97
Figure. IV.28: Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique.....	98
Figure. IV.29: Courant triphasé statorique.....	98
Figure. IV.30: Courant triphasé rotorique.....	98
Figure. IV.31: Courant par phase rotorique.....	98
Figure. IV.32: Le courant et la tension statoriques.....	99
Figure. IV.33: Zoom sur le courant et la tension statoriques.....	99

Tableau III.1: Les catégories des éoliennes selon leurs puissances44

Tableau III.2: Puissance éolienne installée dans le monde de 2011 à la fin de 2018 (en MW)
.....54

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La vitesse angulaire de stator
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
v	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice

$J_{pale} (kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J (kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre
Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
Dg	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E [J]$	L'énergie cinétique
$E_v [J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer} [N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec} [N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis} [N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em} [N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref} [N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé} [N.m]$	Couple aérodynamique estimé
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d

Notations Symbolique

θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{coord}	Angle coordonnée
E_r [V]	f e m au rotor
E_s [V]	f e m au stator
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
S_s [VA]	La puissance apparente au stator
S_r [VA]	La puissance apparente au rotor
P_s [W]	La puissance active au stator
P_r [W]	La puissance active au rotor
Q_s [VAR]	La puissance réactive au stator
Q_r [VAR]	La puissance réactive au rotor
g	Glissement
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)
$[M_{rs}]$	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique

Notations Symbolique

$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique
$V [V]$	Tension
$I [A]$	Courant
$\varphi [Wb]$	Flux
$M [H]$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
$l_s [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du stator
$l_r [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
$M_s [H]$	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
$M_r [H]$	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d, q
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d, q
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d, q
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d, q
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d, q
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d, q
s	Opérateur dérivé de Laplace
p	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique

Notations Symbolique

f_r	Fréquence de rotor
f_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système

Sigles utilisés

<i>MADA</i>	<i>Machine Asynchrone à Double Aliment.</i>
<i>MLI</i>	<i>Modulation de Largeur d'Impulsion</i>
<i>FTBO</i>	<i>Fonction de Transfer en Boucle Ouvert</i>
<i>FTBF</i>	<i>Fonction de Transfer en Boucle Fermée</i>
<i>PI</i>	<i>Proportionnel - Intégrale</i>

Introduction générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine. On peut citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande.

Par la suite, ce type d'énergie a servi à produire l'électricité. Au 16ème siècle, elle a été utilisée pour pomper de l'eau et couper le bois.

C'est en 1891 que le danois Paul La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité. A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant les 1ère et 2ème guerres mondiales pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2ème guerre mondiale. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes.

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne.

Le système étudié ici est constitué d'un aérogénérateur tripales, à axe horizontal, connecté au réseau par une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé, alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance AC-AC bidirectionnels en courant. Ce type de machines peut présenter quelques avantages dans le domaine de production de l'énergie éolienne à vitesse variable par rapport à d'autres types de machines à induction. Les générateurs basés sur les machines à double alimentation deviennent de plus en plus populaires pour les éoliennes à vitesse variable.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur les différentes parties de centrale éolienne c'est à dire l'étude de la chaîne de conversion éolienne et a travers les différents types des turbines et les machines utilisées dans un système éolien. Pour donner un bon rendement au réseau électrique, on a choisi la turbine axe horizontale rapide et la machine asynchrone à double

alimentation MADA en anglais «doubly fed induction machine DFIM », cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelque soit la vitesse de vent. Ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art de l'aérogénérateur particulièrement l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation où les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présenté.

Dans le deuxième chapitre : on présentera construction de la MADA, son principe de fonctionnement, ses variantes de fonctionnement. Ainsi l'étude de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation permettra de simuler son modèle pour le mode générateur.

Dans le troisième chapitre seront abordées ; par la modélisation de la turbine. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle et présente les résultats par la simulation sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK, L'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible.

Dans le quatrième chapitre, sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse variable (avec turbine). Nous présentons le stator de la GADA et alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans le second lieu nous présentons le système complet constitué de : la turbine et la génératrice asynchrone double alimentation et convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique où l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

L'objet de la commande indirecte de la puissance de la GADA, il traite en premier lieu des rappels de notions de base sur la théorie de la commande indirecte.

Une conclusion générale vient clôturer les quatre chapitres de cette mémoire. Une proposition pour les travaux futurs est également donnée.



Chapitre 1 :

Etat de l'Art de l'Aérogénérateur

I.1 Introduction:

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [1].

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne.

Dans la première mention, la classification des éoliennes selon leur mode de fonctionnement, à vitesse fixe ou à vitesse variable, en plus des machines pouvant être utilisées avec des éoliennes ainsi que des systèmes utilisant des machines synchrones.

Dans ce dernier cas, les différentes configurations de l'association de machine synchrone à double alimentation ont été introduites avec l'adaptateur d'alimentation et leur mode de fonctionnement avec l'inférence du travail de spécialistes et d'experts

I.2. Prédiction optimale de l'énergie:

On peut classer les éoliennes en deux catégories suivant le mode de fonctionnement : des éoliennes fonctionnant à vitesse fixe et celles fonctionnant à vitesse variable.

I.2.1. Fonctionnant à vitesse fixe:

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice utilisée (Figure. I.1) [2].

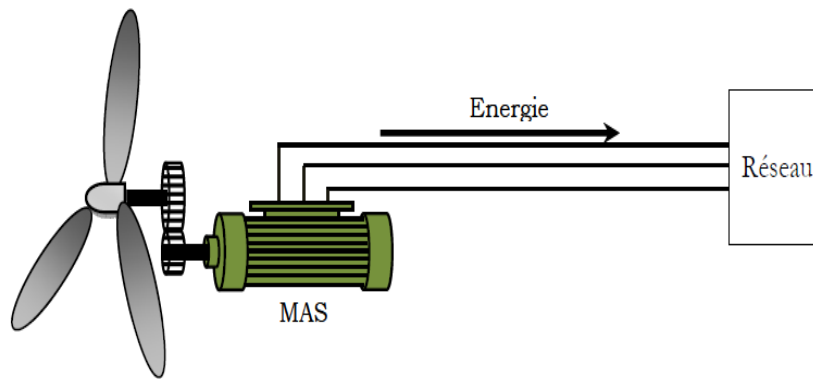


Figure. I.1:Éolienne à vitesse fixe[3].

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et fournit la puissance électrique au réseau. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables [3].

I.2.2. 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 [4].

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA, est représentée par la Figure. I.2.Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [5].

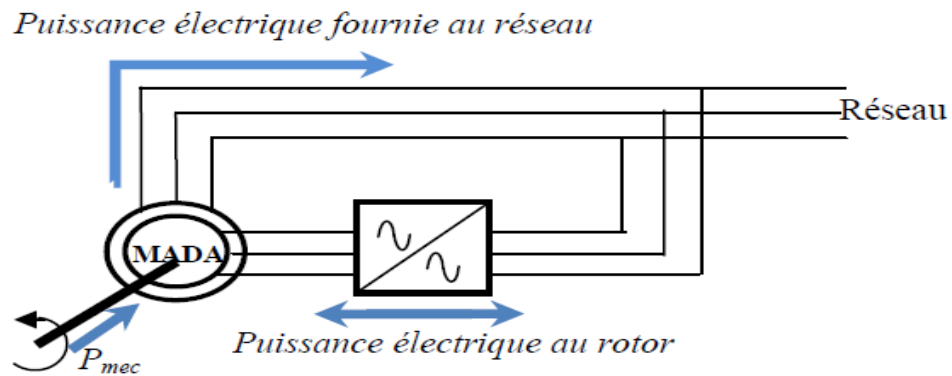


Figure. I.2: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice[5].

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance ;
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité [5].

I.3. Machine utilisées dans les systèmes éoliens :

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors il doit tourner à vitesse fixe [6]. Si la vitesse est très variable, le générateur est lié indirectement au réseau à travers un convertisseur de puissance. Ce type de chaîne permet d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

I.3.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobine":

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [7]. Le stator est directement relié au réseau et les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure. I.3.).

La MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de

système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage [8].

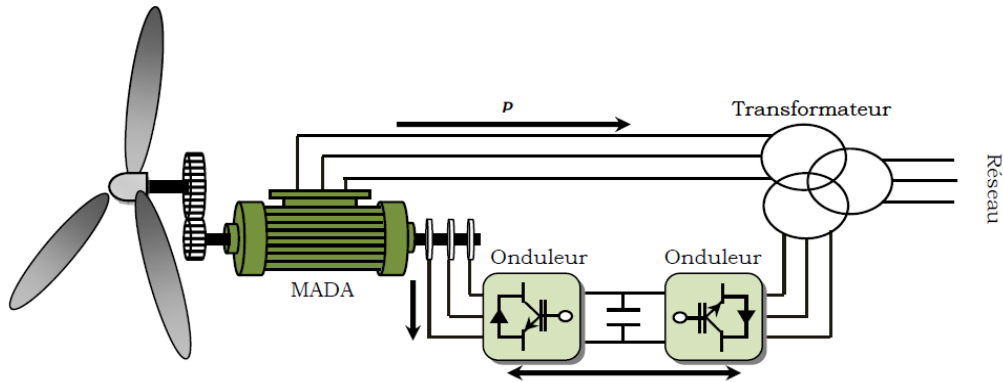


Figure. I.3: Machine asynchrone à rotor bobiné [7] [8].

a. Structure à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure. I.4. 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 GTO [9].

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 de la machine.

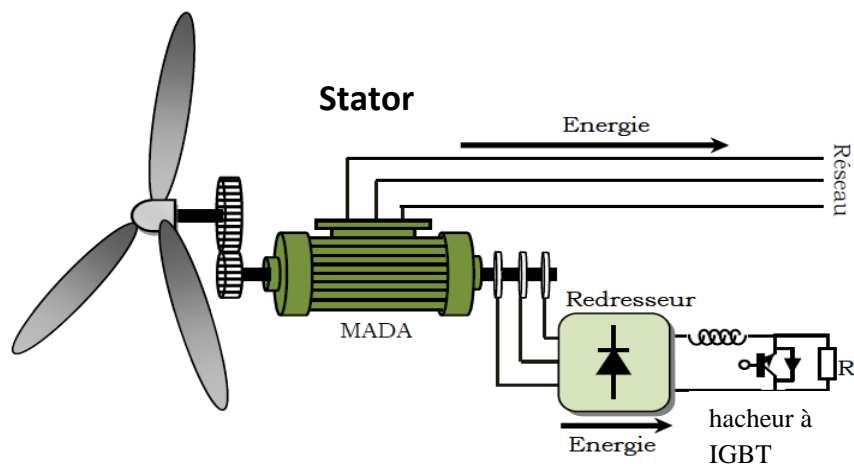


Figure. I.4: MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée [9] [10].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système.

De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [10].

b. Structure de KRAMER:

Cette structure est appelée structure à base de pont à diode et pont à thyristors. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors appliqué à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Figure. I.5).

Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [11].

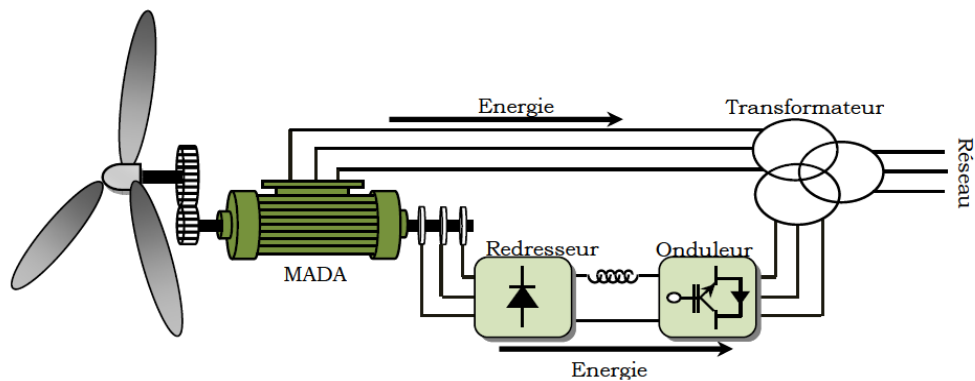


Figure. I.5 : Structure de KRAMER pour la MADA [11].

c. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur:

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (Figure. I.6). L'ensemble est alors appelé : structure de SCHERBIUS [12]. Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de SCHERBIUS".

Formellement, le principe de SCHERBIUS est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance.

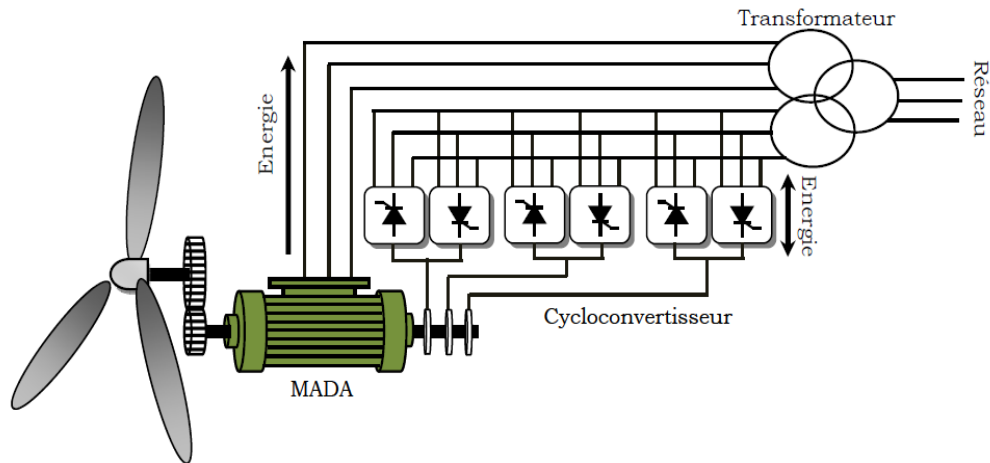


Figure. I.6: Structure de SCHERBIUS avec cyclo-convertisseur [12].

Dans cette configuration, le principe de SCHERBIUS est reproduit à l'aide d'un cyclo-convertisseur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [13].

d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI :

Une autre structure intéressante (Figure. I.7) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [14].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [15].

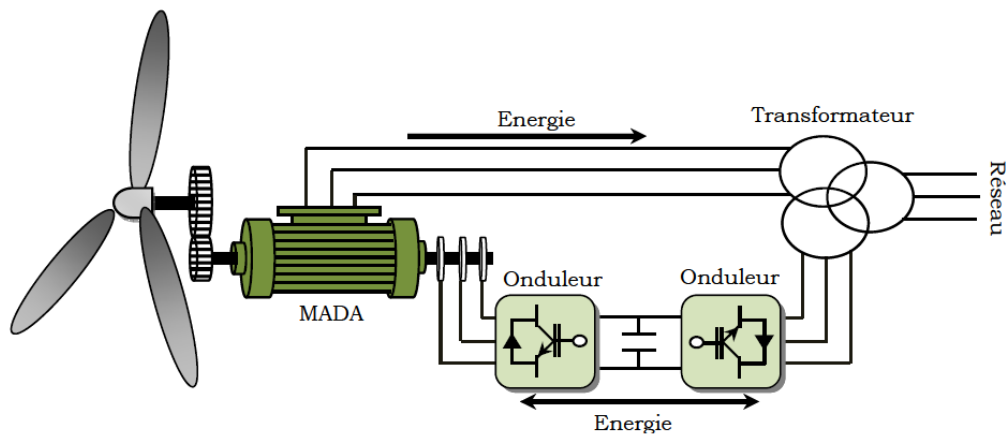


Figure. I.7: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI[14].

C'est pour cette raison que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable ;
- Le convertisseur de puissance de petite dimension ;
- Le niveau bas de fluctuations mécaniques ;
- La possibilité de fonctionnement en hypo et hypersynchronisme, ce qui permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau ;
- Le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

I.3.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machines est plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. La simplicité de la configuration de ce système permet de limiter la maintenance de la machine. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [16]. L'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques (Figure. I.8), permet de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie.

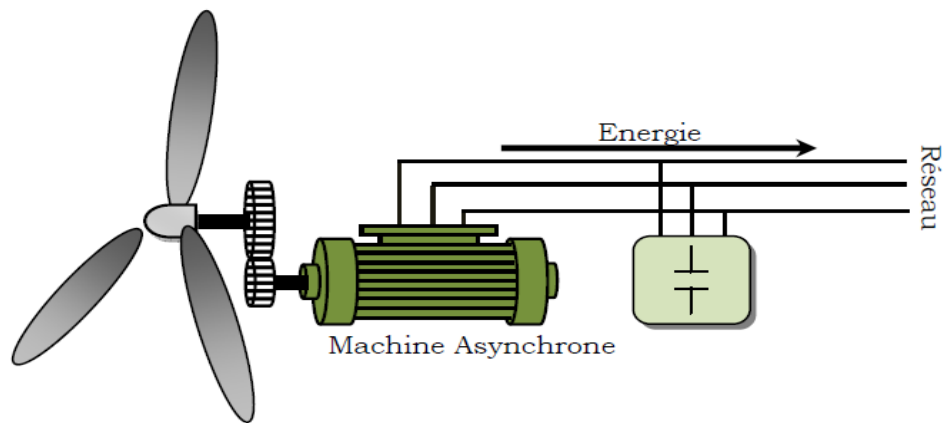


Figure I.8: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau[16].

I.3.3 Générateur asynchrone à double stator :

Cas deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend là sa conception difficile ainsi que son cout de revient est trop important.[17]

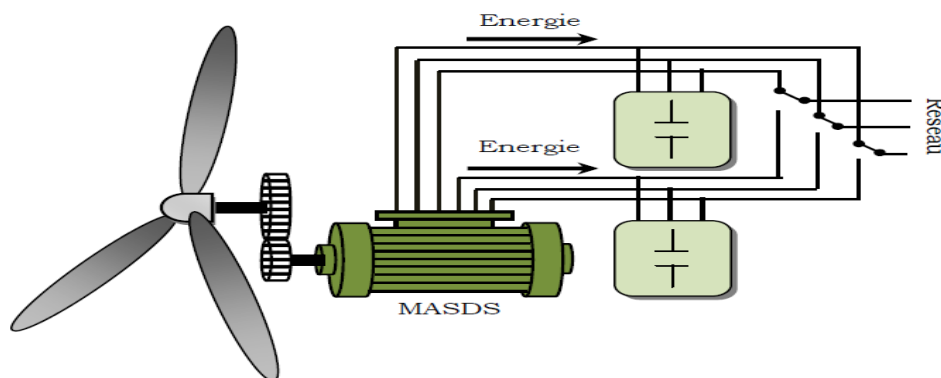


Figure I.9 : Générateur asynchrone à double stator[17].

I.3.4 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la Figure. (I.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. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet

de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [18].

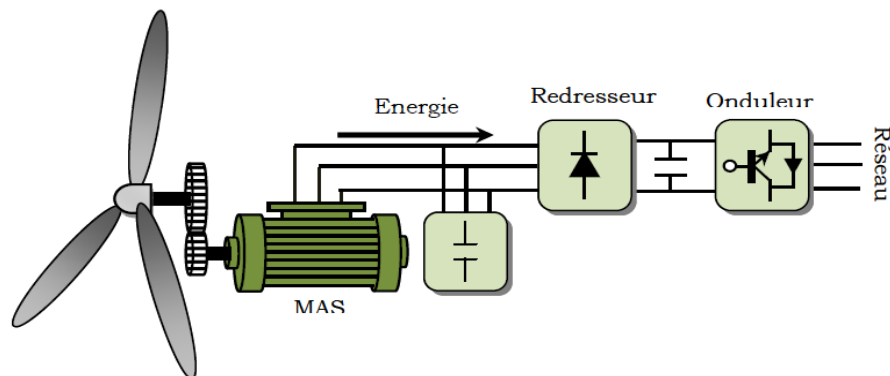


Figure. I.10: Machine asynchrone connectée à réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur [18].

I.3.5 Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" :

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écuriel classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure. I.11).

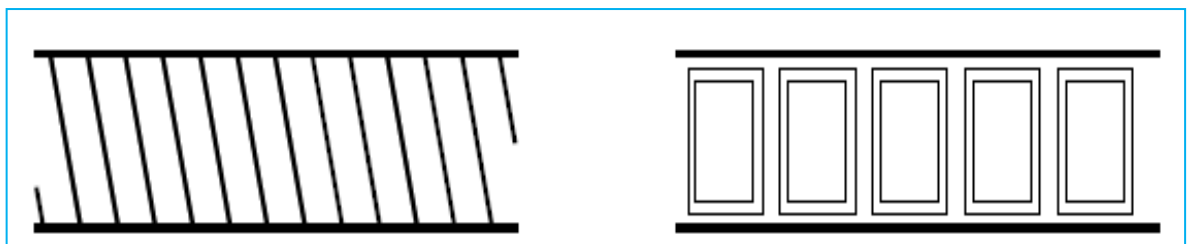


Figure. I.11: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone [19].

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure. I.12) [19].

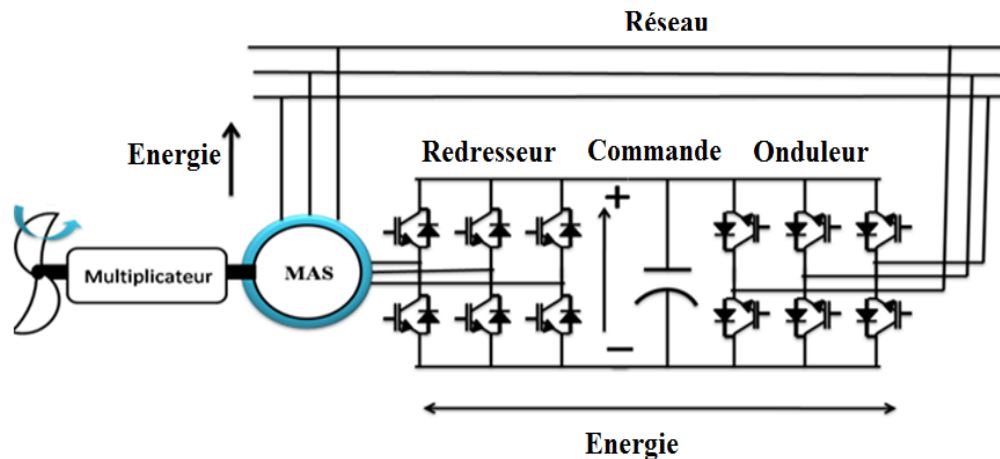


Figure. I.12: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau[19].

I.3.6 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Ces systèmes sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecte au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple-capte par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi, les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectes au réseau.

Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (Figure. I.13).

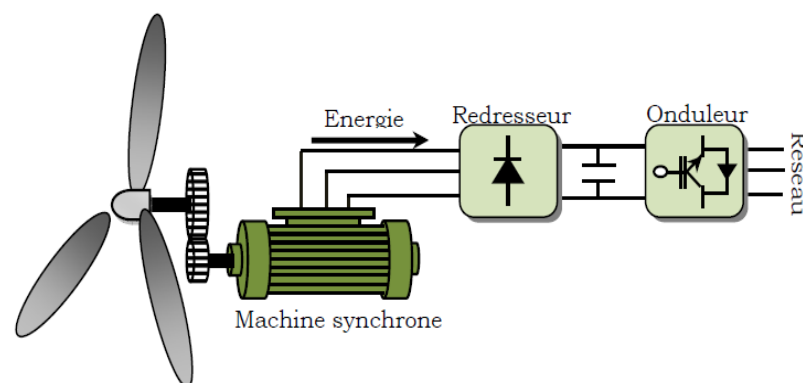


Figure. I.13: Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique[20].

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées.

Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'apéro-turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance [20].

I.4. Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de Puissance :

La MADA offre plusieurs possibilités de configuration avec son association avec les convertisseurs de puissance. Ces configurations dépendent essentiellement du domaine d'application de la MADA.

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc.

Par ailleurs, la MADA. Et grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration. Dans ce qui suit, nous présentons les travaux significatifs consacrés à la MADA. Pour chacun d'entre eux, nous mentionnerons l'application visée de la MADA, la stratégie de commande adoptée ainsi que le type de convertisseur utilisé et leur stratégie de commande. Dans ce cas, nous nous intéresserons seulement aux travaux concernant la configuration avec un seul convertisseur lié au rotor qui constitue le but de notre travail. Cet axe de recherche est très riche aux travaux des chercheurs, vu l'intérêt porté aux énergies renouvelables et plus précisément l'énergie éolienne.

D'après la littérature, on peut distinguer les configurations suivantes :

I.4.1. 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 un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure I.14 présente le schéma de principe de cette catégorie de MADA.

