

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

Département d'Electronique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par ALLAL HOUSSYN

Option : *Contrôle industriel*

THÈME

***MODELISATION ET COMMANDE D'UNE MACHINE
ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION POUR UN
SYSTEME D'ENERGIE EOLIENNE***

Soutenue le :/...../.....devant le jury composé de :

.....
Mr. GUICHI AMAR
.....
.....

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

Promotion Juin 2016

N° d'ordre :

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 années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à remercier monsieur GUICHI AMAR d' avoir accepté de diriger mon travail. Je le remercie également pour ses qualités humaines et ses conseils précieux durant toutes les phases du travail, et pour ses conseils.

Mes remerciements vont au président du jury et aux membres du jury qui m'ont fait l' honneur de participer au jury et aussi à tous les enseignants de notre département.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électronique qui ont contribué à notre formation.

Je remercie évidemment mes parents, qui depuis ces longues années, m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral

Dédicace

Je dédie ce travail :

- à ma chère mère et mon cher père,
- à tous mes amis,
- à tous mes collègues de la promotion 2016,
- et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Sommaire

Introduction général

Chapitre I

Généralités sur la chaîne éolienne

I.1 Introduction :	1
I.2 Production éolienne	1
I.3 Définition de l'énergie éolienne	2
I.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne	3
I.3.2 Les différents types d'éoliennes	3
I.3.2.1 Éoliennes à axe vertical	3
I.3.2.2 Éoliennes à axe horizontal	4
I.3.3 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal	5
I.4 Conversion de l'énergie éolienne	6
I.4.1 Loi de BETZ	6
I.4.2 Production d'énergie mécanique	Error! Bookmark not defined.
I.4.3 Utilité de la vitesse variable	Error! Bookmark not defined.
I.5 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	Error! Bookmark not defined.
I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe	Error! Bookmark not defined.
I.5.1.1 Avantage du fonctionnement à vitesse fixe	Error! Bookmark not defined.
I.5.1.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe	Error! Bookmark not defined.
I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable	Error! Bookmark not defined.
I.6 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique	Error! Bookmark not defined.
I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone	Error! Bookmark not defined.
I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone	Error! Bookmark not defined.
I.7 Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique	Error! Bookmark not defined.
I.7.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation	Error! Bookmark not defined.
I.7.1.1 Double alimentation par le stator (Brushless)	Error! Bookmark not defined.
I.7.1.2 Double alimentation par le stator et le rotor	18
I.7.2 Principe de fonctionnement de la MADA	19
I.7.3 Application de la MADA dans le domaine éolien	Error! Bookmark not defined.

I.8 Conclusion	Error! Bookmark not defined.
----------------------	-------------------------------------

Chapitre II Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction	Error! Bookmark not defined.
II.2 Modèle mathématique de la MADA	Error! Bookmark not defined.
II.2.1 Hypothèses simplificatrices.....	Error! Bookmark not defined.
II.2.2 Equations électriques :.....	Error! Bookmark not defined.
II.2.3 Equations magnétiques :.....	26
II.3 Modélisation de la MADA dans le plan diphasé d,q	26
II.3.1 Transformation de PARK.....	26
II.3.2 Application de la transformation de Park à la MADA	28
II.4 Equations Electriques et Magnétiques suivant l'axe (d, q)	29
II.5 Choix du référentiel	Error! Bookmark not defined.
II.5.1 Référentiel fixé par rapport au stator (d , q) :	Error! Bookmark not defined.
II.5.2 Référentiel fixé par rapport au rotor (d, q) :	Error! Bookmark not defined.
II.5.3 Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d , q) :	Error! Bookmark not defined.
II.6 Expression du couple électromagnétique.....	Error! Bookmark not defined.
II.7 Résultats de simulation	Error! Bookmark not defined.
II.7 Interprétations des résultats :	40
II.9 Conclusion :	40
III.1 Introduction :	Error! Bookmark not defined.

Chapitre III Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

III.2 Définition de la commande vectorielle.....	Error! Bookmark not defined.
III.2.1 Procède d'orientation du flux :	Error! Bookmark not defined.
III.2.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	Error! Bookmark not defined.
III.3 Contrôle indépendant des puissances	Error! Bookmark not defined.
III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :	Error! Bookmark not defined.
III.3.2 Relations entre les courants statoriques et rotoriques	46

III.3.3 Relations entre les puissances statoriques et courants statoriques.....	47
III.3.4 Relations entre les tensions rotoriques et courants rotoriques	48
III.4 Etablissement des angles nécessaires aux transformations	Error! Bookmark not defined.
III.5 Control indépendant des puissances active et réactives...	Error! Bookmark not defined.
III.5.1 Commande vectorielle directe	Error! Bookmark not defined.
III.5.1.1 Définition générale	Error! Bookmark not defined.
III.5.1.2 Commande directe en puissance active et réactive	Error! Bookmark not defined.
III.5.2 Commande vectorielle indirecte	Error! Bookmark not defined.
III.5.2.1 Définition générale	Error! Bookmark not defined.
III.5.2.2 Commande indirecte en puissance active et réactive	Error! Bookmark not defined.
III.5.2.2 Boucle de régulation de vitesse	54
III.5.2.3 Boucle de régulation de la puissance réactive statorique	56
III.6 Synthèse du régulateur PI	57
III.7 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux ...	Error! Bookmark not defined.
III.7.1 Définition	Error! Bookmark not defined.
III.8 Principe de la MLI	Error! Bookmark not defined.
III.9 Résultats de simulation	64
III.10 Interprétations des résultats :	69
III.10.1 Résultats de simulation	Error! Bookmark not defined.
III.10.2 Interprétations des résultats :	Error! Bookmark not defined.
III.11 Conclusion :	Error! Bookmark not defined.

Chapitre IV

Asservissement de la chaîne éolienne.

IV .1 Introduction	Error! Bookmark not defined.
IV .2 Modélisation de la turbine éolienne	Error! Bookmark not defined.
IV .2.1 Modélisation de la turbin	Error! Bookmark not defined.
IV.2.2 Modèle du multiplicateur.....	75
IV.2.3 Equation dynamique de l'arbre.....	75
IV.2.4 Schéma bloc du modèle de la turbine	76

IV.3 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	77
IV.4 Modes de fonctionnement de la turbine	78
IV.4.1 maximisation de la puissance excrète MPPT	78
IV.4.2 Fonctionnement à puissance maximale (commande par angle pitch)	79
IV.4.3 limitation de puissance (puissance contrôlée)	Error! Bookmark not defined.
IV.5 Résultats de la simulation :	Error! Bookmark not defined.
IV. 6 Conclusion :	88
Conclusion général	
Résumé	
Annexe	
Références	

Liste des figures

Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent	2
Figure I.2 : Éolienne type Savonius.....	3
Figure I.3 : Éoliennes type Darrieus.....	4
Figure I.4 : Éolienne à axe horizontal.....	5
Figure I.5 : Éléments constituant une éolienne.....	6
Figure I.6 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.....	9
Figure I.7 : Débit de puissance et les pertes	10
Figure I.8 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.	Error! Bookmark not defined.
Figure I.9 : Aérogénérateur à vitesse fixe.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.10 : Aérogénérateur à vitesse variable.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.11 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.12 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.13 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.14 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	17
Figure I.15 : Machine asynchrone à double bobinage statorique	17
Figure I.16 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.....	19
Figure I.17 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	Error! Bookmark not defined.
Figure I.18 : Puissance produite par la turbine	Error! Bookmark not defined.
Figure II.1 : Représentation de la MADA dans le système triphasé. ...	Error! Bookmark not defined.