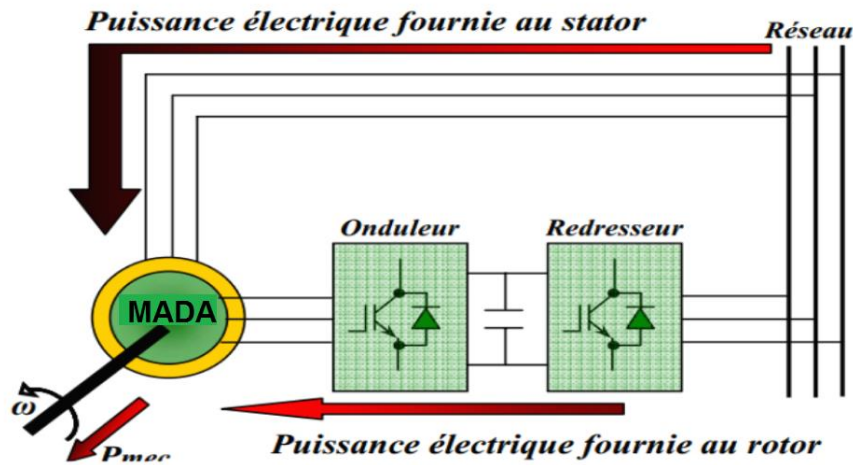


Figure. I.14: Schéma d'un système utilisant une MADA (DFAM) en moteur alimenté par un seul convertisseur. [25]

Machmoum propose une étude des performances d'une MADA en régime permanent dont le stator est connecté au réseau, alors que le rotor est alimenté par un cyclo-convertisseur de courant. Son étude vise des applications à vitesse variable, que le fonctionnement soit en moteur ou en générateur. L'auteur choisit une stratégie de commande qui consiste à aligner l'axe "d" de son repère tournant avec le courant rotorique dont le but de contrôler les courants rotoriques et l'angle de charge (déphasage entre la tension statorique et le repère considéré). L'expression analytique du couple est divisée en deux parties, une partie due au courant rotorique et l'autre due à l'interaction entre l'alimentation du stator et celle du rotor. Cette étude est validée par des résultats expérimentaux qui permettent de conclure que la stabilité du système est établie dans une gamme limitée de la variation de l'angle de charge. [21]

Battle propose une commande vectorielle par l'orientation de la tension statorique pour le réglage de la puissance active et réactive au niveau du stator d'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par l'association redresseur/onduleur MLI au niveau du rotor, alors que le stator est connecté directement au réseau. Cette méthode permet d'obtenir une commande découplée de la puissance active et réactive par le réglage des composantes du courant statorique, dont la stabilité globale du système MADA est assurée. Cette étude est validée par la simulation et par l'expérimentation. [22]

Dalal propose une étude de simulation sur la commande de la vitesse par des régulateurs PI du moteur asynchrone à rotor bobiné dont le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté par un convertisseur matriciel afin de réaliser une commande avec un facteur de puissance unitaire. La technique de commande MLI vectorielle est adoptée pour la commande du convertisseur matriciel. Cette étude est validée par simulation. D'après les résultats de simulation,

l'auteur constate que le réglage de la puissance de glissement par un convertisseur matriciel apporte une amélioration significative au niveau de la qualité de puissance du système considéré par rapport au cyclo-convertisseur. Ceci est prouvé par un courant quasiment sinusoïdal avec un facteur de puissance unitaire à l'entrée du convertisseur matriciel, ainsi qu'une tension presque sinusoïdale à la sortie de celui-ci, qui permet d'avoir un courant sinusoïdal dans le rotor, Et ce qui conduit à une amélioration du rendement et une réduction du taux d'harmoniques dans le système.[23]

Shapoval présente un algorithme de commande vectorielle indirecte du couple et de la puissance réactive de la machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par un convertisseur matriciel au niveau du rotor, alors que le stator est alimenté directement par le réseau. Cette méthode est basée sur l'orientation du référentiel suivant le vecteur de la tension statorique. L'auteur a adopté la stratégie de commande par modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) pour le convertisseur matriciel. Il présente ensuite quelques résultats expérimentaux pour les deux modes de fonctionnements de la MADA (moteur ou générateur). Il constate que l'algorithme proposé assure une bonne poursuite du couple à sa référence et garantit un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. Les formes d'ondes des courants obtenues à l'entrée du stator et à l'entrée du convertisseur matriciel sont satisfaisantes (proches de la forme sinusoïdale).[24]

I.4.2. 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 (I.15);
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun ;
- Deux cyclo-convertisseurs.

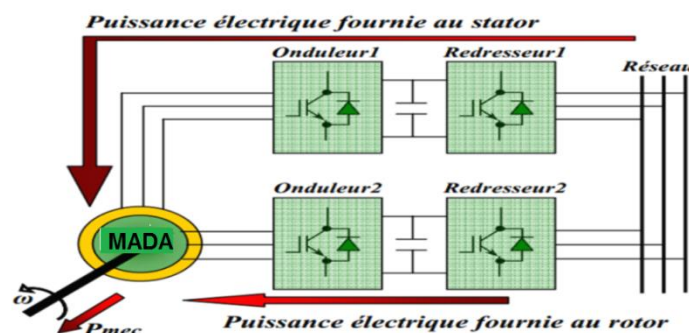


Figure. I.15: Schéma d'un système utilisant une MADA(DFAM) en moteur alimenté par deux convertisseurs[25].

VIDAL reprend la commande vectorielle présentée par LECOQ. Il essaie d'élaborer de nouvelles lois de commande linéaire et non linéaire à partir d'un modèle d'état basé tout d'abord sur les courants puis sur les flux. L'alimentation de la MADA est assurée par un onduleur à MLI. En analysant le comportement de la MADA en régime permanent, il parvient à déterminer les couplages mis en jeu dans la modélisation choisie. Il adopte une loi de répartition de puissance et impose une fréquence minimale de fonctionnement. Pour la commande linéaire, il conclut que la modélisation par flux présente de meilleurs résultats. Quant au cas non linéaire, il opte pour la commande par modes glissants. En conclusion, il affirme que cette stratégie donne de très bons résultats vis-à-vis de la commande linéaire.[14] [25]

MASMOUDI dans son article, considère une MADA avec deux alimentations variables et indépendantes : l'une au stator, l'autre au rotor. Il centre son intérêt aux échanges énergétiques entre les enroulements rotoriques et statoriques dans l'entrefer. Il en fait un bilan pour les fonctionnements en moteur, en générateur ou en frein. L'auteur propose enfin une étude de la stabilité en analysant les valeurs propres de la matrice dynamique en fonction des variations des paramètres électriques. [15]

Dans [16], DRID présente une nouvelle approche pour contrôler une MADA alimentée par deux onduleurs de tension au stator comme au rotor. Son approche est basée sur un contrôle à double orientation du flux statorique et rotorique. L'orthogonalité entre les deux flux, qui doit être impérativement observée, conduit à une commande linéaire et découplée de la machine avec une optimisation du couple. Par la suite l'auteur présente les résultats de simulation de son étude.

RAMUZ dans sa thèse propose d'utiliser une configuration de la MADA pour un fonctionnement moteur dans des applications telles que "la traction où la première transformation de l'acier". Les enroulements statoriques et rotoriques de la MADA sont alimentés par deux onduleurs indépendants. Il utilise un contrôle vectoriel à orientation de flux. Dans un premier temps, il présente des résultats expérimentaux avec un contrôle basé sur un repère tournant lié au flux statorique ; dans un deuxième temps, le contrôle est basé sur une orientation du repère suivant le flux d'entrefer. Ces résultats expérimentaux ont été obtenus sur une maquette dont le moteur a une puissance de 1.5 kW.[26]

I.4.3. Fonctionnement en génératrice :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la figure (I.16). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixes même lors d'une fluctuation de la vitesse. Dans ce cas la plus grande partie de la

puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 30% de la puissance totale passe par le convertisseur de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux, [18-20].

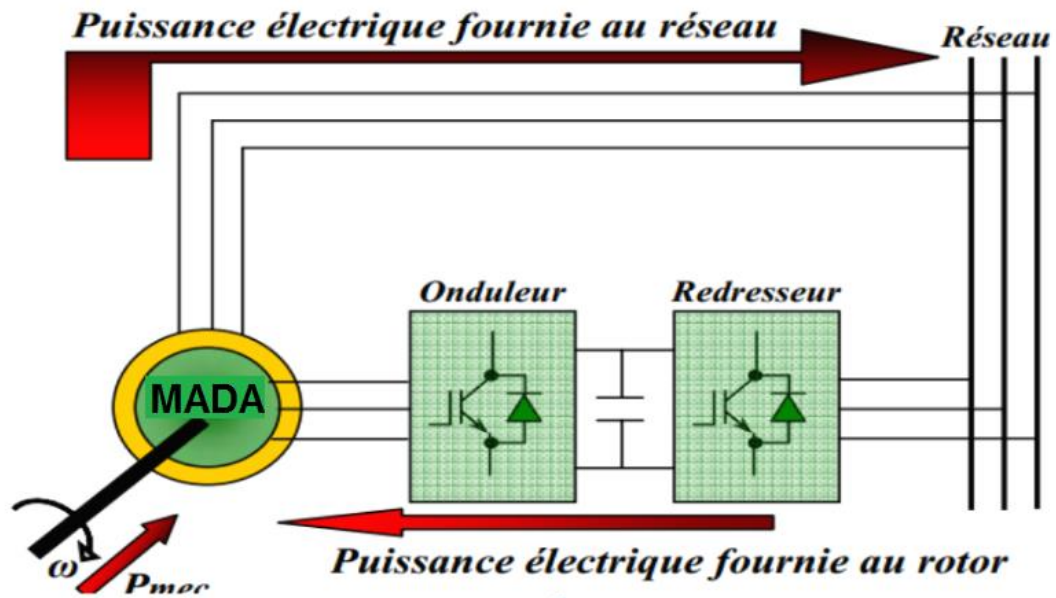


Figure. I.16. Schéma d'un système utilisant une MADA (DFAM). En alternateur alimenté par un seul convertisseur [25].

Yamamoto et Motoyoshi étudient le cas d'une MADA en fonctionnement générateur dont le stator est couplé au réseau et le rotor alimenté par un cyclo-convertisseur. Cette machine est dédiée à des applications du type hydroélectricité et éolien. Son étude porte principalement sur le contrôle de la puissance active et réactive statorique ainsi que sur les formes d'ondes des courants de la machine. L'analyse spectrale des courants statoriques et rotoriques permet d'affirmer que certaines harmoniques du courant rotorique sont transmises à l'enroulement statorique ce qui change le spectre des fréquences des courants de ce dernier. Des résultats expérimentaux sont présentés afin de valider l'étude proposée. [27]

Dittrich s'intéresse à la qualité de la puissance d'une MADA dédiée à une application du type éolien. Pour cela, il propose d'améliorer la qualité des courants délivrés par la MADA en compensant leurs harmoniques. Il associe la présence d'harmoniques dans les courants à deux raisons : la distorsion de la tension réseau et la distribution non-sinusoïdale du flux dans la machine. Il propose alors de réduire les harmoniques des courants par les méthodes de compensation dues à des effets secondaires. Il présente des résultats expérimentaux pour les

courants avec et sans compensation pour des essais sur une machine de 4 kW et montre l'amélioration des formes d'ondes des courants et des analyses spectrales de ces mêmes courants témoignant de l'efficacité de la méthode proposée.

Concernant les stratégies de commande, la littérature permet de remarquer que la principale stratégie utilisée est le contrôle vectoriel par orientation soit du flux statorique soit de la tension statorique. Le principal objectif est de contrôler indépendamment la puissance active et la puissance réactive, tant au stator qu'au rotor. On s'intéresse aussi aux performances de la MADA ainsi qu'à sa stabilité et à la robustesse de la stratégie de commande face aux variations paramétriques de la machine. Ces études proposent des contrôles avec ou sans capteur de position et de vitesse en utilisant différentes méthodes d'estimation de la vitesse ou de la position du rotor de la machine. Dans ce cadre on peut citer :

SOENS se base sur le modèle dynamique d'une MADA dédiée aux applications éoliennes et dont la puissance est de 850 kW. Il étudie le courant et la tension rotorique en fonction de la vitesse et de la puissance active et réactive. En conclusion, il tire que le courant est un facteur limitant les puissances du stator mais n'a pas d'influence sur la variation de la vitesse de la machine. De plus, il retient que la tension rotorique est un facteur limitant de la zone de variation de la vitesse mais a peu d'influence sur les puissances au stator. [28]

PENA dans [29] et [30], présente l'étude de la MADA en fonctionnant génératrice associée à une éolienne. Les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé, une association redresseur MLI - onduleur MLI au rotor. L'avantage d'une telle structure est qu'elle permet le réglage indépendant des puissances fournies par l'alimentation et le fonctionnement dans une grande plage de vitesse.

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la MADA sous toutes ses configurations et les performances qui lui permettent d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), ou dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Au cours de notre recherche bibliographique nous avons balayé un grand nombre d'études et de travaux effectués sur la MADA. Ces études portent principalement sur son fonctionnement en génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, ou sur son fonctionnement en moteur avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle.

Nous avons orienté notre étude sur l'utilisation d'une MADA en fonctionnement génératrice non autonome. Il s'agit d'une configuration utilisant un onduleur au rotor, le stator est connecté directement au réseau.

Pour bien exploiter la machine à double alimentation dans un tel domaine d'application, la modélisation et la commande sont nécessaires.

I.7. Références bibliographiques :

- [1] : Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade",
Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [2] Drid. S, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie & Expérimentation", thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2005.
- [3] Panda. D, Benedict. E. L. Venkataramanan. G and Lipo. T. A, "A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine", Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, pp. 1695-1702, Oct 2001.
- [4] Heller. M and W. Schumacher, "Stability analysis of doubly-fed induction machines in stator flux reference frame", Proc. EPE (Trondheim), vol. 2, p. 707-710, 1997.
- [5] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, "Application and Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Generator and Motor Operating", Cigre, Moscou, Russia, 1995.
- [6] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, "Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Motor Operating", ICEM Proceedings, Spain,1996.

- [7] Morel. L, Godfroid. M, Mirzaian. A, Kauffmann. J.M, “Double-Fed Induction Machine : Converter Optimization and Field Oriented Control Without Position Sensor”, IEEE Proc. Electr Power Appl. 145, No. 4, pp. 360-368, July 1998.
- [8] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, “Stator Flux Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder”, IEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 147, No 4, p. 241-250, July 2000.
- [9] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, “Combined Magnetizing Flux Oriented Control of the Cascaded Doubly Fed Induction Machine”, IEEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 148, No. 4, p. 354-362, 2001.
- [10] Lecocq. D, Lataire. P.H, Wymeersch. W, “Application of the Double Fed Asynchronous Motor (DFAM) in Variable Speed Drives”, EPE Conference, Brighton, Vol. 5, pp. 419-423, 13-16 September. 1993.
- [11] Lecocq. D, “Contribution à l’Etude des Moteurs Alternatifs à Double Alimentation par Convertisseurs Statiques pour Entraînements de Forte Puissance”, Thèse de Doctorat, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit, Brussel, 1994.
- [12] Lecocq. D, Lataire. P.H, “The Indirect Controlled Double Fed Asynchronous Motor for Variable Speed Drives”, EPE Conference, Vol. 3, pp. 405-410, Sevilla, 19-21 September. 1995.
- [13] Lecocq. D, Lataire. P.H, “Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages”, Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.
- [14] Vidal. P. E, “Commande non Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [15] Masmoudi. A, Toumi. A, Kamoun. M, “Power on Analysis and Efficiency Optimization of a Doubly Fed Synchronous Machine”, Proceedings Electric Machines and Power Systems 21, pp. 473-491, 1993.
- [16] Drid. S, Nait-Said. M.S, Tadjine. M, “Double Flux Oriented Control for the Doubly Fed Induction Motor Electric Power Components and Systems”, Taylor & Francis Inc., 33:1081-1095, 2005.

- [17] Hansen. L. H, L. Heller, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1205(EN), ISBN 87- 550-2743-8, 2001.
- [18] L. Xu and C. Wei, “Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensor less scheme”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, no. 3, pp. 636-642, May/June. 1995.
- [19] Petersson .A and S. Lundberg, “Energy efficiency comparison of electrical systems for wind turbines”, in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NOR pie/2002), Stockholm, Sweden, 12-14 Aug. 2002.
- [20] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, “Robust output feedback control of a doubly fed induction machine”, Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [21] M. Machmoum, R. L. Doeuff, F. M. Sargos, M. Cherkaoui, “Steady-state analysis of a doubly fed asynchronous machine supplied by a current-controlled cycloconverter in the rotor,” IEE Proc-B., Vol. 139, No. 2, pp. 114-122, Mar. 1992.
- [22] C. Batlle, A. D. Cerezo et R. Ortega, “A stator voltage-oriented PI controller for the doubly-fed induction machine,” Proc. of American Control Conference, pp. 5438- 5443, New York, USA, Jul 2007.
- [23] A. K. Dalal, P. Syam, A. K. Chattopadhyay, “Use of matrix converter as slip power regulator in doubly-fed induction motor drive for improvement of power quality,” IEEE Proc. Power India Conference, New Delhi, 2006.
- [24] I. Shapoval, S. Peresada, J. Clare, “Torque and reactive power control of doubly fed induction machine with matrix converter,” IEEE, pp. 2469-2474, 2008.
- [25] AZEDDINE CHAIBA, “Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de l'Intelligence Artificielles,” Setif, 2010.

[26] D. Ramuz, "Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs," Thèse de Doctorat, Institut de Génie Energétique de Belfort, UFR des Sciences Techniques et Gestion de l'Industrie de l'Université de France, Mai 2000.

[27] M. Yamamoto, O. Motoyoshi, "Active and reactive power control for doubly fed wound rotor induction generator," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 4, October 1991.

[28] J. Soens, K. DE Brabandere, J. Drissen, R. Belmans, "Doubly fed induction machine: operating regions and dynamic simulation," EPE 2003 Conference, Toulouse, France, September 2003.

[29] R. S. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its applications to variable-speed wind-energy generation," IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.

[30] R. S. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Vector control of a variable speed doubly-fed induction machine for wind generation systems," EPE Journal, Vol. 6, No. 3-4, pp. 60-67, December 1996.



Chapitre 2 :

Modélisation et Simulation de la GADA

II.1.Introduction:

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes terrestres. Son principal avantage est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui engendre un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions utilisées (par exemple: génératrice synchrone à aimants permanents) [1, 2]. En effet, la MADA permet un contrôle par le rotor et un fonctionnement sur une plage de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. Par conséquent, les convertisseurs connectés entre le rotor et le réseau électrique seront dimensionnés pour seulement une fraction de la puissance statorique fournie ($\pm 30\%$ de la puissance statorique). Ceci permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance et l'augmentation du rendement du système global [3]. Un système éolien basé sur une MADA est généralement donné sous la topologie illustrée par la figure II.1. La turbine éolienne entraîne la MADA via un multiplicateur de vitesse, où elle est raccordée directement au réseau électrique par le stator et par le rotor à travers deux convertisseurs statiques triphasés commandés en modulation de largeur d'impulsion (MLI) ; l'un du côté rotor de la MADA appelé convertisseur côté rotor (CCR) et l'autre du côté réseau électrique appelé convertisseur côté réseau (CCS). Grâce à la bidirectionnalité de ces deux convertisseurs, la MADA peut fonctionner en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone.

II.2 GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION :

II.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des

enroulements décalés de 120° dans l'espace. Son rotor n'est par contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction [4].

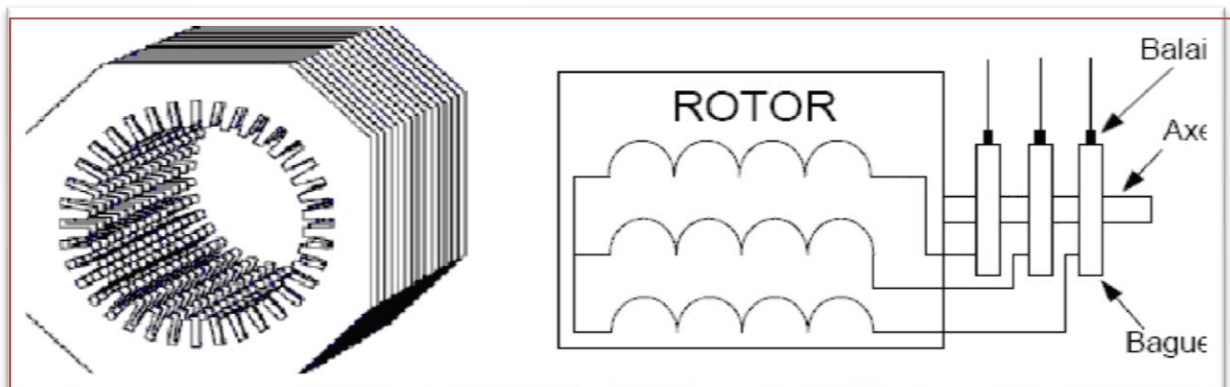


Figure II.1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA [4].

II.3. Mode de fonctionnement de MADA:

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [5].

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [4]. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement.

II.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

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

II.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

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

II.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:

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

II.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques. [6].

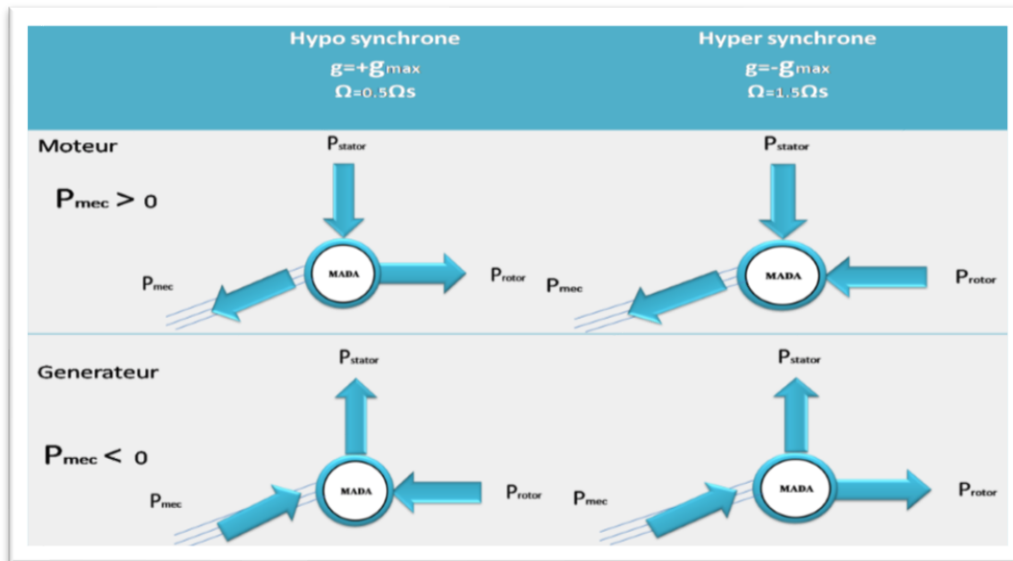


Figure. II.2 : Différents modes de fonctionnement de la MADA[6].

II.4. Avantages et inconvénients de la MADA :

A. Avantages de la MADA :

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne) ;
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ;
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ; [7]

B. Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;

- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.5 Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

II.5.1 Application moteur :

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse [8] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

II.5.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la GADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- ❖ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions;
- ❖ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- ❖ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- ❖ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.
- ❖ Application de la GADA dans le domaine éolien [9]

II.6. Fonctionnement et Modélisation de la MADA:

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g) P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf .

Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (Figure.II.3). Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

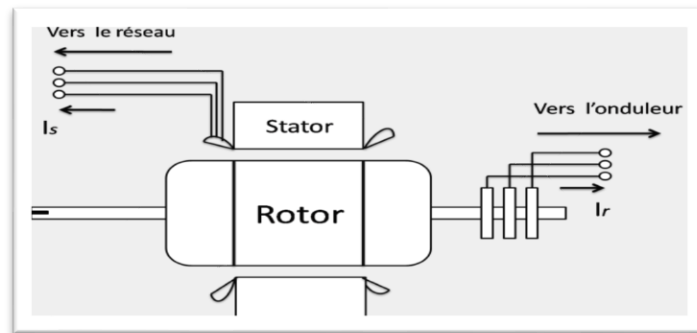


Figure. II .3 Machine à induction à rotor bobiné[10]

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. créés au rotor et au stator est :

$$\frac{E_R}{E_S} = \frac{N_R \omega_s - \omega_m}{N_S \omega_s} \quad (\text{II.1})$$

En posant : $g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$ L'équation (II.1) devient:

$$\frac{E_R}{E_S} = g \cdot \frac{N_R}{N_S} \quad (\text{II.2})$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{I_R}{I_S} = \frac{N_S}{N_R} \quad (\text{II.3})$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor et la puissance au stator devient :

$$\frac{S_R}{S_S} = \frac{E_R}{E_S} \frac{I_R}{I_S} = g \quad (\text{II.4})$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [10] .

II.6.1 Fonctionnement à vitesse variable:

La machine à double alimentation a fait l'objet de deux variantes de fonctionnement :

II.6.1.1 Fonctionnement Moteur:

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme la puissance du glissement peut être récupérée, c'est la cascade hypo synchrone. En cascade hyper synchrone, une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

II.6.1.2 Fonctionnement génératrice:

La puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance du glissement. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques. Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentations ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables et sont présentés [11].

II.7. Hypothèses simplificatrices:

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ❖ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- ❖ Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligées ;
- ❖ Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- ❖ Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

II.7.1 Représentation de la MADA dans repère triphasé (*abc*) :

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé :

❖ **Equations électriques:**

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine représentée par la équation.II.5 on peut écrire :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MADA sont données par:

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

❖ **Equations magnétiques:**

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

II.7.2 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park):

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques . Cette transformation est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha \beta)$, puis vers le repère (dq) .

Le repère $(\alpha \beta)$ est toujours fixe par rapport au repère (abc) du stator par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe $(\alpha\beta)$ un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park .

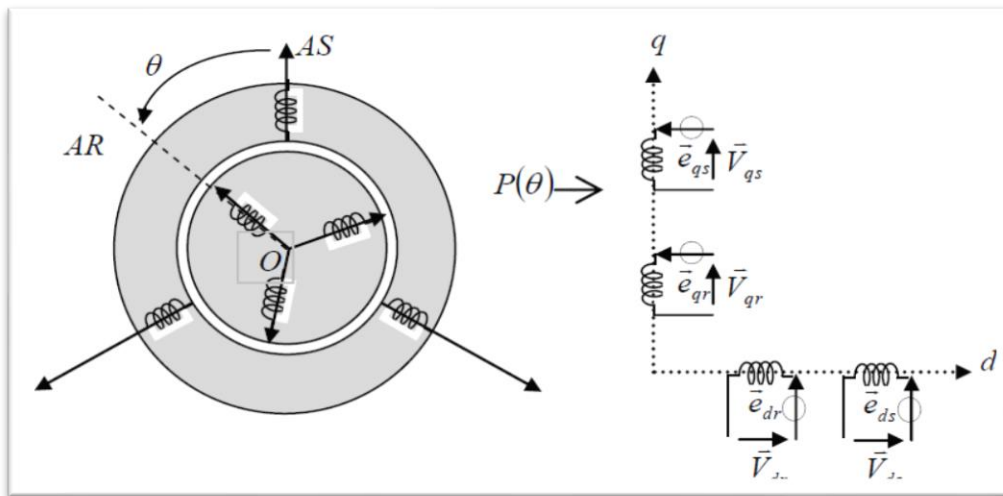


Figure.II.4 Représentation de la MADA dans le repère de Park[10]

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

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

Cette matrice permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes biphasées.

II.8 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.

II.9 Application de la transformation de Park à la GADA:

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont $\omega_{coord} = \omega_s$

• Tensions:

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

• Courants :

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}]_r \end{cases}$$

• Flux:

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

II.9.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq) :

❖ Equations électriques:

En multipliant les systèmes des équations (II.5) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.7)$$

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad J: \text{appelée matrice de rotation.}$$

❖ **Equations magnétiques :**

En multipliant les systèmes des équations (II.6) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

❖ **Equations électriques sous forme matricielle:**

Les deux systèmes des équations (II.7) et (II.9) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Ce système d'équation (II.10) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \\ + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\Longrightarrow [V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (\text{II.12})$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][I] \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Dont :} \quad [V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

❖ Expression de la puissance active et réactive:

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (II.14)$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (II.15)$$

Expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{qs} I_{sd}) \quad (II.16)$$

II.10. Résultats de la Simulation:

Les théories et les équations citées seront modélisées pour permettre un traitement avec MATLAB/SIMULINK. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 5 KW.

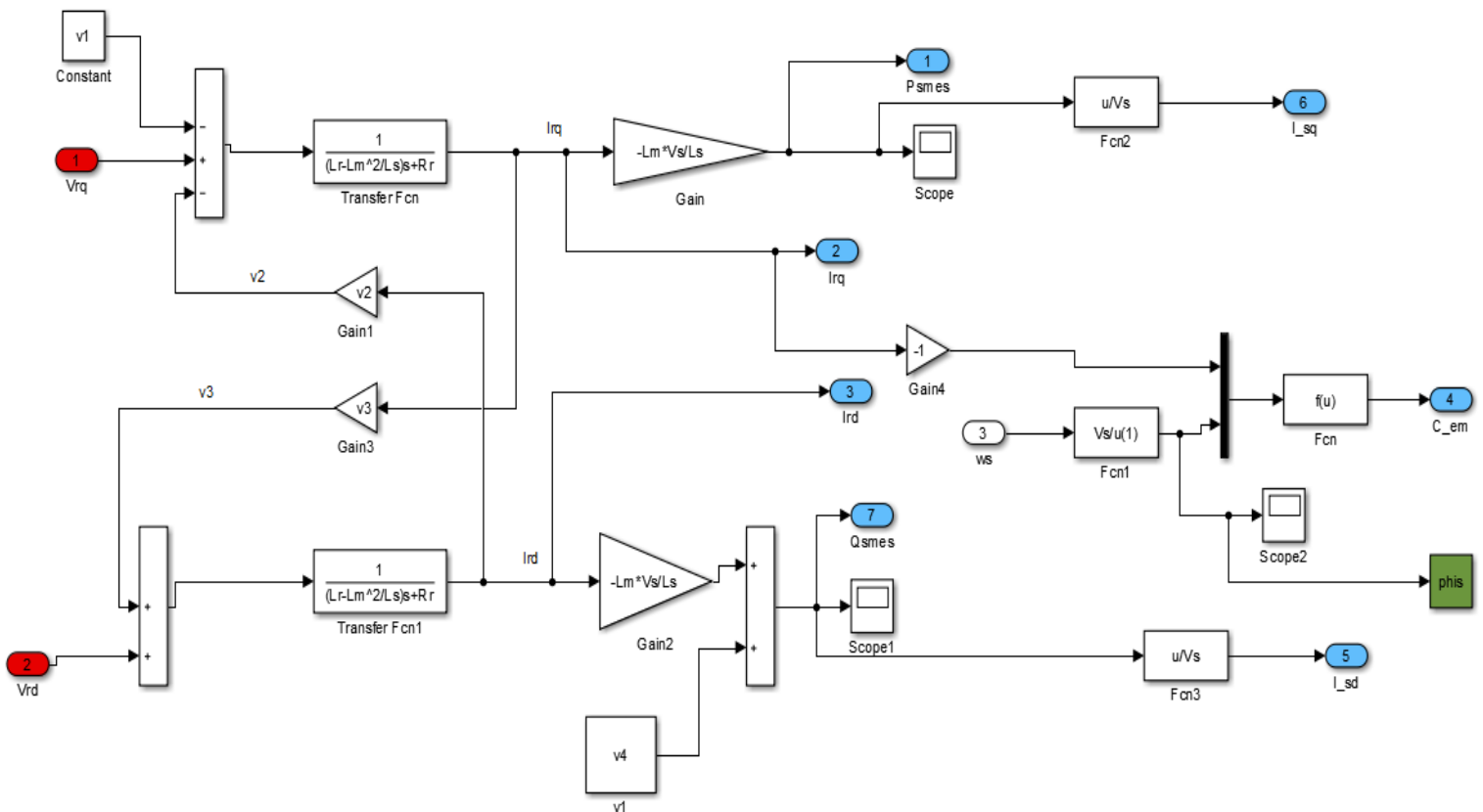


Figure. II.5: Schéma bloqué de la modèle de GADA

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 5KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 300 rad/s. Les résultats obtenus montrent que :

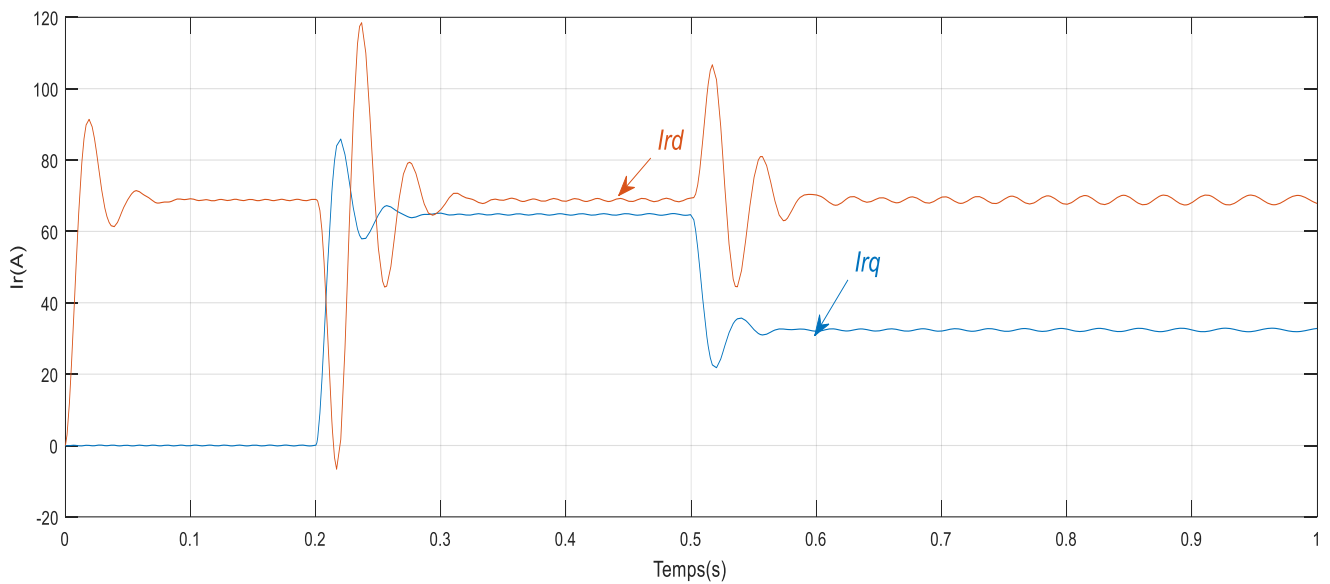


Figure II.6: Courbe du courant rotorique (Ird, Irg)

- dans la figure suivante on remarque que les résultats ont des perturbations et dépassement dans les points de changement.

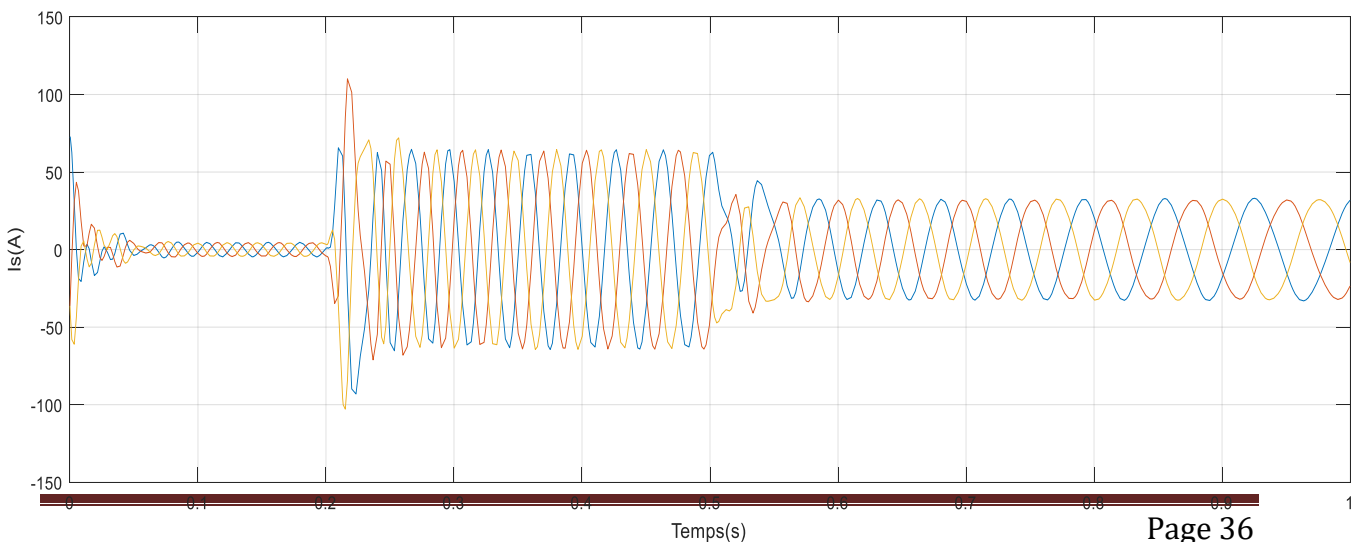
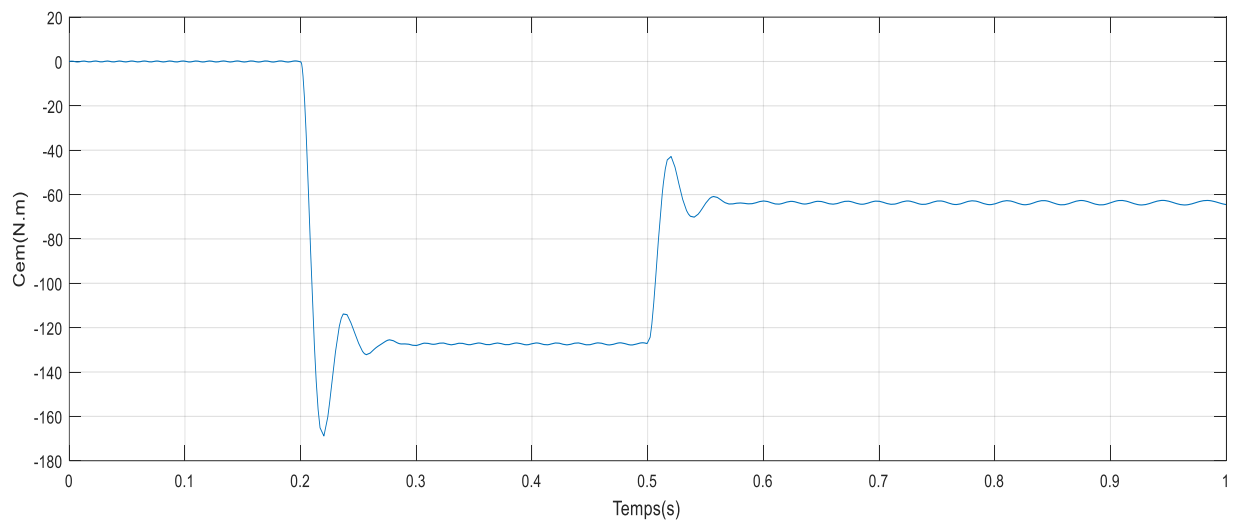


Figure II.7: Courbe du courant statorique

- dans la figure suivante on voit que le courant statorique prend la valeur 0 jusqu'à 0.2s, puis la valeur $\pm 60A$ jusqu'à 0.5, Puis la moitié de la valeur jusqu'à la fin

**Figure II.8:** Courbe du Couple électromagnétique

- dans la figure du couple suivant On voit que la courbe a des perturbations avec des dépassement dans les points de changement.

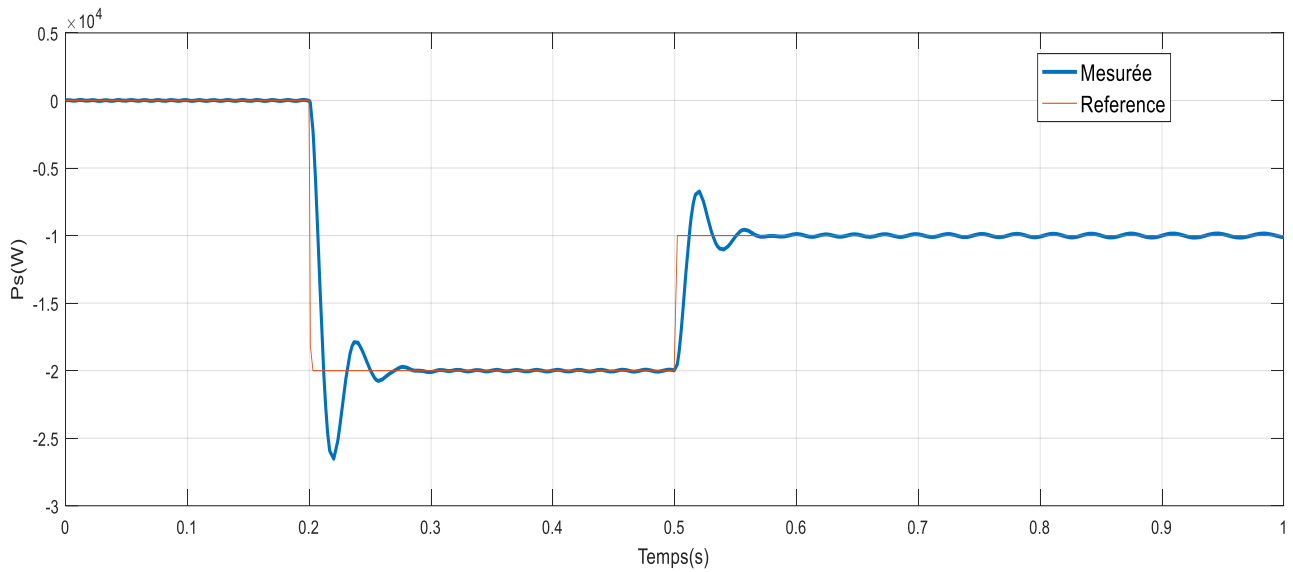


Figure II.9: Courbe de Puissance active statorique

- dans la figure suivante on remarque que la courbe de puissance active statorique suivi la référence avec des perturbations et dépassement dans les points de changement.

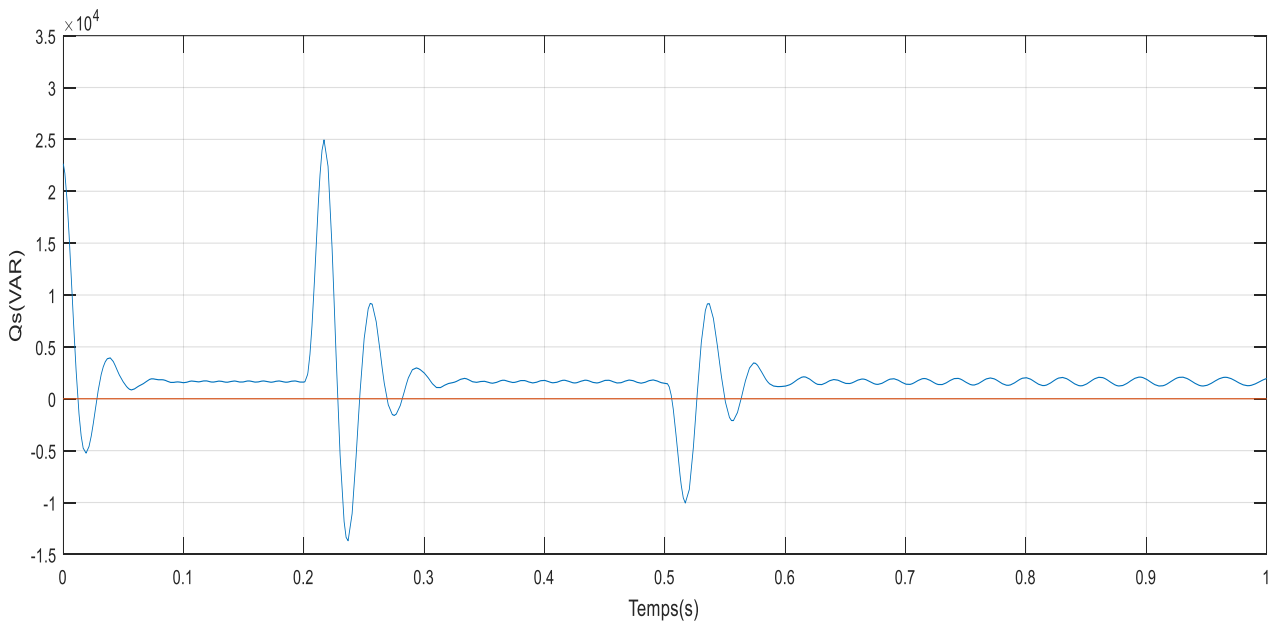


Figure II.10: Courbe de Puissance réactive statorique

- dans la figure suivante on remarque que la courbe de puissance réactive statorique suivi la référence avec des perturbations et peu d'erreur statique.

II.11. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés. Le prochain chapitre est consacré à l'étude du système de conversion d'énergie éolienne.

II.12. Références bibliographiques :

- [1] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, M. Hughes "Wind energy generation: Modeling and control" John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2009.
- [2] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, G. Strbac, "Control of DFIG-based wind generation for power network support" IEEE Transaction on Power Electronics, vol.20. PP 1958-1966. November 2005.
- [3] B. Nait-Kaci, M. L. Doumbia, K. Agbossou, A. Yousif, "Active and reactive power control of a doubly fed induction generator for wind applications" Proceedings of the IEEE EUROCON (EUROCON'09), pp. 2034–2039, St.-Petersburg, 2009.
- [4] M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [5] A. MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse. 05/04/2005.

- [6] A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [7] Global Wind Energy Council, "*Global Wind 2008 Report*", disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [8] S. KHOJET EL KHIL, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)". Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [9] Y. A. BENCHERIF, " Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2008.
- [10] R. S. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to- back PWM converters and its applications to variable-speed wind-energy generation," IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.
- [11] Pena. R.S, Clare. J. C, Asher. G. M, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, pp. 380-387, September. 1996.



Chapitre 3 :

CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

III.1. Introduction:

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Sur le fleuve du Nil, cette énergie a été utilisée pour faire avancer les bateaux à voile, en Chine comme au Moyen-Orient pour le pompage d'eau et l'irrigation, en Iran et en Afghanistan dans le broyage des céréales [1]. Pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique. Selon l'Observatoire des Energies Renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde. Suite à la crise pétrolière mondiale des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est de plus en plus performante et l'industrie éolienne a connu un essor considérable lors de la dernière décennie. Les turbines éoliennes sont de plus en plus puissantes. Le rendement et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens sont de plus en plus grands [2]. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Mais, pour déterminer ce potentiel il faut passer par le traitement statistique des mesures de la vitesse du vent. Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, ceci est dû à une topographie et un climat très diversifiés. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

II.2.L'Aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [3] qui est dans notre cas un générateur asynchrone à double alimentation (GADA), (Figure I.1).

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [4]:

- ✓ Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- ✓ Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- ✓ Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

III.3. Etat de l'art sur l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme «éolien» provient du nom du personnage mythologique *Eole*, connu en Grèce antique comme le maître des vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie calorifique du Soleil: les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propres durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales.

III.3.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

- **Les avantages :**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois;
- ✓ l'énergie éolienne est abondante: le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable;
- ✓ l'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation;

Au-delà de la donnée économique et environnementale, l'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

- **Les inconvénients :**

- ✓ La pollution visuelle et sonore. La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations;

Sur le plan technique, l'éolien a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production de l'énergie électrique:

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible;
- ✓ Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux. En effet, tant que ce type de production

reste marginal, les contraintes sont limitées. Aussi pendant longtemps les parcs éoliens n'ont souvent eu pour seules « contraintes » que de produire lorsqu'il était possible de produire et de ne pas dégrader la qualité de tension sur les réseaux.

Aujourd'hui, du fait du développement important et toujours croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à des exigences techniques de plus en plus sévères imposées par des règles de raccordement aux réseaux définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux.

III.3.2. Eoliennes à vitesse variable:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui permet de capter et transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La structure de base des turbines éoliennes consiste aujourd'hui en:

- un rotor pour capter l'énergie du vent et la transformer en énergie mécanique,
- un système d'engrenage pour multiplier la vitesse de rotation du rotor,
- une machine électrique pour convertir l'énergie mécanique en électricité.

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes qui appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation: celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920 avec un certain succès. Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisés, puisque les contraintes mécaniques au niveau du sol occupent plus d'espace



a) Eoliennes à axe vertical



b) Eoliennes à axe horizontal.