Figure II.2 : Décomposition de la transformation de Park [9].	27
Figure II.3 : Position spatiale des différents référentiels.	29
Figure II.4 Schéma bloc de simulation de la MADA alimentée par une tension triphasé	Error! Bookmark not defined.
Figure II.5 : Le couple électromagnétique et la vitesse mécanique de la MADA.	Error! Bookmark not defined.
Figure II.6 : les composantes du courant statorique de la MADA	36
Figure II.7 : les composantes du courant rotorique de la MADA	36
Figure II.8 : les composantes du flux statorique de la MADA	37
Figure II.9 : les composantes du flux rotorique de la MADA	38
Figure II.10 : les puissance active et réactive statorique de la MADA	38
Figure II.11 : les courants statorique et rotorique triphasées de la MADA	36
Figure III.1 : Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.2 Orientation du flux statorique, rotorique et d'entrefer.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.3 Schéma bloc du système à réguler	48
Figure III.4 : Bloc de contrôle à flux orienté.	48
Figure III.5 - Etablissement des angles pour les transformations de Park.	49
Figure III.6 Schéma bloc de la commande vectorielle directe des puissances actives et réactives	Error! Bookmark not defined.
Figure III.7 : schéma bloc de la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.8 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.23 : Schéma bloc de la régulation de vitesse et puissance réactive statorique	56
Figure III.9 Système régulé par un PI.	57
Figure III.10 Schéma de la régulation des courants rotorique.	59
Figure III.11 Onduleur de tension à deux niveaux.	Error! Bookmark not defined.
Fig. III.12 Principe de la MLI triangulo-sinusoïdale.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.12 Principe de la MLI sinus triangle.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.13 : signaux de commande de l'onduleur	65
Figure III.14 : Tensions simples de l'onduleur	65
Figure III.15 La puissance active statorique	66

Figure III.16 La puissance réactive statorique	66
Figure III.17 Courant rotorique quadrature.....	66
Figure III.18 Courant rotorique directe	67
Figure III.19 Courant d'une phase statorique.....	67
Figure III.20 Courant d'une phase statorique (avec une zoome)	67
Figure III.21 Courant d'une phase rotorique.....	67
Figure III.22 Courant d'une phase rotorique (avec une zoome)	68
Figure III.24 La vitesse de rotation de la machine	69
Figure III.25 La puissance réactive statorique	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.1 Schéma d'une turbine éolienne	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.2 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.3: Schéma bloc du modèle de la turbine	75
Figure IV.4 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance	76
Figure IV.5 Vitesse du vent en fonction du temps.	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.6 : coefficient de puissance C_p de la turbine	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.7 : coefficient λ de la turbine.....	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.8 : couple mécanique de la turbine (N.m)	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.9 : puissance mécanique de la turbine.....	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.10 : vitesse de rotation de la turbine.	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.11 : Courant rotorique quadrature.	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.12 : Courant rotorique direct.	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.13 : la puissance active statorique.....	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.14 : la puissance réactive statorique.....	Error! Bookmark not defined.
Figure IV.15 : Vitesse de la machine.....	Error! Bookmark not defined.

Notations et symboles

$V1$	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
$V2$	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
V_n	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
$S1$	La section amont du tube d'air.
$S2$	La section aval du tube d'air.
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
ρ	Masse volumique de l'air.
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
E_c	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
C_p	Le coefficient de puissance.
C_{p_max}	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
C_g	Couple résistant issue du multiplicateur.
C_{aero}	Couple aérodynamique de l'éolienne.

C_{vis}	Couple des frottements visqueux.
f	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	Inertie totale de l'arbre.
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine.
$J_{machine}$	Inertie de la machine.
X_{em}	Grandeur électromagnétique.
X_{ref}	Grandeur de référence.
$X_{estimé}$	Grandeur estimée.
Jr	Fréquence rotoriques.
g	Glissement.
P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
MADA	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_s]$	Matrice inductance statorique.
$[L_r]$	Matrice inductance rotorique.
$[L_m]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.

θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
ω	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
L_s	Inductance propre d'une phase statorique.
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
L_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
FT	Fonction de transfert.
$FTBF$	Fonction de transfert en boucle fermée.
$FTBO$	Fonction de transfert en boucle ouverte.
K_p	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
K_i	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
τ_r	Constante de temps du régulateur.
V_a, V_b, V_c	Tensions simples statoriques.
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tensions composées statoriques.
S_a, S_b, S_c	Etat des commutateurs de puissance.
V_{dc}	Tension continu.
m	Indice de modulation.
f_p	Fréquence de la porteuse.

r Taux de modulation.
 U_p Amplitude de la porteuse.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction général