Figure III.1: Exemples d'éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [6][7].**III.3.3. Éoliennes à axe horizontal:**

Les aérogénérateurs à axe horizontal (figure III.1. b) sont les plus utilisés actuellement comparativement à ceux à axe vertical puisque ils présentent un prix moins important. De plus, ils sont moins exposés aux contraintes mécaniques [5]. Ils sont constitués d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le rotor tripales est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le prix et la vitesse de rotation du capteur éolien [6]. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont tripales à axe horizontal. [7]

Les éoliennes peuvent être classées aussi en trois catégories selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau suivant:

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12 m	< 40 kW
moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
grande puissance	> 46 m	> 1 MW

*Tableau III.1 : Les catégories des éoliennes selon leurs puissances [1]***III.3.4. Constitution d'une éolienne à axe horizontal:**

La figure III.2 représente les différents composants d'une éolienne *NORDEX S77/1500kW_e* [8]

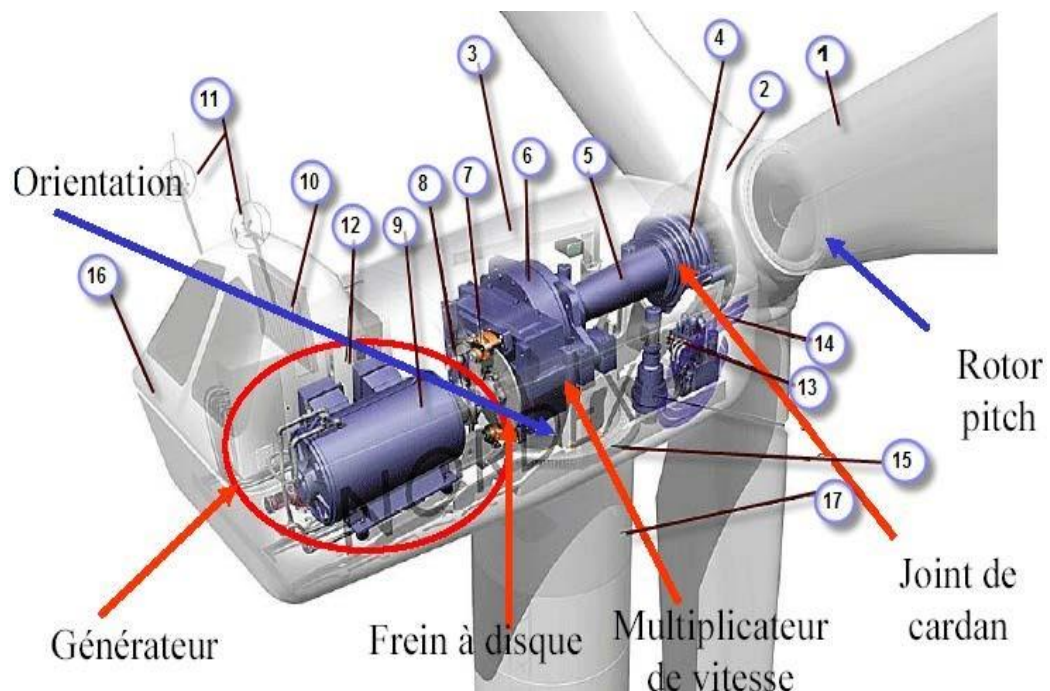


Figure III.2: Composants d'une éolienne[8]

1	Pales	7	frein à disque	13	centrale hydraulique
2	Moyeu de rotor	8	Accouplement	14	mécanisme d'orientation des pales
3	nacelle	9	Génératrice	15	paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
4	cardan	10	radiateur de refroidissement		
5	transmission	11	centrale de mesure du vent	16	Capot
6	multiplicateur de vitesse	12	Contrôle	17	Mat

Figure III.2: Composants d'une éolienne[8]

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs à axe horizontal qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois principaux éléments:

- **Le mât:** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- **La nacelle:** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique: arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle sont nécessaires pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent.
- **Le rotor :** est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor tripales est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

III.3.5. Le vent:

Le vent est né sous l'influence des différences de température et de pression. Le soleil est à l'origine de ce phénomène (figure III.3.A). Il réchauffe l'océan et le continent, mais à des vitesses différentes (Figure III.3.B). Une fois réchauffés, ils réchauffent la masse d'air qui les recouvre. Le volume d'air augmente au fur et à mesure qu'il est chauffé (Figure. III.3.C), ce qui provoque un

déplacement des particules d'air (Figure. III.3.D) et commence à fonctionner en capturant l'énergie cinétique de l'éolienne.



Figure. III.3. A

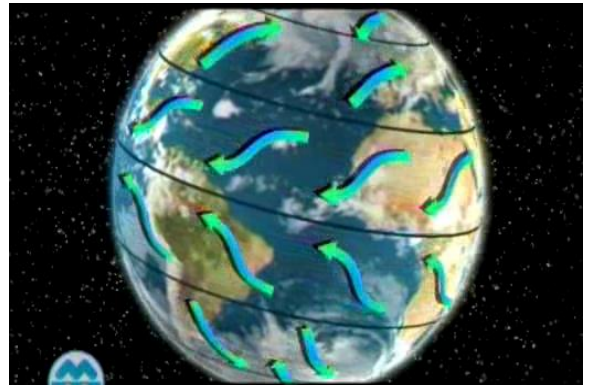


Figure. III.3. B

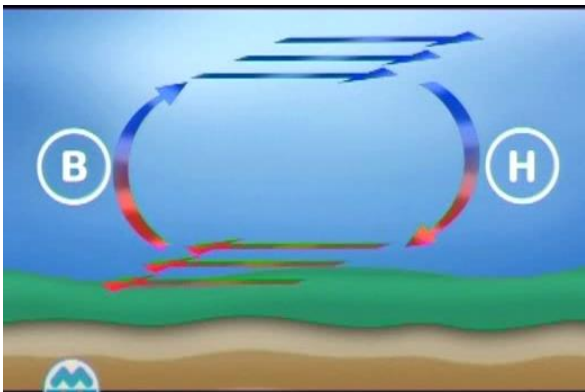


Figure. III.3. C



Figure. III.3. D

Figure. III.3 La naissance du vent

III.3.5.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne:

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J. C environ [9].

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des

terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. L'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [10].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

Au total, la puissance du parc éolien mondial a atteint 591 GW à fin 2018 selon GWEC qui n'a pas encore communiqué ses données sur les productions associées (1 096 TWh en 2017 selon les dernières données de l'AIE). Selon GWEC, les installations de nouvelles éoliennes pourraient dépasser 55 GW par an d'ici à 2023. Il est en particulier attendu « une énorme croissance en Asie » (Asie du Sud-Est en particulier), celle-ci étant toutefois conditionnée en partie au politiques de soutien public mises en œuvre dans cette région [11].

III.3.5.2. Définition de l'énergie éolienne:

Le SCE (Système de Conversion Eolien), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. III.4).

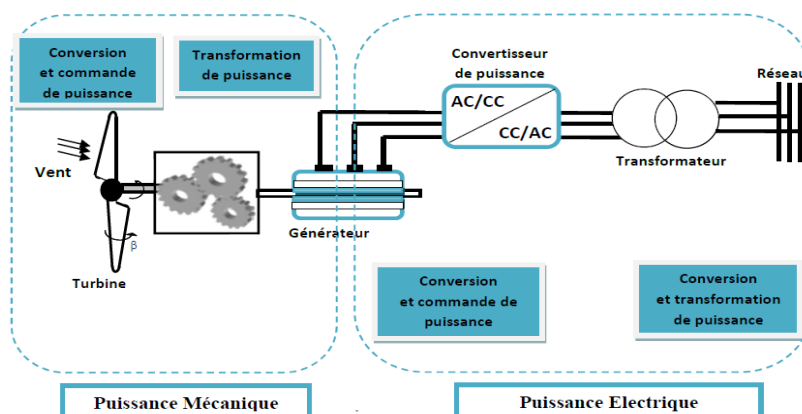


Figure III.4 : Principaux organes du système de conversion éolienne [12]

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [13].

III.3.5.3. Variabilité temporelle:

Le vent étant une source intermittente, sa direction et sa vitesse changent rapidement avec le temps. En accord avec ces changements, la puissance et l'énergie éolienne disponibles dans un site donné varient, comme illustré dans la figure III.5.

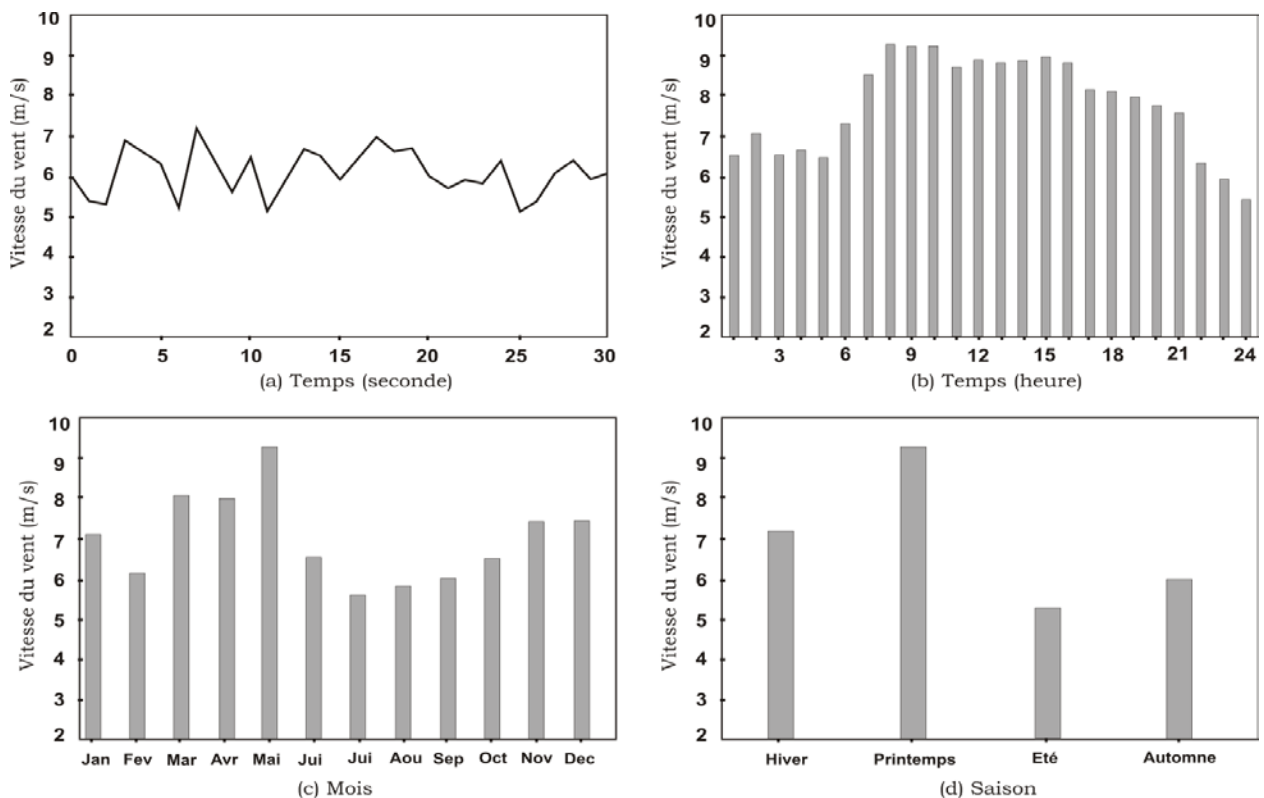


Figure III.5: Variations temporelles de la vitesse du vent [14]

III.3.5.4. Variabilité spatiale:

Le vent est aussi caractérisé par sa variabilité spatiale, comprenant ainsi deux catégories. D'un côté la variabilité spatiale régionale qui est en fonction de la latitude, de son ensoleillement et des reliefs (géographiques). D'un autre côté, la variabilité spatiale locale qui prend en compte la topographie, les obstacles ainsi que la rugosité du sol.

III.3.5.5. Mesure de la vitesse du vent:

La composante horizontale du déplacement de l'air en un point et à un instant donné se dispose selon une certaine direction. Elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée «vitesse du vent». Elle est mesurée généralement en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœuds ou miles par heure.

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de coupelles, l'anémomètre peut être muni d'une hélice, une solution qui est cependant assez rare.



a) anémomètre [15]



b) girouette [15]

Figure III.6: Outils de mesure de la vitesse du vent [16]

III.3.5.6. Pylônes de mesure:

En général, les données éoliennes disponibles dans tous les pays ont été recueillies près des agglomérations. Les populations se regroupent dans des zones abritées des tempêtes et des vents violents. Par conséquent, les données fournies par les aéroports, les bases militaires et les stations météorologiques ne sont pas toujours représentatives des vents qui soufflent en des lieux particulièrement exposés, où le potentiel éolien de certaines zones peut être sous-estimé. Il est donc nécessaire d'implanter des mâts dans des sites adéquats pour mesurer les paramètres du vent.

Les paramètres météorologiques relevés sur un pylône implanté par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) à la station météorologique de *Ksar El Chellala*, sont utilisés pour l'étude (figure III.7). Le mât équipé de stations automatiques de mesure aux niveaux 2, 4, 10, 20, 30, 40 et 50 m. La température, l'éclairement solaire global et la vitesse du vent sont mesurés toutes les 10 mn.

Les règles de dégagement classiques de l'OMM sont de placer les capteurs à 10 m au-dessus du sol et sur un terrain dégagé [17], devant respecter les critères suivants:

Le pylône doit être installé à une distance au moins égale à dix fois la hauteur des obstacles environnants.

- ✓ Les obstacles ne doivent pas dépasser une hauteur de 5,5 m dans un rayon de 100 m autour
- ✓ Les obstacles de hauteur inférieure à 2 m peuvent être négligés.
- ✓ Un changement de relief dans un rayon de 100 m est aussi considéré comme un obstacle.
- ✓ Les capteurs doivent être situés à une distance minimale de quinze fois la largeur d'un obstacle mince (mât, arbre mince) qui dépassent une hauteur de 8 m

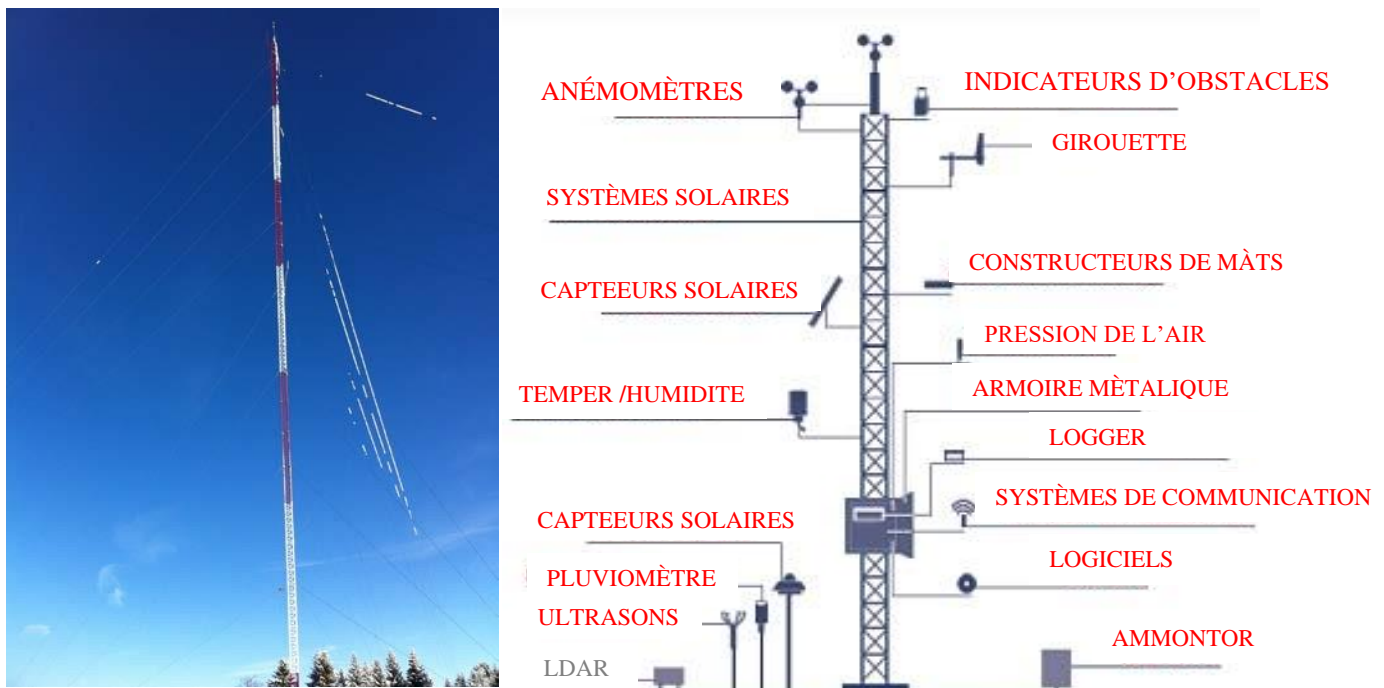


Figure III.7: Station de mesure du vent [18] [14].

III.3.6. Energie éolienne en Algérie:

III.3.6.1. Gisement éolien en Algérie:

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37 % de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3 % de la production d'électricité en 2030 [19].

Actuellement, l'intérêt sur l'énergie éolienne en Algérie a connu une certaine croissance et de nombreuses études ont été réalisées sur le potentiel éolien depuis 1984.

III.3.6.2. Carte des vents en Algérie:

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par *Kasbadji-Marzouk* [23] en utilisant les données répertoriées en 1990 par *Hammouch* [22]. La carte a été réajustée par le même auteur en 2006 avec laquelle *Kasbadji-Marzouk* a présenté sa thèse de doctorat [24]. En 2011, *Chellali* et al [25]. ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [14].

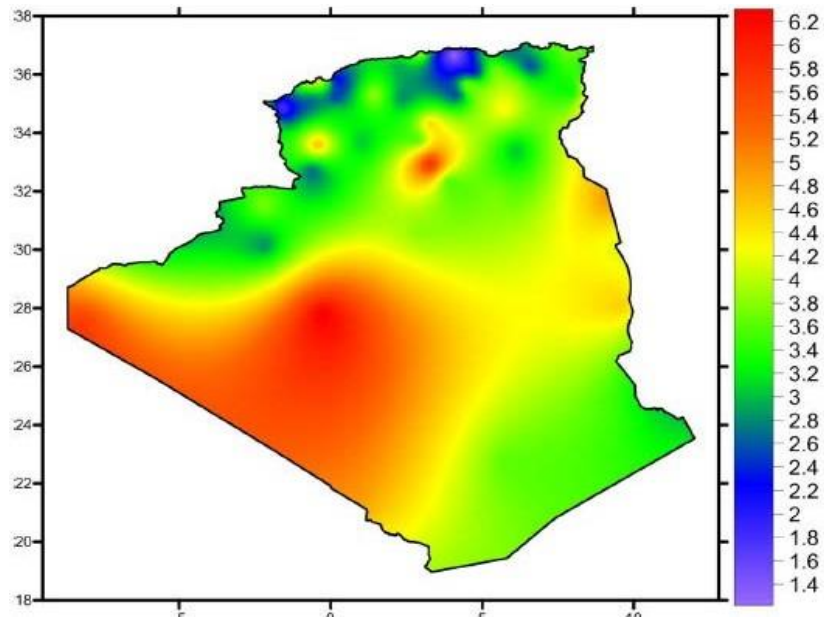


Figure III.8: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s) [14]

Le travail le plus récent pour l'établissement des cartes des vents (Atlas des vents) en Algérie est celui de *S. Boudia* dans sa thèse de doctorat en 2013 [14], où il a introduit des vitesses moyennes annuelles données de 24 stations météorologiques situées près des frontières Algériennes. La période de mesure s'est effectuée durant la dernière décennie à 10 m du sol. La figure ci-dessous montre la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure III.8.

Selon la cartographie représentée à la figure I.10, le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

III.3.6.3. Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie :

La première éolienne qui a été installée en Algérie revient à la période de la colonisation française, en 1953 par « le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique » relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du sud algérien. Actuellement, elle existe à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m.



Figure III.9: Photo d'une première éolienne installée en Algérie [27]

Jusqu'à maintenant, la puissance extraite à partir des énergies renouvelables installée en Algérie est insignifiante, au moins par rapport à ses voisins (le Maroc et la Tunisie). L'énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le programme est lancé à la fin de l'année 2011 et supposé générer 22 GW en 2030. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% (1,7 GW) de la production d'électricité en 2030.

Il est clair donc que l'énergie éolienne constitue un second axe de développement des énergies renouvelables en Algérie, (après le solaire). Dans ce cadre, la wilaya d'Adrar a bénéficié, à la faveur d'un partenariat algéro-français, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune, localisée dans la zone de Kabertene (80 km au nord d'Adrar). Les éoliennes fournies par l'Espagnol *Gamesa* délivrent leurs 10 MW de puissance à la vitesse de 8 m/s du vent. Ces éoliennes sont connectées au réseau de transport. Par ailleurs, des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2020. À cet effet, ce programme consiste en l'acquisition de 10 stations de mesure météorologique.



Figure III.10: La ferme éolienne à Adrar [28]

Globalement, l'objectif de la première phase de programme est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Ce taux devrait être supérieur à 80% sur la période 2021-2030, grâce à l'extension des capacités de fabrication des mâts et des rotors d'éoliennes et le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle [29].

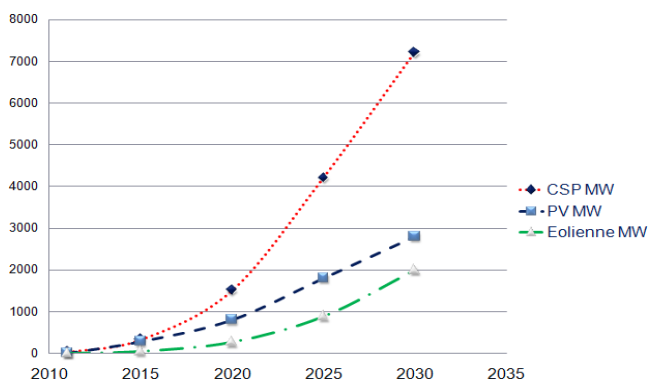


Figure III.11: Prédiction de développement des énergies renouvelables en Algérie [30]

III.3.6.4 Production mondiale d'électricité éolienne :

En cinq ans, la puissance éolienne installée a été multipliée par trois dans le monde, passant de 299 GW à 563 GW. La capacité éolienne a augmenté de 264 GW de 2013 à 2018. Les pays précurseurs dans le monde ont été le Danemark, l'Allemagne et l'Espagne. Récemment, la Chine et les États-Unis sont devenus les pays possédant la plus grande capacité éolienne installée, précédant l'Allemagne et l'Espagne qui restent cependant les pays disposant de la plus grande puissance éolienne par habitant avec le Danemark.

	EU	Etats-Unis	Canada	Chine	Inde	Japon	Monde
2011	94 012	45 676	5 265	46 355	16 179	2 419	219 984
2012	106 171	59 075	6 201	61 597	17 300	2 562	266 866
2013	117 141	59 973	7 801	76 731	18 420	2 645	299 941
2014	128 662	64 232	9 694	96 819	22 465	2 753	349 185
2015	141 501	72 573	11 214	131 048	25 088	2 808	416 225
2016	154 316	81 386	11 973	148 517	28 700	3 246	467 052
2017	168 978	87 543	12 403	164 392	32 848	3 392	514 622
2018	179 420	94 295	12 816	184 696	35 288	3 653	563 726

Tableau III .2 : Puissance éolienne installée dans le monde de 2011 à la fin de 2018 (en MW) [31]

III.4. Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

III.4.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (III.12) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{III.1})$$

La puissance $P_{aér}$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{III.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (III.2):

$$P_{aér} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{III.3})$$

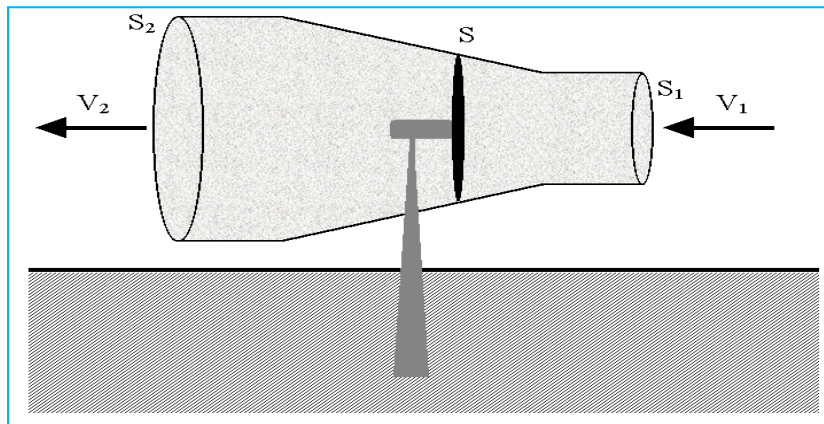


Figure. III.12: Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^2}{2} \quad (\text{III.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (III.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. III.13), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{16}{27}$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [32] .