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

En effet, les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable (éolien, solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones et les machines à aimant permanent. La machine à induction à cage est la plus utilisée, car elle est peu coûteuse, robuste et sa maintenance est très facile et simple. Mais si elle est connectée directement au réseau, ce dernier impose la fréquence et dans ce cas la vitesse d'entraînement doit être constante. De plus, si on utilise un convertisseur à son stator, on trouve que la plage de variation de vitesse est limitée. Si on utilise une machine asynchrone triphasée entraîné à vitesse variable, dans ce cas le système est composé d'un convertisseur statique de fréquence situé entre le stator et le réseau et qui permet de transformer la fréquence variable de l'alternateur. Il faut ajouter un compensateur synchrone afin de fournir la puissance réactive consommée par le convertisseur statique, ce qui augmente le coût du système. Tout ceci explique pourquoi on recherche à remplacer ce système. Ils ont trouvé que la meilleur alternative à ce dernier, c'est la machine asynchrone à double alimentation (MADA), Elle garde les caractéristiques de la machine asynchrone à cage et peut travailler aussi à vitesse variable, à cet effet, elle domine le monde de production d'énergie électrique, particulièrement de type éolienne.

La génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne, a fait de la MADA la machine la plus attractive et spécialement à bord des éoliennes à vitesse variable et fréquence fixe.

En effet, le caractère très aléatoire du vent a imposé cette machine à la plupart des constructeurs d'éoliennes.

L'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire le maximum de puissance tel que le vent le permet. Le progrès des recherches en génie électrique qui a été fait dans ces dernières décennies, a conduit aux investigations afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité d'énergie fournie.

Le travail présenté dans ce mémoire est inscrit sous cet aspect, utiliser la MADA dans une chaîne éolienne afin d'extraire le maximum de puissance cinétique du vent dont la concrétisation de ce but passe par différentes étapes qui sont étalées sur les quatre chapitres de cette mémoire.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la définition de l'énergie éolienne et ces composants de façon générale. et à Par la suite, les modes de fonctionnement en vitesse fixe et variable et les différents générateurs utilisés sont présentés, et présentons la topologie et les configurations de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur (hypo et hyper-synchrone).

Dans le deuxième chapitre, nous abordons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement Simulink du logiciel MATLAB. Une fois validé.

Le troisième chapitre on a étudié le système complet : le modèle de la MADA sera soumis aux lois de commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques et la régulation de vitesse. Le stator de la MADA sera alimenté par une source de tension triphasée parfaite et le rotor par un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion triphasée. Et cette machine –convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI. On aura donc, une cascade basée sur un convertisseur à deux niveaux.

Dans le dernier chapitre, on a étudié l'asservissement de la chaîne turbine-MADA convertisseurs pour assurer un rendement optimal et La modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faites. En effet la puissance générée par ces éoliennes étant de plus en plus importante, une connexion sur le réseau de distribution en moyenne tension est maintenant couramment exigée par les gestionnaires de réseau.

CHAPITRE I

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE LA MADA POUR LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Introduction :

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moudre le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Poul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise) [1].

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et dans les années à venir, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [2].

Durant ce premier chapitre, un aperçu global sur les constituants de chaîne éolienne seront vus et les différentes définitions seront données aussi

I.2 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, on comptait en 2000

environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. [3].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e. (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 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [2].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

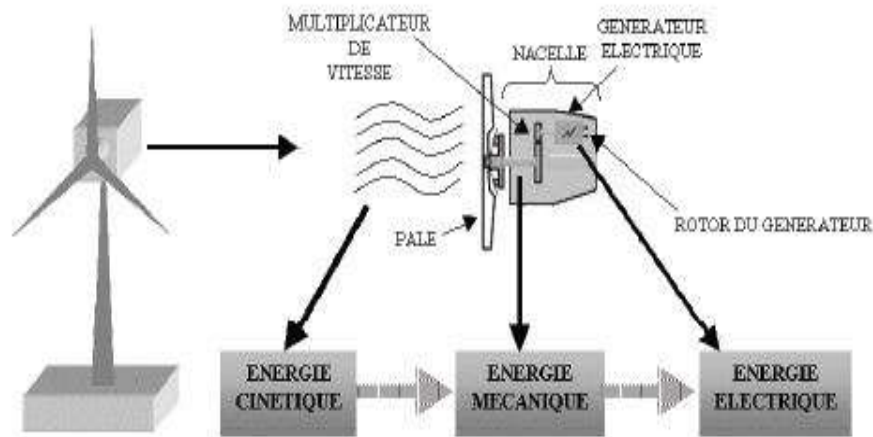


Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

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

I.3.2 Les différents types d'éoliennes

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

I.3.2.1 Éoliennes 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, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [4], [5] :