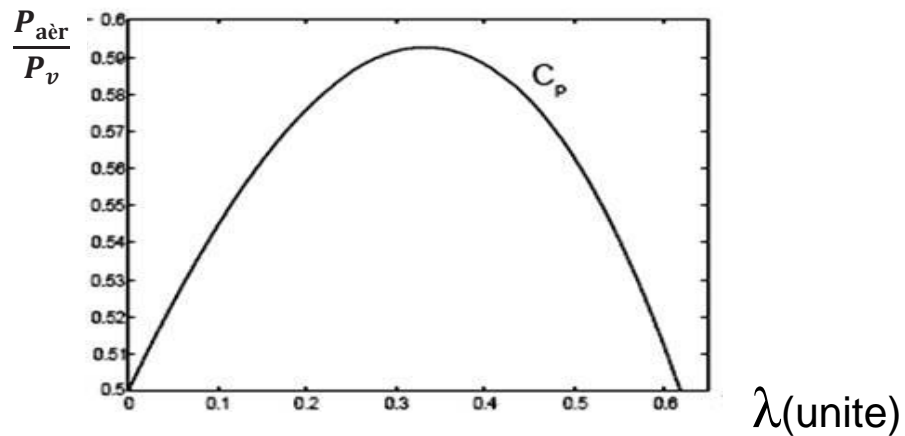


Figure. III.13: Coefficient de puissance[32]

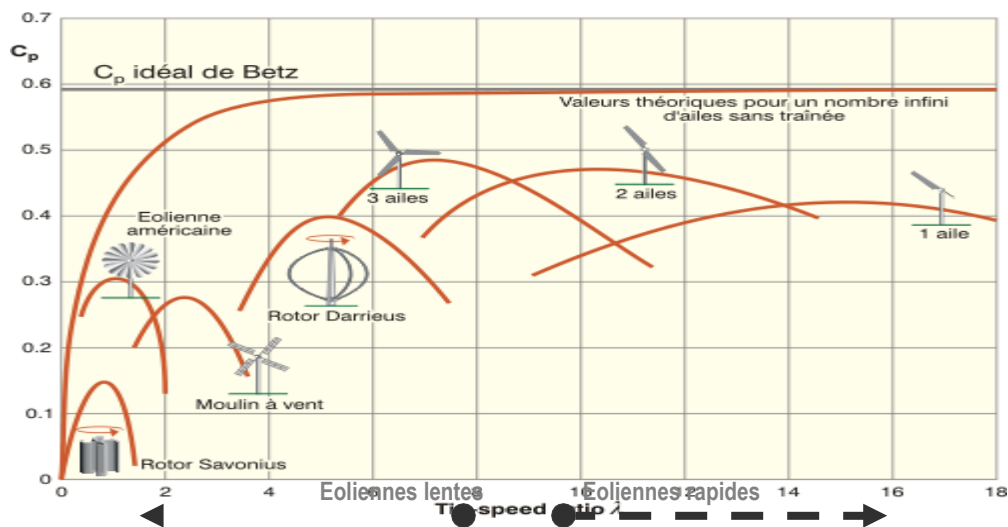


Figure III.14: Coefficient de puissance CP (λ) pour différents types des turbines éoliennes [33]

III.4.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (III.3), (III.4) et (III.5), la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aér} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (III.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (III.7)$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p\left(\frac{R \cdot \Omega_2}{K \cdot V_1}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (III.8)$$

Avec :

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure. III.15).

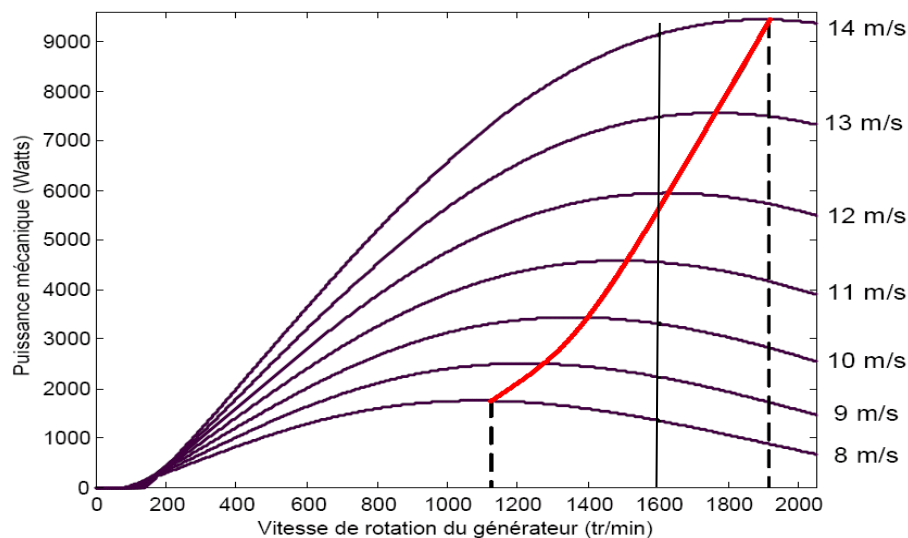


Figure. III.15: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné en fonction de Vitesse de rotation du générateur[34]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure (III.15) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de

puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [34]

III.5. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne:

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse [35].

III.5.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall":

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessite une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure. III.16) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [36].

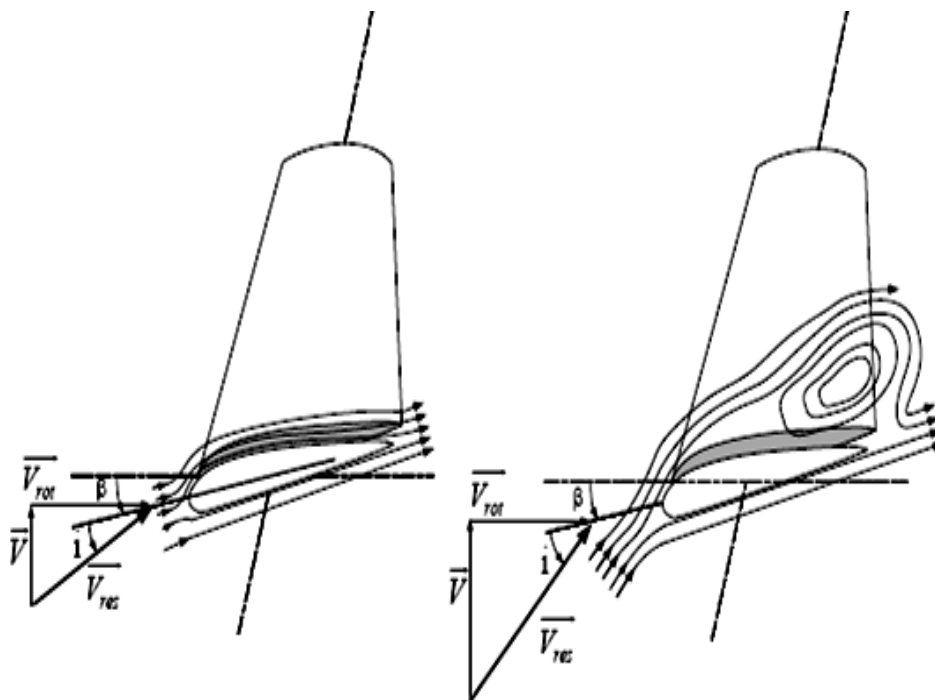


Figure. III.16: Flux d'air sur un profil de pale "Stall"[36]

III.5.2 Système d'orientation des pales « Pitch » :

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle décalage (Figure. III.17) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. III.18) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [37].

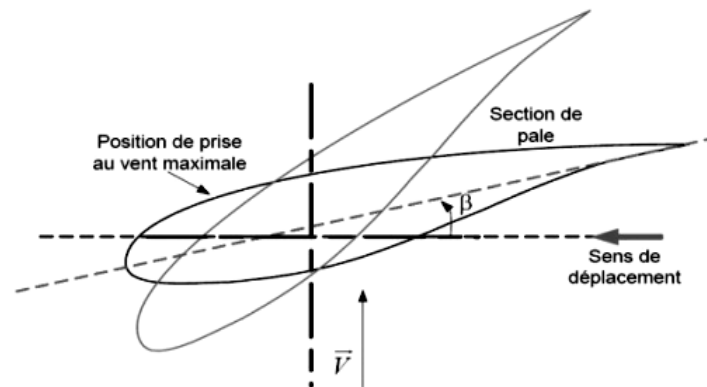


Figure. III.17: Variation de l'angle décalage d'une pale [37]

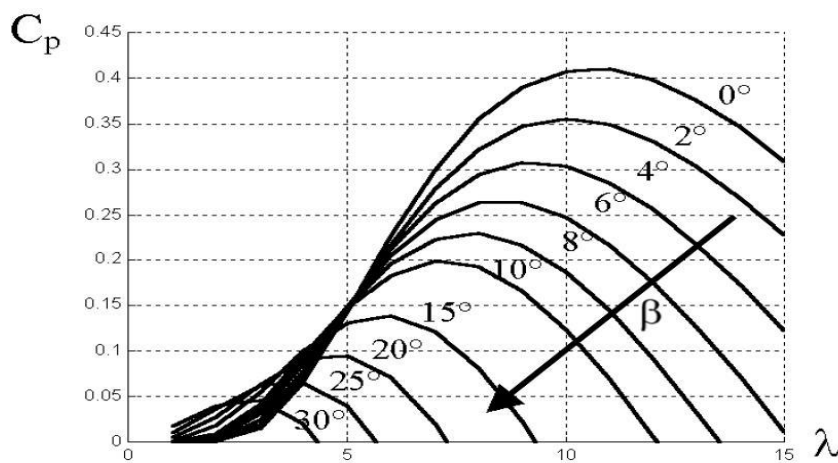


Figure. III.18: Flux d'air sur un profil de pale " Stall " [37]

III.6. Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne à vitesse variable:

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont décrites dans les paragraphes suivant en tenant compte de leurs spécificités. Les machines à induction et particulièrement la MADA sont

devenues de plus en plus populaires pour la production d'énergie électrique à partir du vent [38-39].

[7-9]. Actuellement, le système éolien à vitesse variable, basé sur une MADA, est le plus utilisé dans les fermes terrestres [40-41]. C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette thèse.

III.6.1. Avantages des éoliennes fonctionnant à vitesse variable:

La configuration soit électrique ou mécanique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne est à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de ces configurations. On entend par vitesse variable le fait que la vitesse de rotation du rotor peut être variable en fonction de la vitesse du vent. Inversement, une éolienne fonctionnant à vitesse constante implique une vitesse de rotation constante du rotor quelque soit la vitesse du vent.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés à ceux à vitesse fixe sont les suivants:

- ✓ les éoliennes à vitesse variable augmentent la plage de fonctionnement, notamment aux faibles vitesses de vent,
- ✓ elles nécessitent un système d'orientation des pales simple. 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 de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses du vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe,
- ✓ elles réduisent les efforts mécaniques, par conséquent, le taux de vieillissement des éléments est réduit aussi,
- ✓ une réduction des fluctuations et flickers,

Globalement, les éoliennes fonctionnant à vitesse variable permettent une meilleure exploitation de la puissance du vent et une bonne adaptation au réseau électrique.

La distinction entre les éoliennes peut se faire aussi par transmission avec ou sans multiplicateur. Cet élément est intégré entre l'hélice et le générateur, il a le rôle de multiplication de la vitesse de rotation afin d'adapter la vitesse de la génératrice et celle de la turbine. On peut prendre la transmission directe comme un avantage pour le système de conversion éolienne.

III.7. Modélisation du système éolien à vitesse variable base sur une MADA:

III.7.1. Description du système éolien:

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, base sur une MADA, La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également a travers des convertisseurs statiques triphasés a IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor. Celui-ci est muni de système bague/balais. Ces convertisseurs cotes MADA et réseaux, sont commandes en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [42].

On procède maintenant à étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne.

III.7.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne:

La chaîne de conversion éolienne est constituée de la turbine, du multiplicateur et de la GADA. L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Par la suite, la GADA transforme la puissance mécanique en puissance électrique.

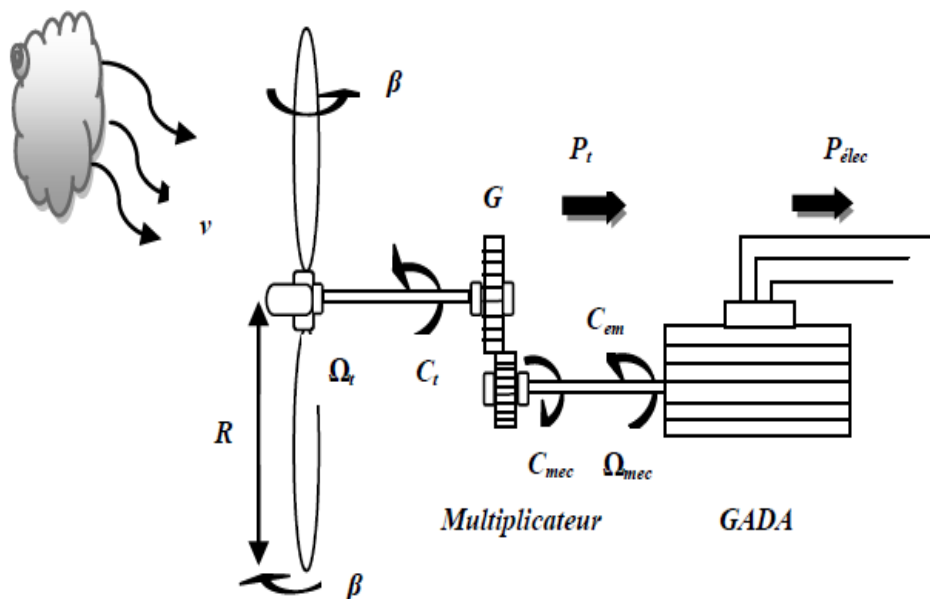


Figure.III.19: Configuration d'une éolienne.

III.7.3 Modélisation de la vitesse du vent :

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent.

La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. [43]

La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t)$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{III.9})$$

prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de vent

$$v(t) = 5.7 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (\text{III.10})$$

III.7.4 Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal:

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [44] :

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

II.8. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine:

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure III.20).

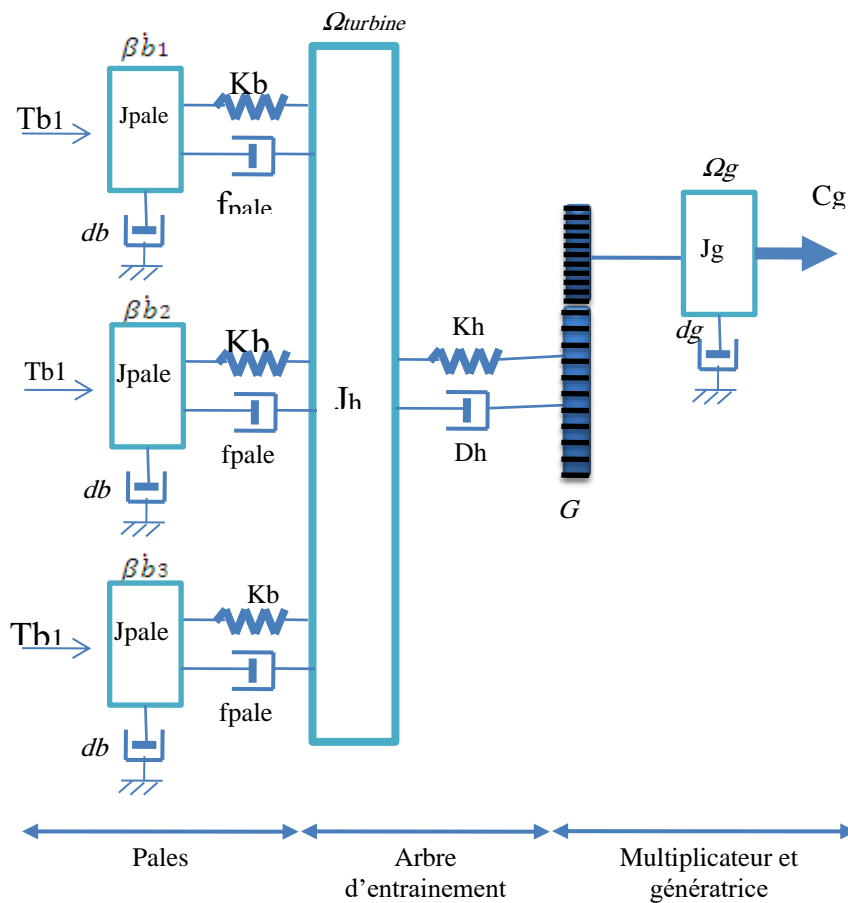


Figure. III.20: Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité Kb
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1$, $\dot{\beta}b_2$, $\dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1 , Tb_2 , Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie Jh
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie Jg
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb1 = Tb2 = Tb3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la cote de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure III.20) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [45].

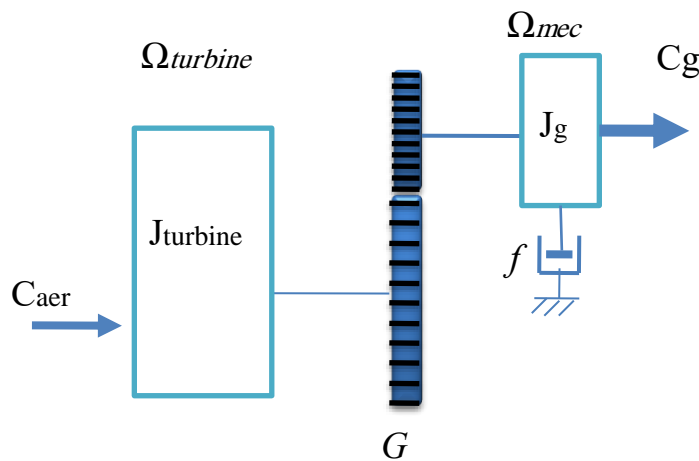


Figure. III.21: Modèle mécanique simplifié de la turbine

III.8.1 Modélisation de la turbine :

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

L'énergie cinétique d'une masse d'air m (ρV) qui se déplace avec la vitesse v , est:

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{III.11})$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [28]:

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (\text{III.12})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S ($S = \pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v^2 \right] \quad (\text{III.13})$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{III.14})$$

$\frac{dx}{dt}$: La vitesse de vent v

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{III.15})$$

Où

– ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg.m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).

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

– v est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{III.16})$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine [46].

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ)

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

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{III.17})$$

Où

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

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{III.18})$$

❖ Coefficient de puissance C_p :

Généralement le coefficient C_p présente par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient C_p . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre N:

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{III.19})$$

Dans ce sens. Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne d'où, le coefficient C_p est donné par la formule suivante :

$$C_p = 7.95633\lambda^5 \cdot 10^{-5} - 17.375\lambda^4 \cdot 10^{-4} + 9.86\lambda^3 \cdot 10^{-3} - 9.4\lambda^2 \cdot 10^{-3} + 6.38\lambda \cdot 10^{-2} + 0.001 \quad (\text{III.20})$$

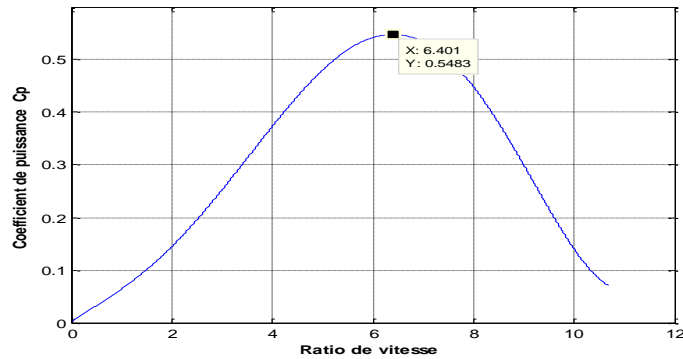


Figure. III.22: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

On peut remarquer sur la (Figure. III.22) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour laquelle on a un coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. La valeur maximale du coefficient C_p est 0,548 correspond à $\lambda = 6,4$.

III.8.1.1 Modèle du multiplicateur:

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{III.21})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{III.22})$$

III.8.1.2 Equation dynamique de l'arbre :

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{III.23})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{III.24}$$

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

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec}$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la (figure. III.23).

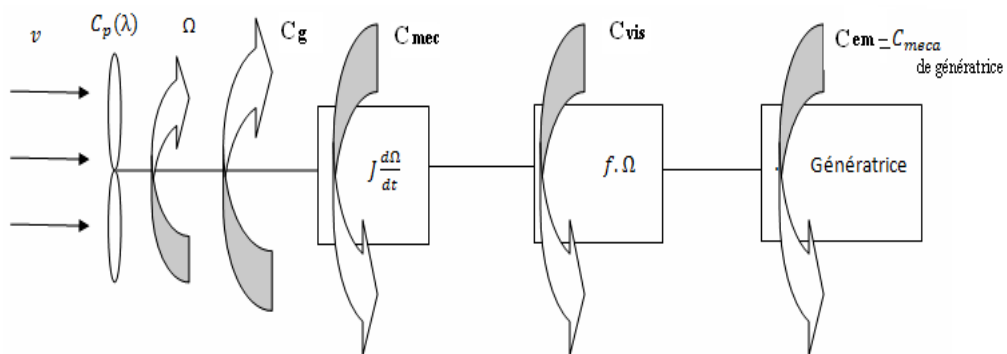


Figure. III.23: Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté dans la figure. III.24.

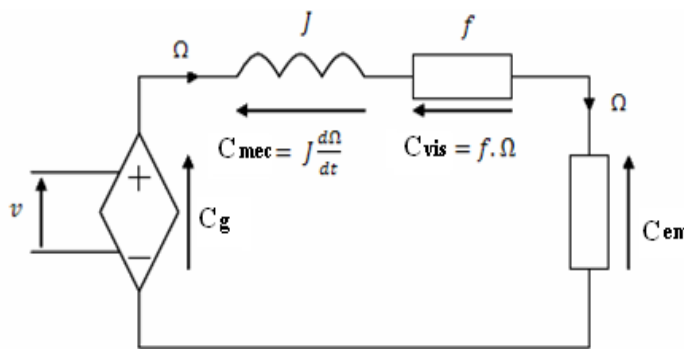


Figure. III.24: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \tag{III.25}$$

D'où en Transfer de LAPLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{js+f} (C_g - C_{em}) \quad (III.26)$$

III.8.2 Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure.(III.25), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

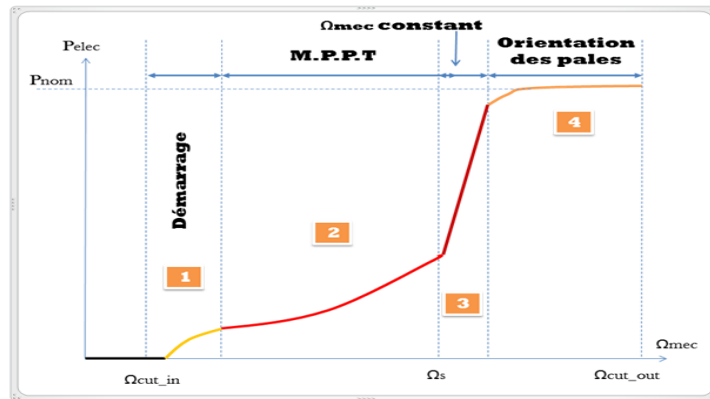


Figure. III.25: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-**Zone1** : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-**Zone2** : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-**Zone3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-**Zone4** : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control» [47].

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

III.8.3 Maximisation de la puissance extraite:

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

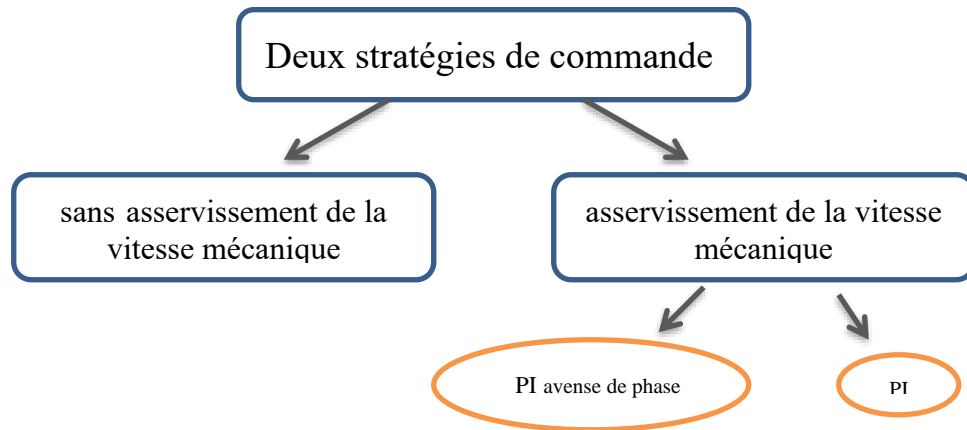


Figure. III.26: Stratégies de commande de la turbine[48].

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [48].