- ✓ Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de

l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure 1.2) [5], [6]

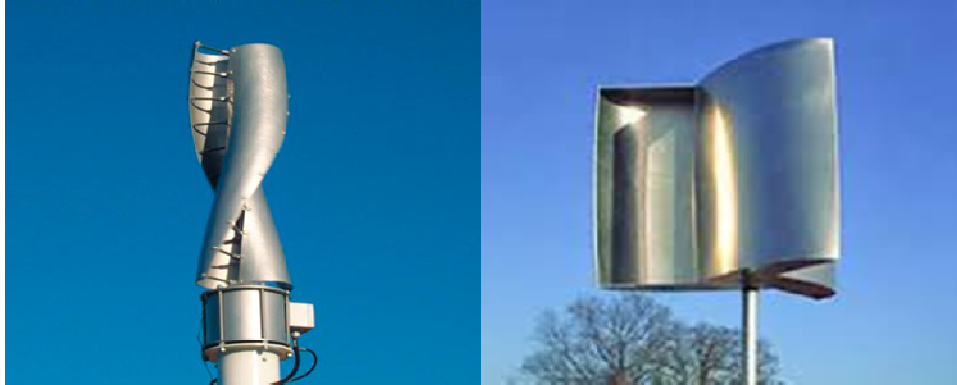


Figure I.2 : Éolienne type Savonius

- ✓ Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure 1.3) [2], [7], [8] est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas se déclencher d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [5].

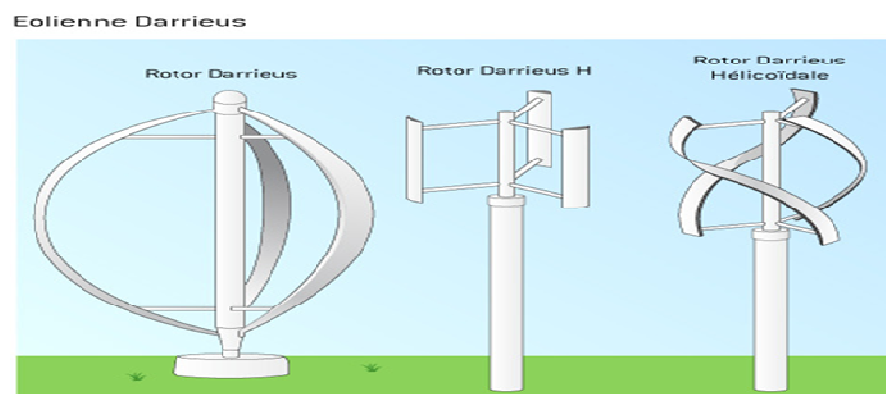


Figure I.3 : Éoliennes type Darrieus

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause des contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace.

I.3.2.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [5]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [6]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure I.4 : Éolienne à axe horizontal

I.3.3 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la (figure I.5) [9] [10].

- **Le mat ou la tour :** c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

- **La nacelle** : regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **Le système de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [11].
- **Le système de commande** : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre** : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