III.8.3.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse:

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III.27)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (III.28)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient:

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimée}} v^3_{estimée} \quad (III.29)$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (III.30)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{c_p \max}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p \max}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 c_{p \max}} \Omega_{mec}^2 \quad (III.31)$$

La figure. III.26.a représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

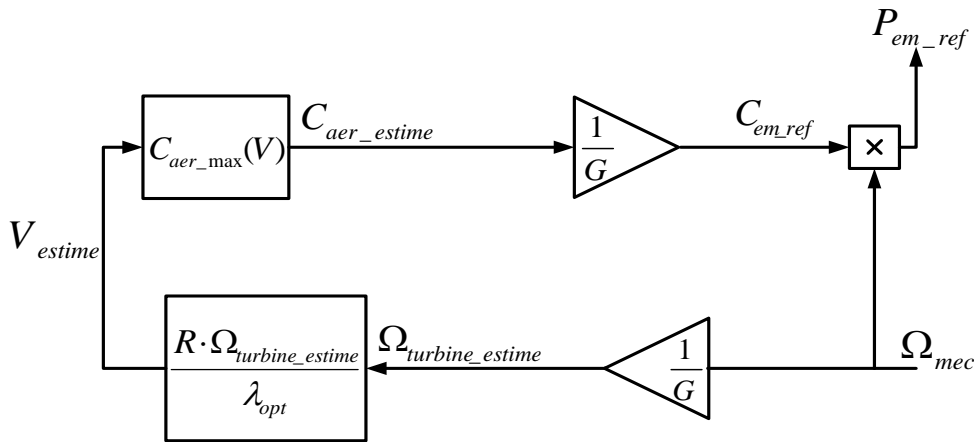


Figure. III.26.a Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

III.9. Résultats de Simulation et interprétations:

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine .

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer le couple produit à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent. Pour ce faire, Nous avons besoin de la valeur du couple électromagnétique de multiplicateur, couple qui serait imposée par la génératrice en fonction de la puissance qu'elle produit.

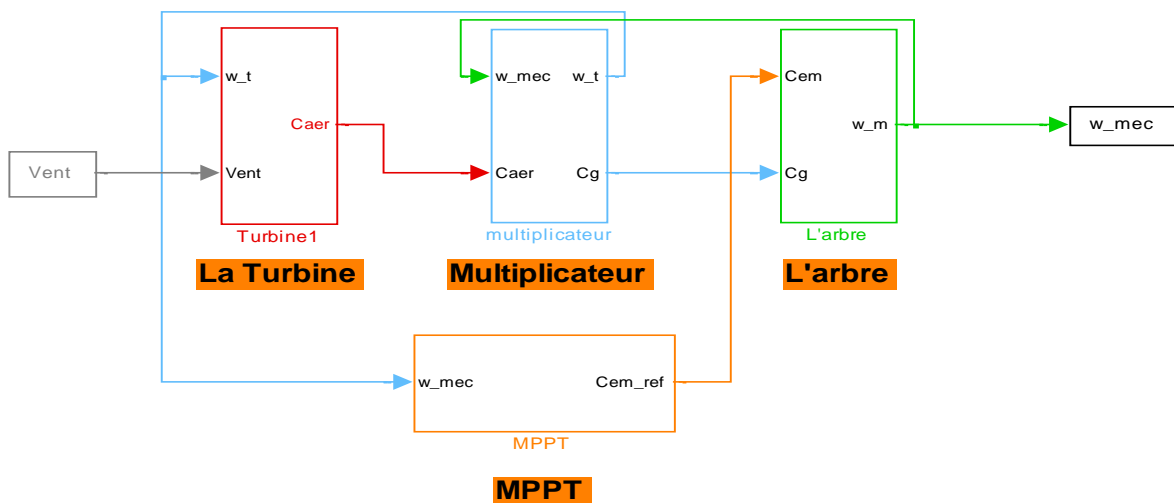


Figure. III.27: Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK

A. Profil du vent :

La figure (III.29) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

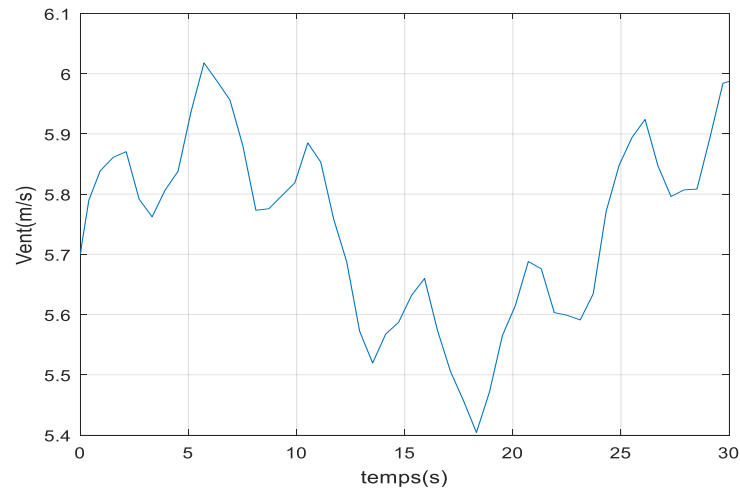


Figure III.29: Profil du vent

B. Le coefficient de puissance :

La figure (III.30) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (III.29).

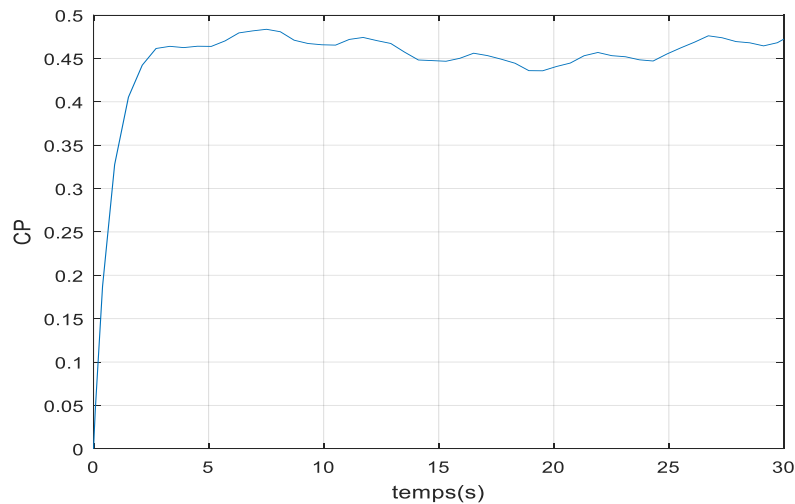


Figure III.30: Coefficient de puissance

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un λ_{optimal} .

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,78 il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

C. La puissance électrique et la Vitesse mécanique :

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par : $(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

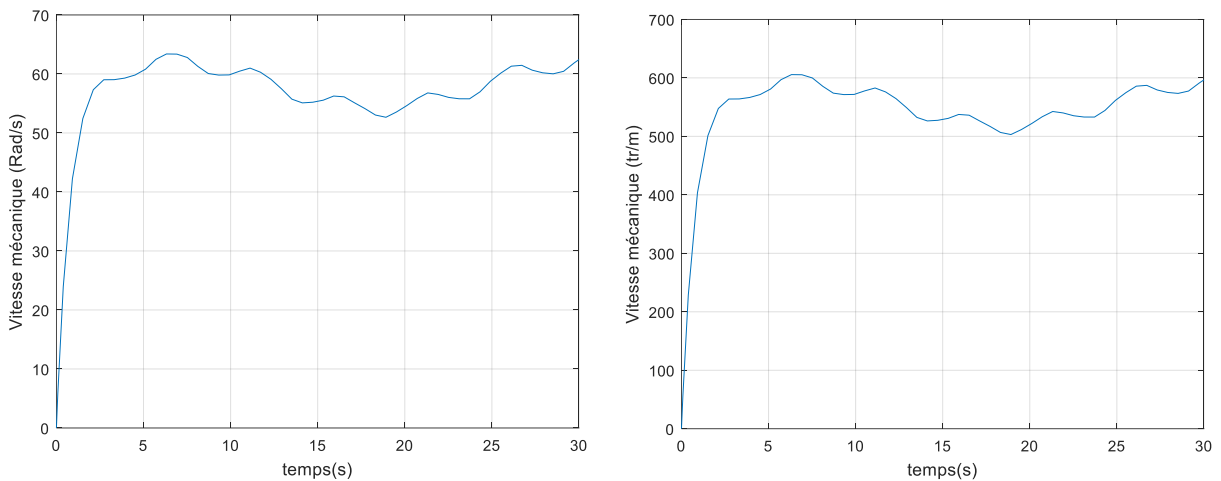


Figure III.31: Vitesse de rotation

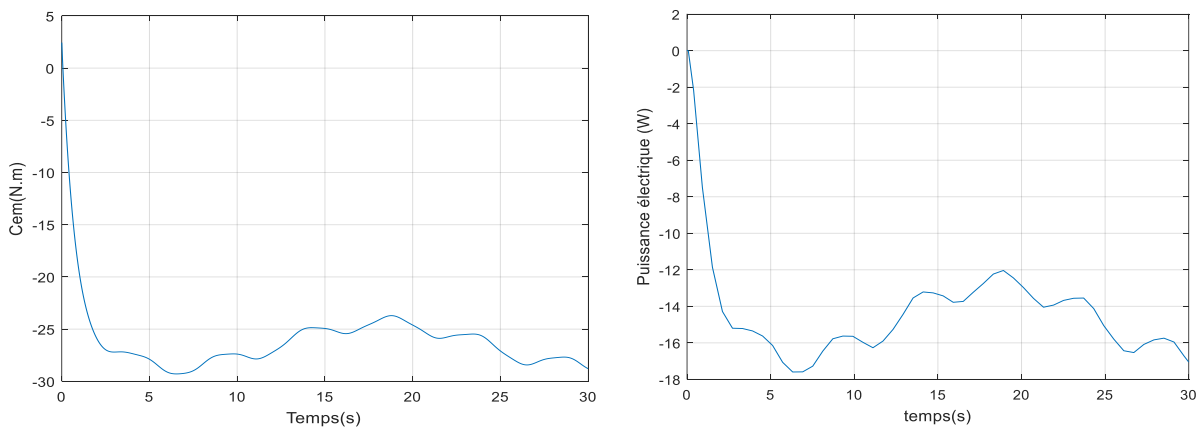


Figure III.32: Couple et Puissance électrique produite

III.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (**Loi de Betz**), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation (pitch, stall).

Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants. Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones à double alimentation.

III.11. Références bibliographiques :

- [1] S. Louassa , M. Merzouk , O. Guerri « Evaluation des performances de quatre types d'éolienne dans une zone aride » Evaluation des performances de quatre types d'éolienne dans une zone aride.
- [2] HAMDI NAOUEL « Amélioration des performances des aérogénérateurs» Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine. Soutenu le 03/07/2013.
- [3] A. Medjber, A. Mouldia, A. Mellit, M.A. Guessoum, "Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien," Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 4, pp. 316-322, 2012.
- [4] B. Multon, "Energie électrique : les enjeux," Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [5] Frédéric POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. Soutenu le 19 décembre 2003.
- [6] Adam MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Soutenu le 5 avril 2005.
- [7] Tarak GHENAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat Ecole Militaire Polytechnique d'Alger. Soutenu le 29/09/2011.
- [8] <http://www.nordex-online.com>
- [9] M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [10] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy . 11/12/2006.
- [11] Wind energy in Europe in 2018, Trends and statistics, WindEurope, février 2019.
- [12] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.

-
- [13] M. T LATRECHE, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012.
- [14] BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013.
- [15] <http://www.campbellsci.co.uk>
- [16] Miloud BENMEDJAHED « Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. Novembre 2013.
- [17] Martine O. L. Hansen "Aerodynamics of Wind Turbines" Second edition published by Earthscan in the UK and USA, 2008.
- [18] Z. Durisic, J. Mikulovic "Assessment of the wind energy resource in the South Banat region Serbia" Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 3014-3023.
- [19] Y. Himri, A. Boudghene Stambouli, B. Draoui, S. Himri "Review of wind energy use in Algeria" Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 910–914.
- [20] Said M.A. Ibrahim, 'Energy in the Arab World', Energy, Vol. 9, N°3, pp. 217 - 238, 1984.
- [21] F. H. Bensaad, 'The Algerian Programme on Wind Energy', Proceedings of WEAC, pp. 21 - 27, Oxford, 1985.
- [22] R. Hammouche, 'Atlas Vent de l'Algérie', Office des Publications Universitaires (OPU), Alger, 1990.
- [23] N. Kasbadji-Merzouk, 'Wind Energy Potential of Algeria', Renewable Energy, Vol. 21, N°3-4, pp. 553 - 562, 2000.
- [24] N. Kasbadji-Merzouk, "Evaluation du Gisement Energétique Eolien. Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie", Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [25] F. Youcef Ettoumi, 'Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie', Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Alger, 2002.
-

[26] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Reციoui, 'A Contribution in the Actualization of Wind Map of Algeria', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, N°2, pp. 993-1002, 2011.

[27] Bulletin des Energies Renouvelables Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables ISSN 1112-3850 Dépôt légal 2062-2002 CDER Semestriel N° 4 Décembre 2003.

[28] <http://portail.cder.dz/>

[29] « Développement des capacités industrielles pour réussir le programme de développement des énergies nouvelles et renouvelables » Extrait du Portail Algérien des énergies renouvelables.

[30] « Mise en œuvre des projets décidés dans le programme national de développement des énergies renouvelable » Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG.Spa). Octobre 2013.

[31] STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUEVELABLE 2019, IRENA

[32] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, "Stator Flux Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder", IEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 147, No 4, p. 241-250, July 2000.

[33] Troen I, Petersen EL. European wind atlas. Roskilde: Riso National Laboratory, ISBN 87- 550-1482-8; 1989.

[34] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, "Combined Magnetizing Flux Oriented Control of the Cascaded Doubly Fed Induction Machine", IEEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 148, No. 4, p. 354-362, 2001.

[35] Lecocq. D, Lataire. P.H, Wymeersch. W, "Application of the Double Fed Asynchronous Motor (DFAM) in Variable Speed Drives", EPE Conference, Brighton, Vol. 5, pp. 419-423, 13-16 September. 1993.

[36] Lecocq. D, Lataire. P.H, "The Indirect Controlled Double Fed Asynchronous Motor for Variable Speed Drives", EPE Conference, Vol.3, pp. 405-410, Sevilla, 19-21 September. 1995.

[37] Lecocq. D, Lataire. P.H, "Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages", Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.

-
- [38] Shadhu Khan PK, Chatterjee JK. “Three phase induction generators” a discussion on performance” *Electric Machines & Power Systems* 1999; 27: 813 – 32.
- [39] Abdullah Asuhaimi B.MohdZin, Mahmoud Pesaran H.A, Azhar B.Khairuddin, Leila Jahanshaloo, Omid Shariati “An overview on doubly fed induction generators’ controls and contributions to wind based electricity generation” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 (2013) 692–708.
- [40] F. O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, M. Hughes “Wind energy generation: Modelling and control” John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2009.
- [41] Ali BECHOUCHE «Utilisation des techniques avancées pour l’observation et la commande d’une machine asynchrone : Application à une éolienne» Thèse de doctorat de l’Université de Mouloud Mameri de Tizi-ouzou. Avril 2013.
- [42] Vidal. P. E, “Commande non Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [43] Masmoudi. A, Toumi. A, Kamoun. M, “Power on Analysis and Efficiency Optimization of a Doubly Fed Synchronous Machine”, *Proceedings Electric Machines and Power Systems* 21, pp. 473-491, 1993.
- [44] Drid. S, Nait-Said. M.S, Tadjine. M, “Double Flux Oriented Control for the Doubly Fed Induction Motor Electric Power Components and Systems”, Taylor & Francis Inc., 33:1081-1095, 2005.
- [45] Ramuz. D, “Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs”, Thèse, Institut de Génie Energétique de Belfort, UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l’Industrie de l’ Université de Franche Comté 90000 Belfort (France), mai 2000.
- [46] Hansen. L. H, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1205(EN), ISBN 87- 550-2743-8, 2001.
- [47] Petersson.A and S. Lundberg, “Energy efficiency comparison of electrical systems for wind
-

turbines’’, in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie/2002), Stockholm, Sweden, 12-14 Aug. 2002.

[48] Peresada, S, A. Tilli and A. Tonielli, “Robust output feedback control of a doubly fed induction machine’’, Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.



Chapitre 4 :

*Commande des puissance active et réactive de la
MADA*

IV.1. Introduction :

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter [1]. La génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande vectorielle est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes [2-3]. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable, comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive [4]. Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système [5-6]. Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance. Les performances et la production de puissance ne dépendent pas uniquement de la MADA, mais aussi de la manière avec laquelle les deux parties du convertisseur « back-to-back » sont contrôlées.

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [4].

IV.2. Principe de la commande vectorielle de la DFAM (MADA) :

Le contrôle vectoriel permet de modéliser la machine asynchrone 'MADA' comme une machine à courant continu, c'est-à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée figure. IV.1, où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q) , repère tournant biphasé orienté sur φ_r (flux rotorique) ou sur φ_s (flux statorique) et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux. Le découplage peut être réalisé par orientation du flux statorique ou du flux d'entrefer ou du flux rotorique.

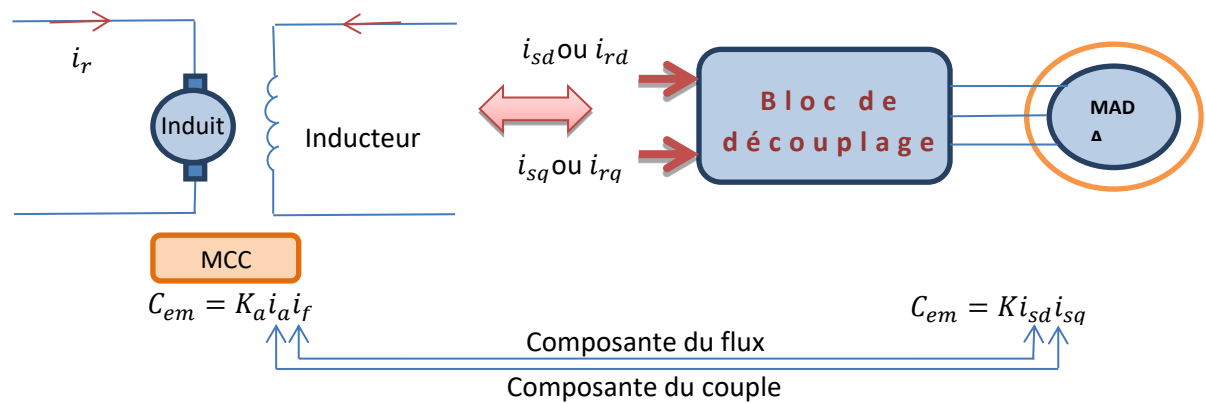


Figure IV.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant.

On a donc:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \& \quad \varphi_{sq} = 0$$

Les équations des tensions :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Si l'on néglige la résistance du stator 'R_s', les tensions statoriques V_{sd}, V_{sq} sont:

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} = V_s \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (IV.4)$$

L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure. IV.2

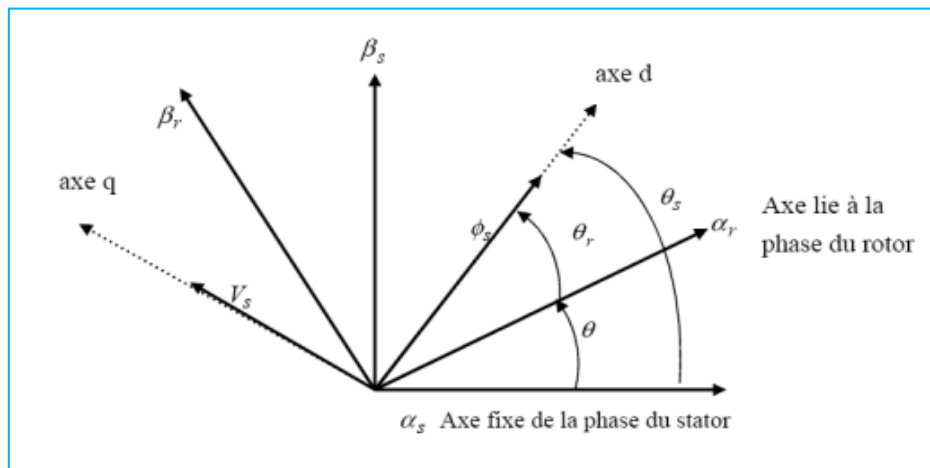


Figure. IV.2: Orientation de la tension et de flux statorique[5].

À partir de système des équations (IV.2), on obtient les expressions suivantes

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (IV.6)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.5) et la valeur de ϕ_s de l'équation (IV.4) dans l'équation (IV.6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive [5].

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.7)$$

L'équation (II.16) de couple devient alors:

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} \phi_s I_{rq} \quad (IV.8)$$

Il ressort de l'expression (IV.7) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. La puissance active au stator produite par la machine est contrôlée par la composante I_{rq} . Si la tension et la fréquence sont imposées par le réseau, la puissance réactive peut être contrôlée par la composante I_{rd} et éventuellement contrôlée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire au stator[6].

En remplaçant (IV.2) dans les expressions des tensions rotoriques dans le système d'équations (IV.1) on a:

$$\text{avec } g\omega_s = (\omega_s - \omega)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rd} + M I_{sd}) - g\omega_s (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rq} + M I_{sq}) + g\omega_s (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases} \quad (IV.9)$$

En remplace les valeurs du courant de l'équation (IV.5) dans (IV.9) pour obtenir la relation suivant :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.10)$$

Après la transformation de la place des équations (IV.10) deviennent:

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.11)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.12)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite[7].

IV.3 Schéma bloc réduit de la MADA:

En examinant les équations (IV.7) et (IV.11), on peut établir le schéma bloc de la figure IV.3 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives réactives statoriques.

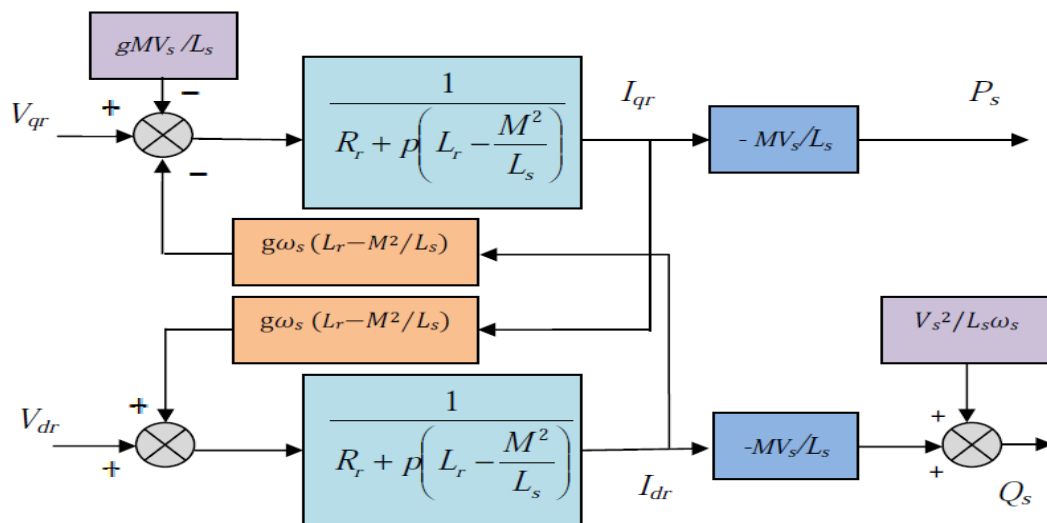


Figure. IV.3 : Schéma bloc du système à réguler[8].

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [8].

IV.3.1. Commande directe:

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives, les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. Ce principe de commande est présenté dans le schéma suivant figure. IV.4.[9].

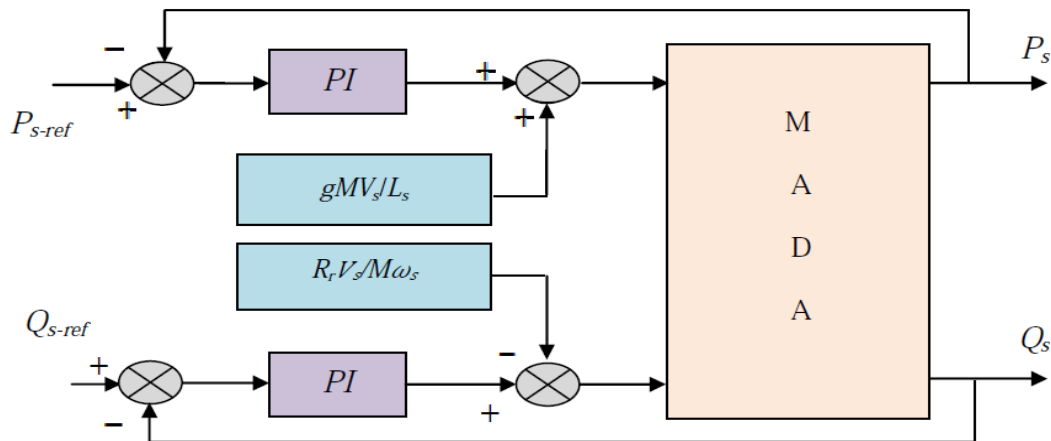


Figure. IV.4: Schéma de principe de la commande directe [9].

IV.3.1.1.Synthèse des régulateurs:

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle.

Le schéma de la figure. IV.5. montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{s}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure. IV.4.

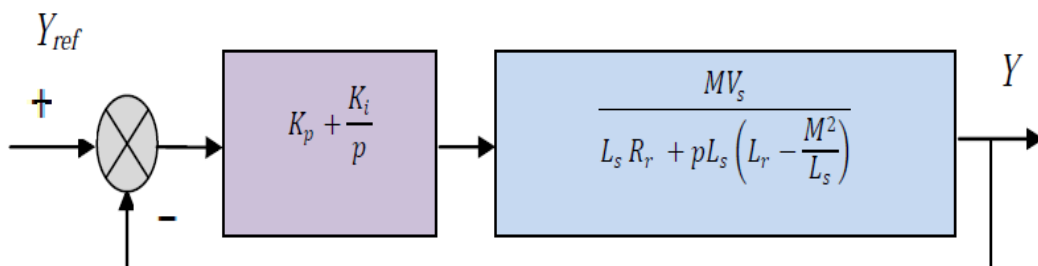


Figure. IV.5: Schéma bloc d'un système régulé par un PI[10].

La fonction de transfert en boucle ouverte ($FTBO$) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{k_p}}$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant[10].

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_o(t)}{1 + F_o(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}$$

τ_r est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables[11].

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

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2/L_s)} \quad ; \quad k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M}$$

IV.3.2. Commande indirecte:

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques. [12]

IV.3.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte:

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure. IV.6.

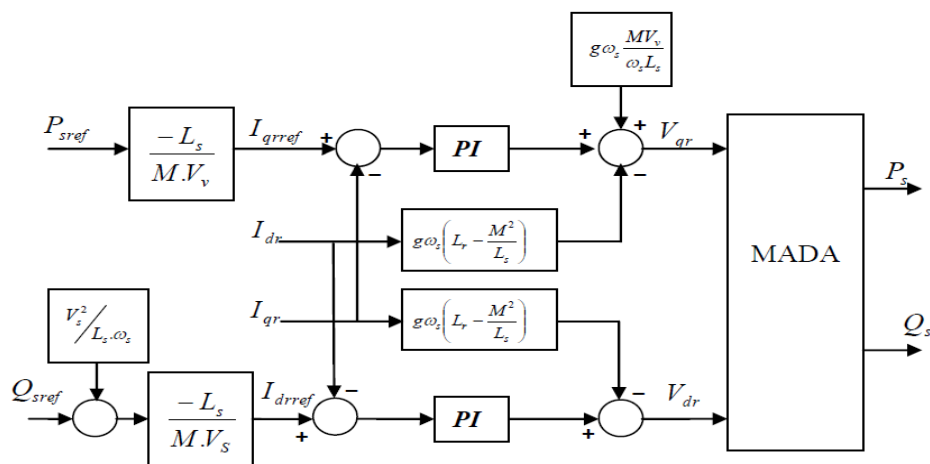


Figure. IV.6 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension[12]

IV.3.2.2. Commande indirecte en boucle fermée:

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure. IV.7. [13]

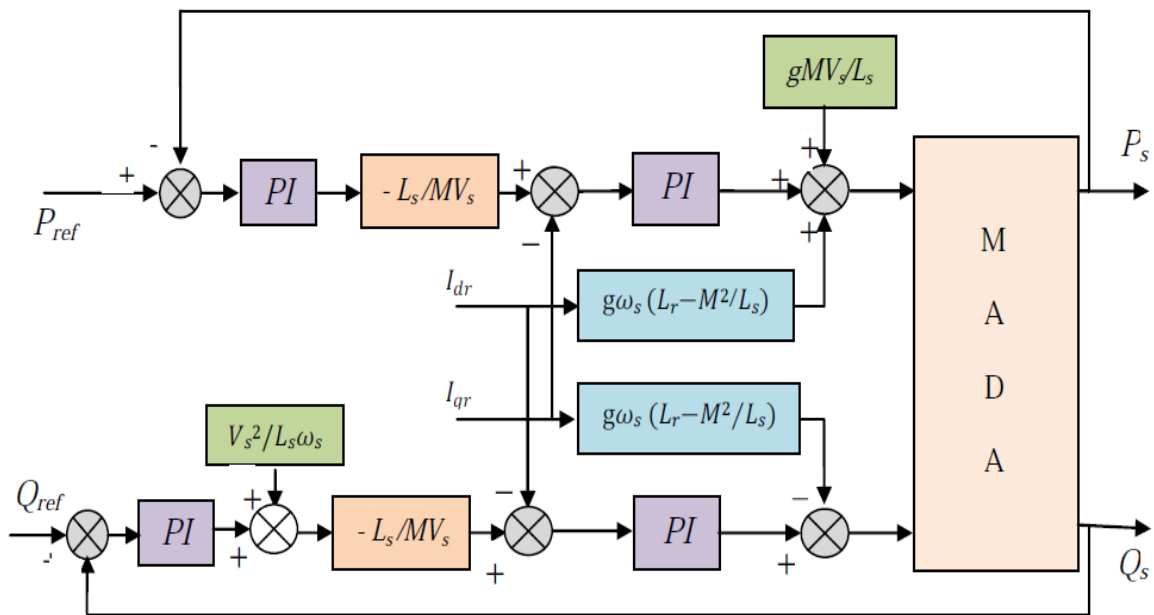


Figure. IV.7: Schéma de la commande indirecte en boucle fermée [13]

Les gains des correcteur dans la commande indirecte en boucle (ouverte & fermée) sont calculés de la même manière qu'à section "IV.3.1.1".

IV.4. Alimentation de la MADA (DFAM) :

Le long de tout notre travail, les différentes structures de commande sont constituées de l'association d'une machine asynchrone à double alimentation avec un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'association redresseur-filtre-onduleur de tension est représentée dans la figure (IV.8).

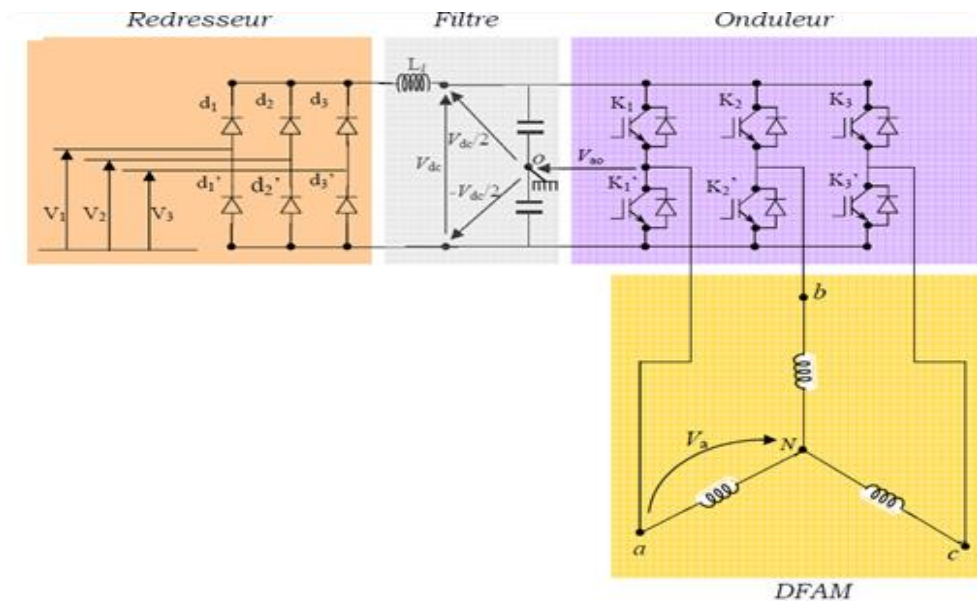


Figure. IV.8: Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI[25]

Les machines électriques sont alimentées par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance (Figure. IV.8). L'onduleur de tension avec onde porteuse est utilisé pour la commande vectorielle des machines électriques. [14]

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal dents de scie, et en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- si $V_{ref} > V_p$ - le transistor supérieur du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_p$ - le transistor inférieur du bras de pont conduit.

Où V_{ref} représente une des trois tensions de référence et V_p représente le signal dents de scie ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou (PWM en anglais).

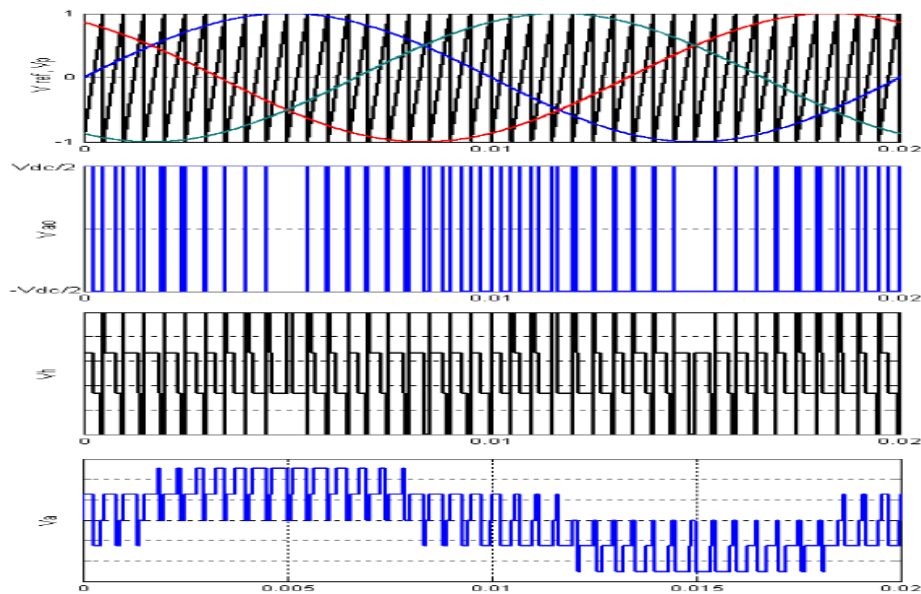


Figure. IV.9: Principe de la commande MLI et signaux de tensions [25]

La Figure (IV.9) représente le principe de la commande MLI et quelques signaux de tensions. Sur cette figure, V_h est la tension homopolaire qui peut s’exprimer par :

$$V_h = V_{No} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \tag{IV.13}$$

La commande MLI présente l’avantage d’une fréquence constante de commutation, qui est fixée par la fréquence de l’onde porteuse. Le schéma Simulink pour ce type d’onduleur est présenté dans la Figure (IV.10).

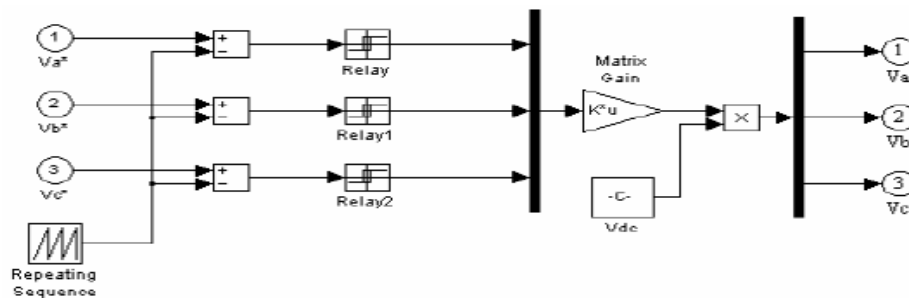


Figure. IV.10: Onduleur de tension avec onde porteuse[25].

La DFAM(MADA) et le réseau électrique sont des systèmes continus, mais le convertisseur électronique est un système discret. Comme on le voit dans la figure (IV.10), le schéma Simulink du convertisseur est assez compliqué et il s’avère gourmand en temps de calcul, surtout à cause des relais,[15].

Dans ce travail, le rapport de modulation est égal à 1, et la fréquence de la porteuse est égale 2 KHz.

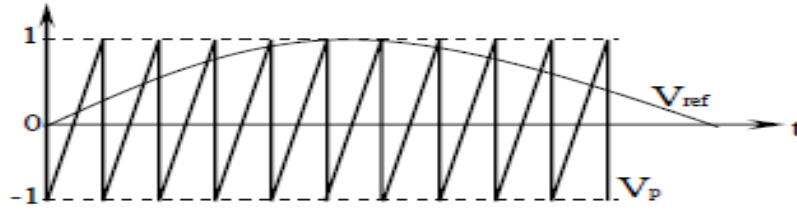


Figure. IV.11: Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur[25].

Dans la Figure (IV.11) on voit que l'amplitude de V_p est unitaire. L'amplitude de l'onde de référence V_{ref} (ou l'onde modulatrice) peut prendre des valeurs comprises entre $[0,1]$. Sachant que les tensions polaires de l'onduleur peuvent prendre seulement deux valeurs qui sont différentes de zéro ($\pm V_{dc}/2$) et en supposant que la fréquence de l'onde porteuse est infinie, on peut écrire la relation suivante entre les composantes utiles des tensions polaires et les signaux de référence :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

Les convertisseurs d'aujourd'hui peuvent fonctionner à des fréquences de commutation de quelques kHz, beaucoup plus grandes que les fréquences des signaux de référence. On peut donc considérer que la relation (IV.14) est vraie aussi pour un convertisseur réel, [18-19]. En appliquant la transformation directe de Park à la relation (IV.14), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{dref} \\ V_{qref} \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

Pour déterminer l'évolution de la tension V_{dc} du bus continu, il est nécessaire de déterminer le courant circulant dans le condensateur du bus continu. Ce courant dépend des courants introduits dans le bus continu. Ces courants peuvent être déterminés à partir du bilan de puissances aux deux extrémités du convertisseur. Pour le convertisseur de la Figure (IV.11), on peut écrire [16]:

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c = \frac{V_{dc}}{2} (V_{aref} \cdot i_a + V_{bref} \cdot i_b + V_{cref} \cdot i_c) \quad (IV.16)$$

Ou :

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q = \frac{V_{dc}}{2} (V_{dref} \cdot i_d + V_{qref} \cdot i_q) \quad (IV.17)$$

A partir de (III.32), on déduit facilement :

$$i_{dc} = \frac{1}{2} (V_{dref} \cdot i_d + V_{qref} \cdot i_q) \quad (IV.18)$$

IV.5. Calcul des régulateurs des courants rotoriques :

En supposant que le découplage est réalisé, on aura :

$$\frac{i_{dr}^*(s)}{V_{dr}^*(s)} = \frac{1}{y_r + s} \quad (IV.19)$$

La boucle de régulation du courant i_{dr}^* est représentée par le schéma bloc de la figure (IV.12) :

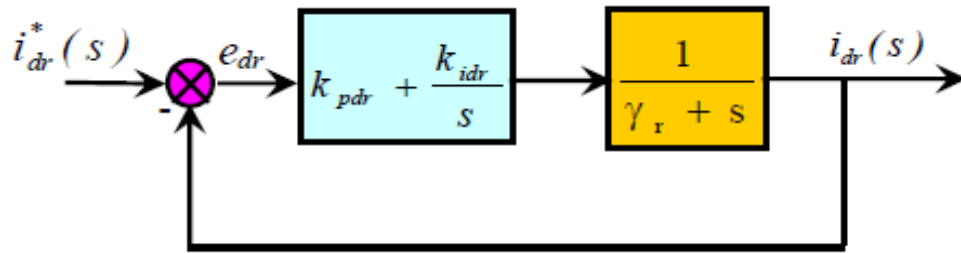


Figure. IV.12: Schéma fonctionnel de régulation du courant i_{dr} [25]

La fonction de transfert en boucle fermée (BF) est la suivante :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (Y_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} \quad (IV.20)$$

Pour que le système en BF puisse avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est $\frac{1}{1+\tau \cdot s}$; Il faut que :

$$\frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (Y_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Après simplification on aura :

$$k_{pdr} = \frac{1}{\tau}, \quad k_{idr} = \frac{Y_r}{\tau}$$

Avec : $\tau < \tau_e$

τ_e : la constante de temps électrique du système.

Dans notre cas $\tau_e = \frac{Lr}{Rr} = 0.64 \text{ s}$.

Nous avons choisi $\tau = 0.002$ s, pour avoir une dynamique du processus plus rapide. L'application numérique.

Pour déterminer les deux coefficients $kpqr$, $kiqr$, il sera procédé de la même façon que pour le courant i_{dr} .

Le schéma de commande complet est illustré dans la figure (IV.13) :

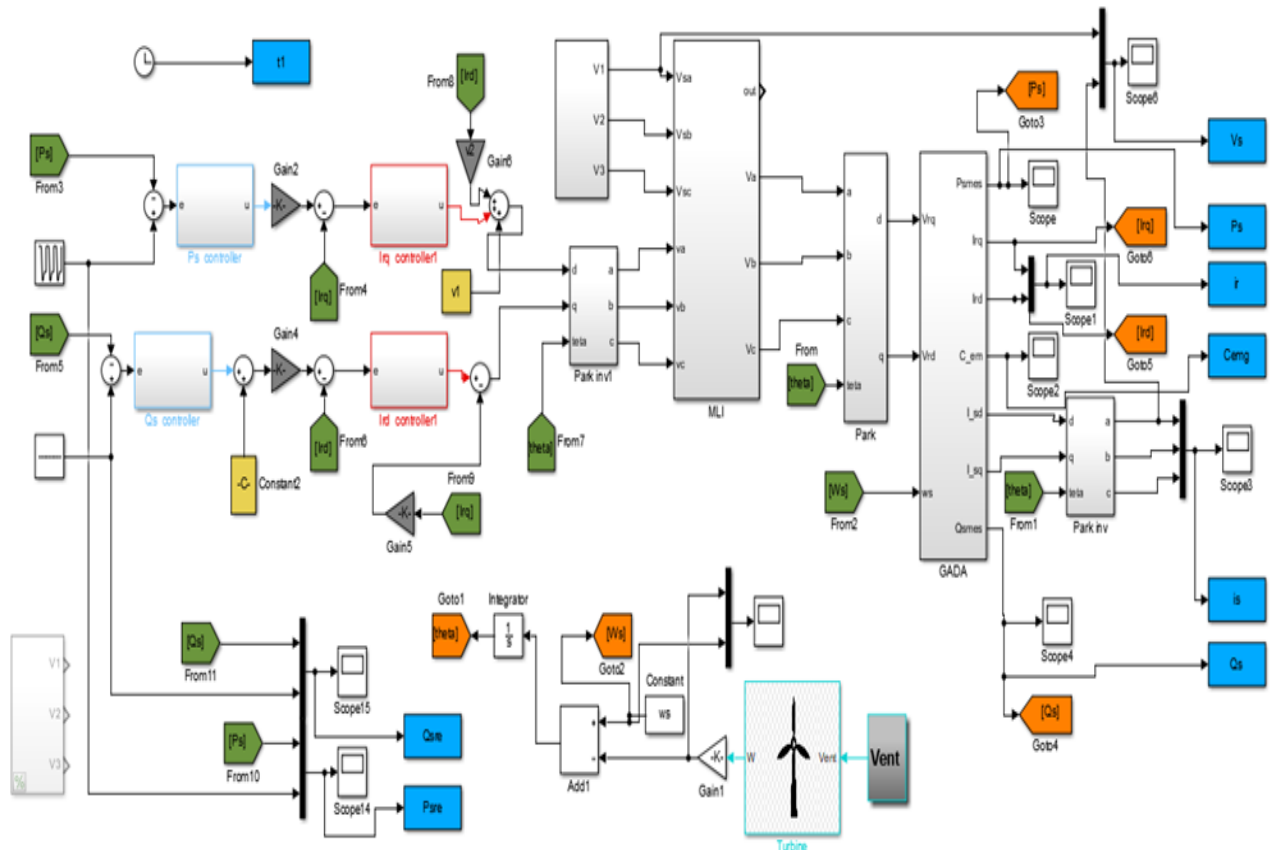


Figure. IV.13: Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA

IV.6. Résultats de simulations :

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

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

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

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=0.2$ s ($P_{\text{réf}} = 0$ W);
- ❖ Entre $t=0.2$ s et $t=0.5$ s échelon négative ($P_{\text{réf}} = -20000$ W);
- ❖ Entre $t=0.5$ s et $t=1$ s ($P_{\text{réf}} = -10000$ W);

La puissance réactive :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=1$ s ($Q_{\text{réf}} = 0$ var);

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

La figure IV.14 représente l'évolution de la tension du bus continu, qui fait montrer que :

- La tension du bus continu atteint sa consigne qui est 514.6V à un temps de réponse plus petit, sans dépassement .
- La forme de la tension du bus continu est plus douce, qui présente une supériorité lors des variations de la vitesse du vent.

Le figure IV.15 montrent que le couple électromagnétique de la machine asynchrone double alimentation .

Le figure IV.16, IV.17 montrent que les performances de poursuite des courants rotoriques et statoriques sont satisfaisantes; cependant on remarque un dépassement au régime transitoire (au démarrage et au changement de consigne), ce qui signifie que le régulateur PI ne maîtrise pas le régime transitoire.

La figure IV.18 montre que la puissance active du côté du stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur d'énergie fournie par la DFAM. La puissance réactive est toujours nulle, c'est une condition de fonctionnement de la DFAM pour avoir un facteur de puissance unitaire.

La figure IV.23 montre que la tension de phase statorique est en phase avec le courant de phase statorique.

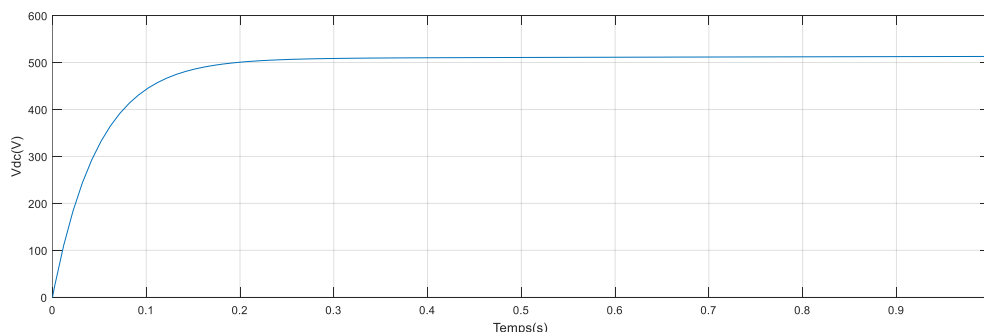


Figure. IV.14: Tension du bus continu (V)

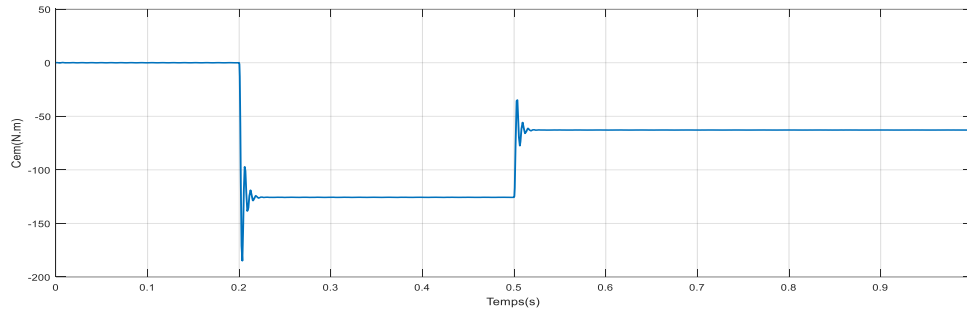


Figure. IV.15: Couple électromagnétique

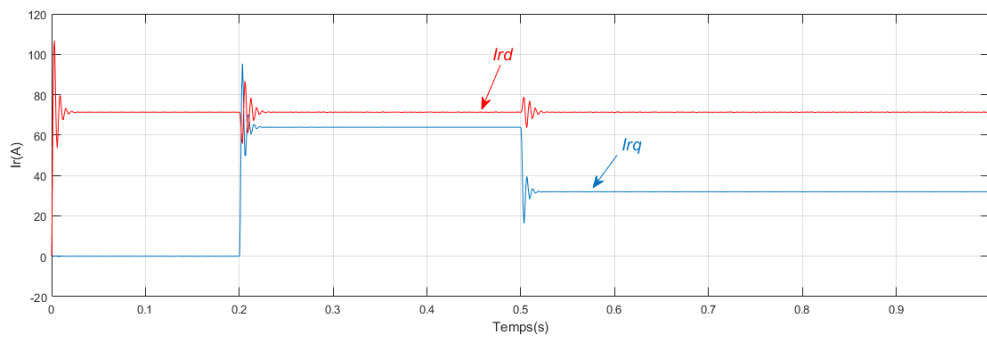


Figure. IV.16: Les courants direct et quadrature rotoriques.

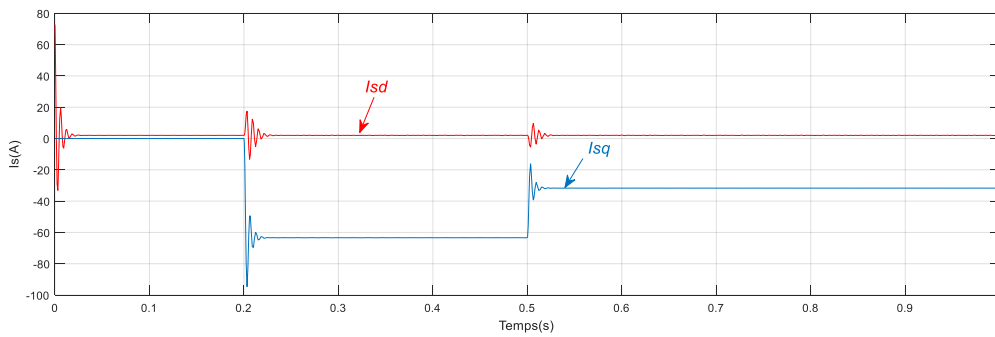


Figure. IV.17: Les courants direct et quadrature statorique .



Figure. IV.18: Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

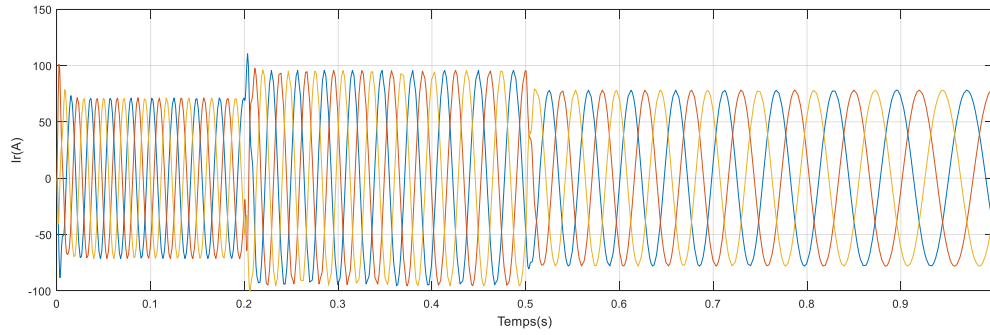


Figure. IV.19: Courant triphasé rotorique

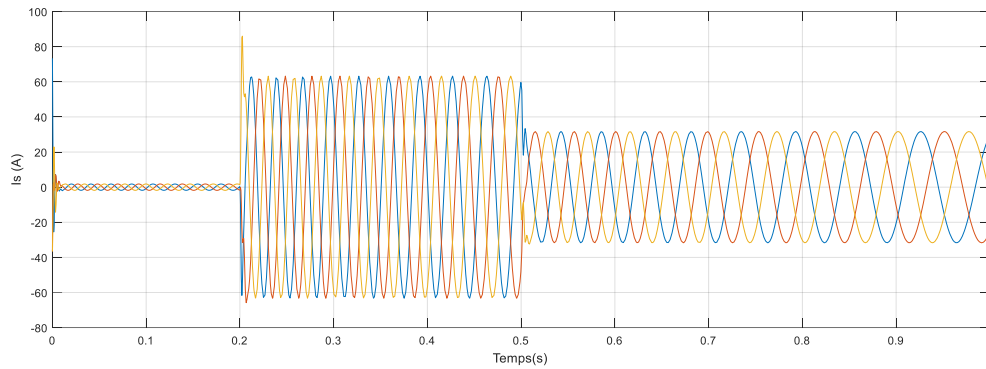


Figure. IV.20: Courant triphasé statorique

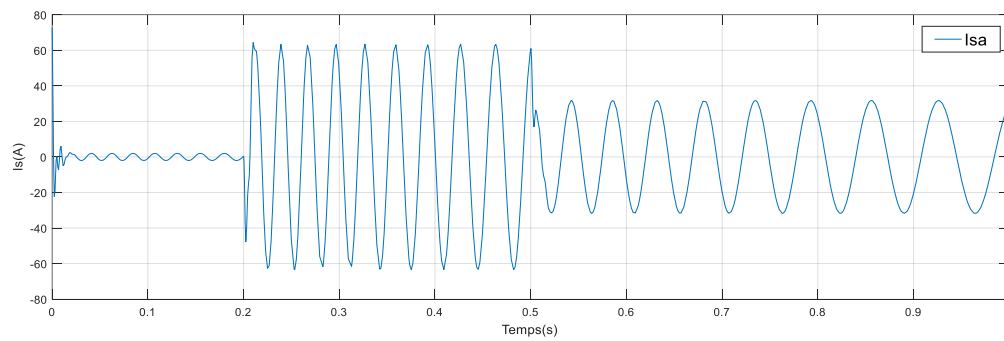


Figure. IV.21: Courant par phase statorique

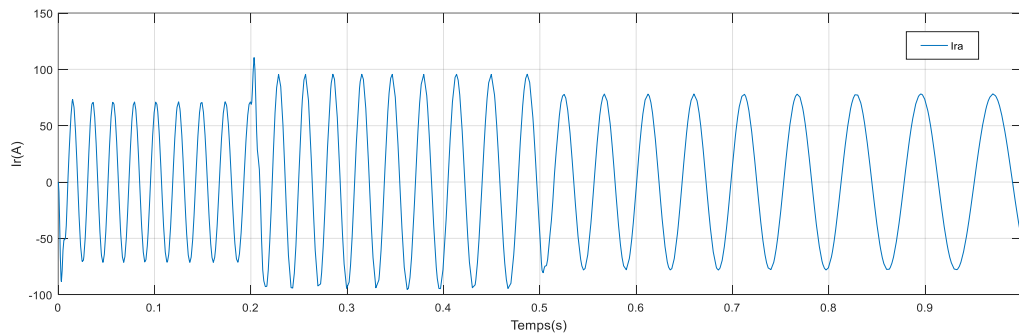


Figure. IV.22: Courant par phase rotorique

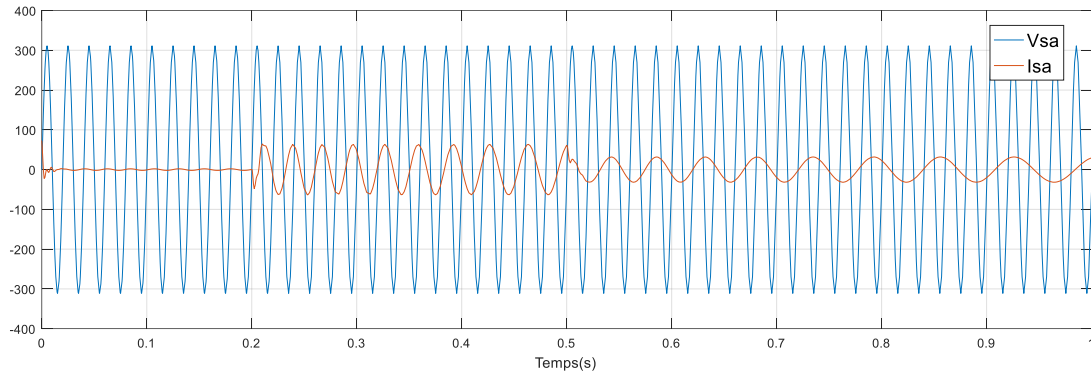


Figure. IV.23: Le courant et la tension statoriques

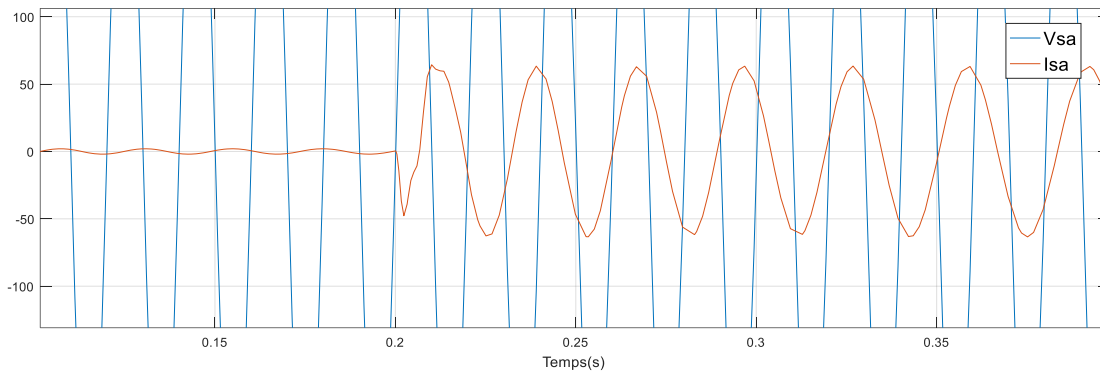


Figure. IV.24: Zoom sur le courant et la tension statorique

IV.7. Tests de robustesse:

Dans le but de tester la robustesse de la commande par les régulateurs PI, nous avons également étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique, inductance et mutuelle sur le découplage entre le flux et le couple.

Pour cela nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance rotorique (R_r) introduite à $t = 0s$, aussi une diminution de 25% des inductances propres et mutuelle (L_r , L_s et M) introduite à $t = 0s$.

Les figures IV.25-IV.33 illustrent les résultats du test de simulation.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la commande par les régulateurs PI présente une faible robustesse dans le cas de variations paramétriques de la machine. La dynamique de poursuite de la consigne est affectée par la variation paramétrique introduite sur le système.

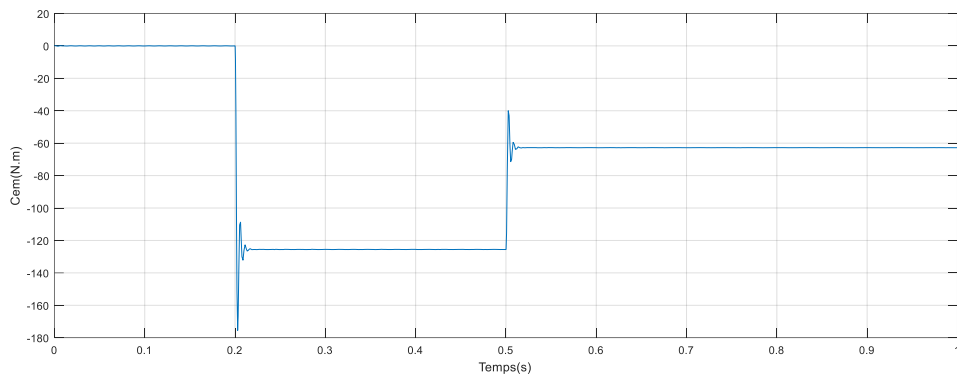


Figure. IV.25: Couple électromagnétique

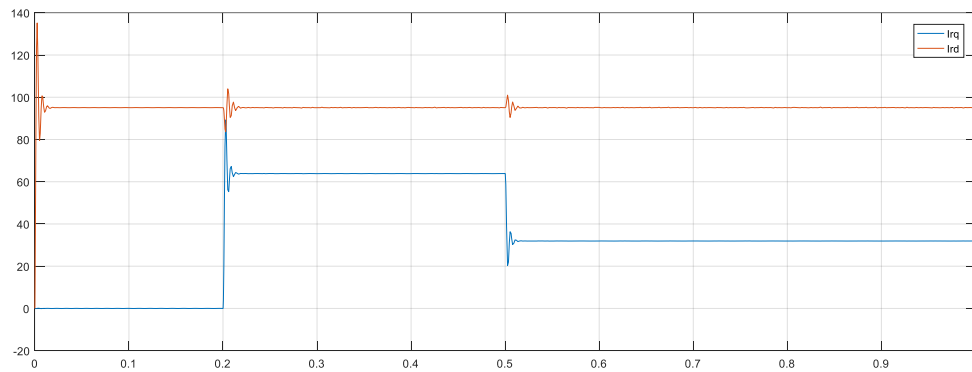


Figure. IV.26: Les courants direct et quadrature rotoriques.

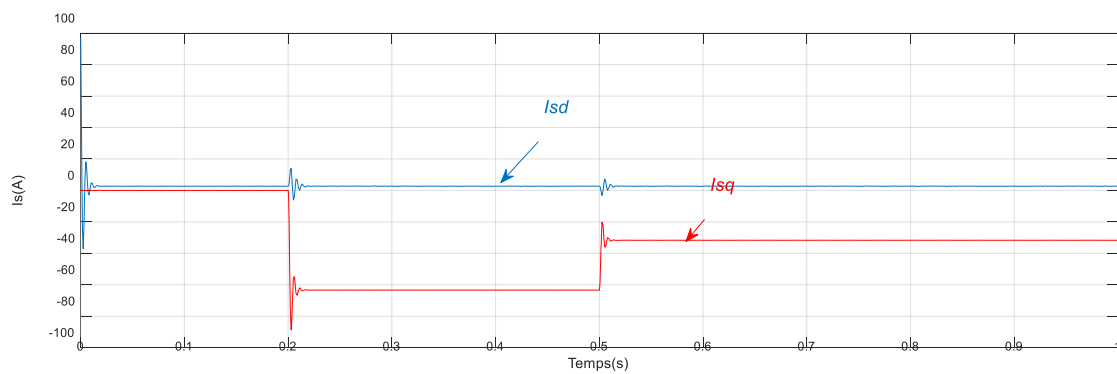


Figure. IV.27: Les courants direct et quadrature statorique .

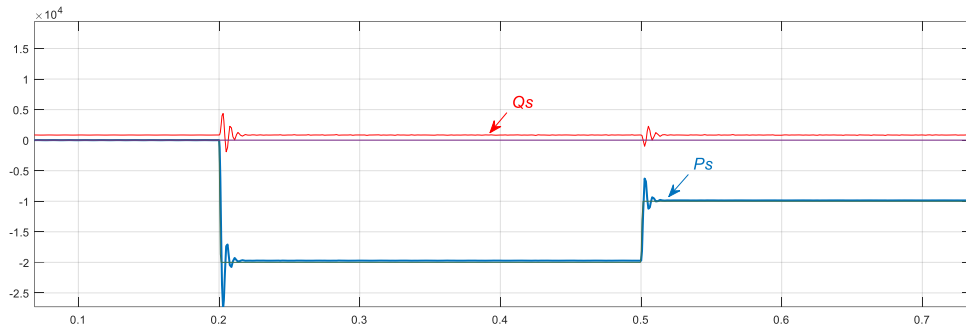


Figure. IV.28: Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

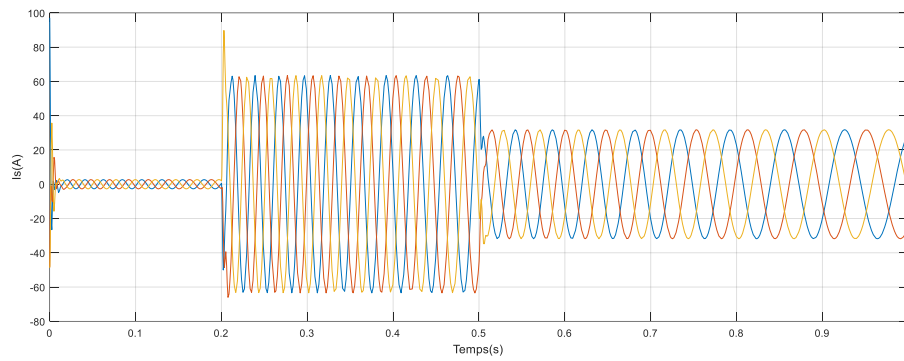


Figure. IV.29: Courant triphasé statoriques

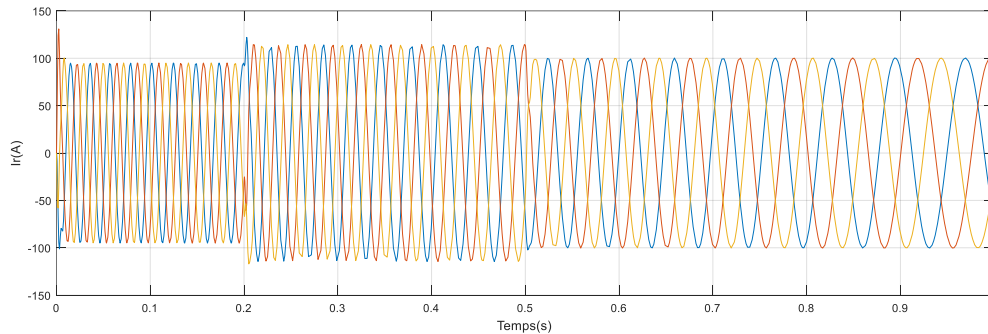


Figure. IV.30: Courant triphasé rotorique

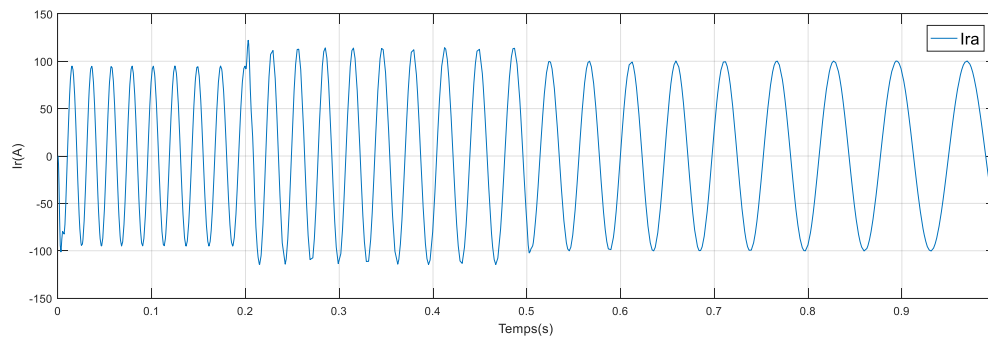


Figure. IV.31: Courant par phase rotorique

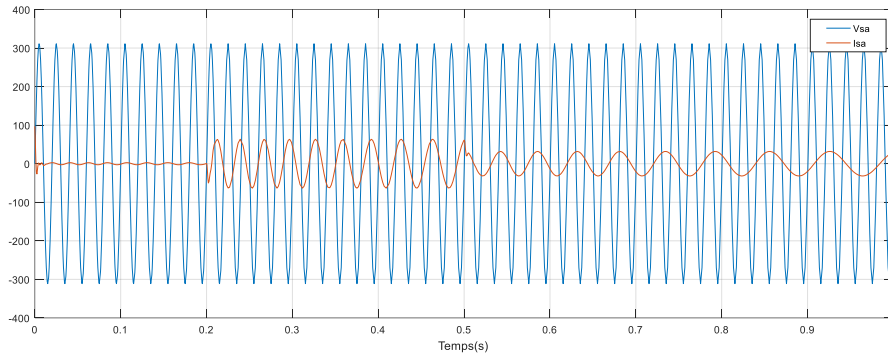


Figure. IV.32: Le courant et la tension statoriques

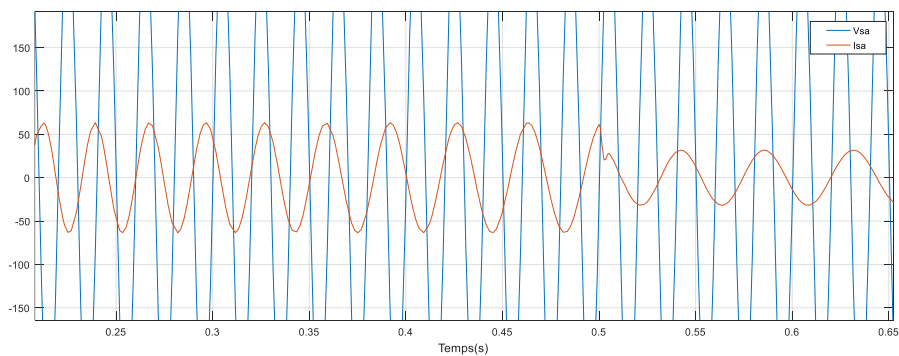


Figure. IV.33: Zoom sur le courant et la tension statoriques

IV.8. 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 de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

IV.9. Références bibliographiques :

- [1] Bose B. K, “Power Electronics and AC Drives”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [2] Hirofumi A. and Hikaru S., “Control and Performance of a Doubly-Fed Induction Machine Intended for a Flywheel Energy Storage System”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.17, N°:1, pp.109-116,January 2002.
- [3] Leonhard W., “Control Electrical”, Springer verlag Berlin Heidelberg printed in Germany, 1985.
- [4] Drid. S, “Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec ptimisation de la Structure d’Alimentation,” thèse de doctorat en sciences de l’université de Batna, 2005.
- [5] Zidani. F, “Contribution au contrôle et au diagnostique de la machine asynchrone par la logique floue”, thèse de doctorat, Batna, 2002.
- [6] R. Abdessemed et M. Kadjouj, “Modélisation des machines électriques”, Presse de université de Batna, 1997.
- [7] Khelfa. S, “Commande vectorielle d’une machine à induction ; impacts de la saturation de la machine et la modulation du convertisseur”, thèse de magister, Batna 2001.
- [8] Poitiers. F, Machoum. M, Le Doeuff. R, zaim. M. E, “control of doubly fed induction generator for wind energy conversion systems”,international journal of renewable energy engeneering, Vol. 3, N° 3, pp.373-378, December 2001.
- [9] Chaïba. A, R. Abdessemed, M. L. Bendaas and A. Dendouga, “Control of Torque and Unity stator Side Power Factor of the Doubly-Fed Induction Generator”, Conférence sur le Génie Electrique “CGE’04”, l’Ecole militaire polytechnique, proc,12-13 avril, 2005.
- [10] Chaïba. A, R. Abdessemed, and M. L. Bendaas, “A Torque Tracking Control Algorithm for Doubly-Fed Induction Generator ”, Journal of Electrical Engineering Elektrotechnický èasopis, JEEEC, Vol.59, No.3, pp. 165-168, Slovakia, 2008.

- [11] Tnani. S, “Contribution à l’étude et la commande de la machine généralisée”, thèse de doctorat de l’université de Franch-Comté, octobre 1995.
- [12] Yamamoto. M, Motoyoshi. O, “Active and reactive power control for Doubly-fed wound rotor induction generator”, IEEE transactions on power electronics, Vol. 6, N° 4, pp. 642-629, Octobre 1991.
- [13] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, Lakin. R. A, “Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder”, IEEProc. Electr. Power App., Vol. 147, N° 4, July 2000.
- [14] Robyns. B, Nasser. M, Berthereau. F, Labrique. F, “Equivalent continuous dynamic odel of a variable speed wind generator”, Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, ELECTROMOTION2001, Bologna, Italia, 2001.
- [15] Labrique. F, H. Buyse, G. Séguier, R. Bausière, “Les convertisseurs de l’électronique de puissance, Comma
nde et comportement dynamique”, Tome 5, Technique et Documentation – Lavoisier, 1998.
- [16] Hautier. J.P, Caron. J.P, “Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande”, Edition Technip, 1999.

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne, et l'étude de différents systèmes de contrôle de la génératrice.

Pour ce faire, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au rotor, par un convertisseur MLI.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau on a utilisé une commande vectorielle. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes :

Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral a été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir réponse plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

Annexe :

1- Paramètres de la turbine éolienne

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pales	3
Rayon de l'éolienne	$R = 35.25 \text{ m}$
Densité de l'air	$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$
Gain du multiplicateur de vitesse	$G = 90$
Moment d'inertie de la turbine	$J = 1000 \text{ kg m}^2$

Tableau.1 : Paramètres de la turbine.

2- Paramètres de la GADA

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale P_n	1.5 MW
Tension nominale statorique V_s	398/690 V
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Resistance statorique R_s	0.012 Ω
Resistance rotorique R_r	0.021 Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136 H
Inductance mutuelle M	0.0135 H
Nombre de paires de pôles P	2
Coefficient de frottement f	0.0024 N.m.s ⁻¹

Tableau.2 : Paramètres de la GADA

3- Paramètres des régulateurs

avec l'utilisation de Matlab R2016a

Méthode	Commande indirect BF	
	Courant	Puissance
K_P	10e-04	71
K_i	3	0.007

Tableau.3 : Gains des régulateurs utilisés.

4- Paramètres des régulateurs PI adaptatif

```
kp_pmin=10;
kp_pmax=600;
ki_pmin=0.01;
ki_pmax=1;
kp_imin=10e-05;
kp_imax=10e-04;
ki_imin=10;
ki_imax=600;
NC=4;
NB=32;
Gmax=2^(NB/4)-1; %espace recherche
%POP INTIAL
Val=7e7;
funf(1)=7e7;
iter=20;
i9=1;

POP=randint(NC,NB);

for i=1:iter
    figure
    plot(funf,'-o')
    title('Optimisation de la fonction objectif')
    xlabel('Itération')
    ylabel('Fonction')
    grid
```