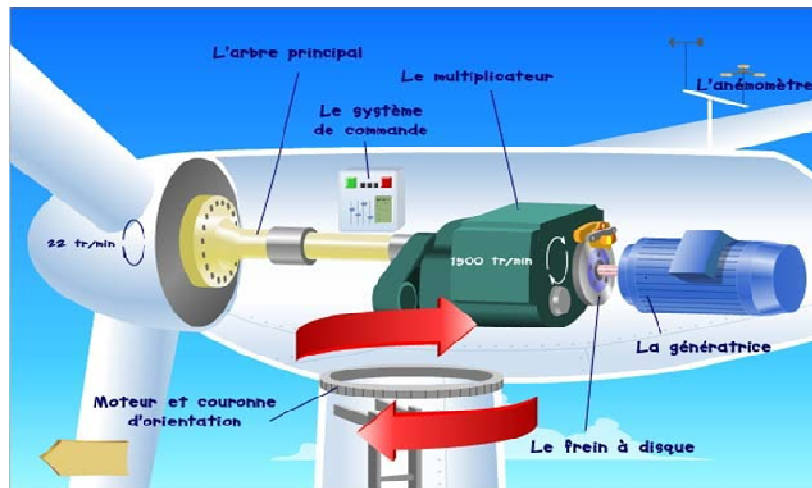


Figure I. 5 : Eléments constituant une éolienne

En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

I.4 Conversion de l'énergie éolienne

I.4.1 Loi de BETZ

Les pales d'une éolienne tire l'écoulement d'énergie à partir de l'air mobile, qui convertit cette dernière en énergie de rotation et la fournit par l'intermédiaire d'une unité mécanique d'entraînement au rotor d'un générateur électrique. L'énergie cinétique en air d'un objet de la masse m se déplaçant avec la vitesse v est égale à [12], [13] :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2; (Nm) \quad (I.1)$$

La puissance de l'air en mouvement, si nous supposons la vitesse constante du vent, est la suivante :

$$E_c = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 ; (W) \quad (I.2)$$

Où : m - le taux de écoulement (débit) de la masse par seconde.

Lorsque l'air passe à travers une zone A , telle que la surface balayée par les pales du rotor, la puissance dans l'air peut être estimé par :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 (W) \quad (I.3)$$

Où : ρ - la densité de l'air. Elle varie avec la pression de l'air et la température, dans le travail on prend $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

L'équation ci-dessus estime combien de puissance se trouve dans le vent, mais quelle quantité de cette puissance peut être obtenue à partir du flux d'air avec un convertisseur de puissance ? L'énergie mécanique qui est obtenu du convertisseur à partir du flux d'air sera égale à la différence des puissances du flux d'air avant et après le convertisseur [10] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot (A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3); (W) \quad (I.4)$$

Où : A_1 et A_2 - les sections transversales avant et après le convertisseur ;

v_1 et v_2 - la vitesse du vent avant et après le convertisseur. Comme le flux d'air passe par le convertisseur, la vitesse du vent doit diminuer derrière le convertisseur de d'énergie éolienne et le flux massif reste invariable. Par conséquent,

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 ; \left(\frac{Kg}{s}\right) \quad (I.5)$$

Ainsi,

$$\frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_1 (v_1^2 - v_2^2); (W) \quad (I.6)$$

De l'équation (1.6), on peut remarquer que la puissance mécanique maximale se produit lorsque V_1 est nulle. Si V_2 est égale à zéro, l'air a été porté à un arrêt complet par le convertisseur, qui n'est pas physiquement possible. Si la vitesse de sortie derrière le convertisseur est zéro, alors la vitesse d'apport doit être zéro, que implique qu'il n'y a pas de débit par le convertisseur. Par conséquent, la puissance mécanique débitée du flux d'air doit être exprimé d'une autre équation. En utilisant la loi de la conservation des impulsions, la force exercée par le vent sur le convertisseur est :

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) ; (N) \quad (I.7)$$

La transmission mécanique extraite est :

$$P_m = \dot{m} \cdot v' = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v' ; (W) \quad (I.8)$$

En comparant l'équation (1.4) et (1.8) on peut obtenir la relation pour la vitesse du flux v' :

$$v' = \frac{1}{2} (v_1 - v_2) ; \left(\frac{m}{s}\right) \quad (I.9)$$

Ainsi la vitesse du flux d'air à travers le convertisseur est égale à la moyenne de v_1 et de v_2 .

La puissance mécanique du convertisseur peut alors être exprimé en tant que :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2); (W) \quad (I.10)$$

Si l'on compare cette puissance mécanique de sortie avec la puissance dans le flux d'air qui circule à travers la même surface transversale de la section A , le rapport entre la

puissance mécanique débitée par le convertisseur et la puissance contenue dans le flux d'air qui traverse la même zone est appelée le "coefficient de puissance" C_p et peut être représentée comme suit:

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\frac{1}{4}\rho.A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho.A.v^3} \quad (I.11)$$

Le coefficient de puissance peut également être exprimé en termes de rapport de vitesse v_1/v_1 :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 - \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (I.12)$$

Si on trace l'équation (I,12) on remarque que la valeur maximale idéale du coefficient de puissance C_p donne la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne se produit quand $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$ (voir la fig. 1.6), donc le C_p devient :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593$$

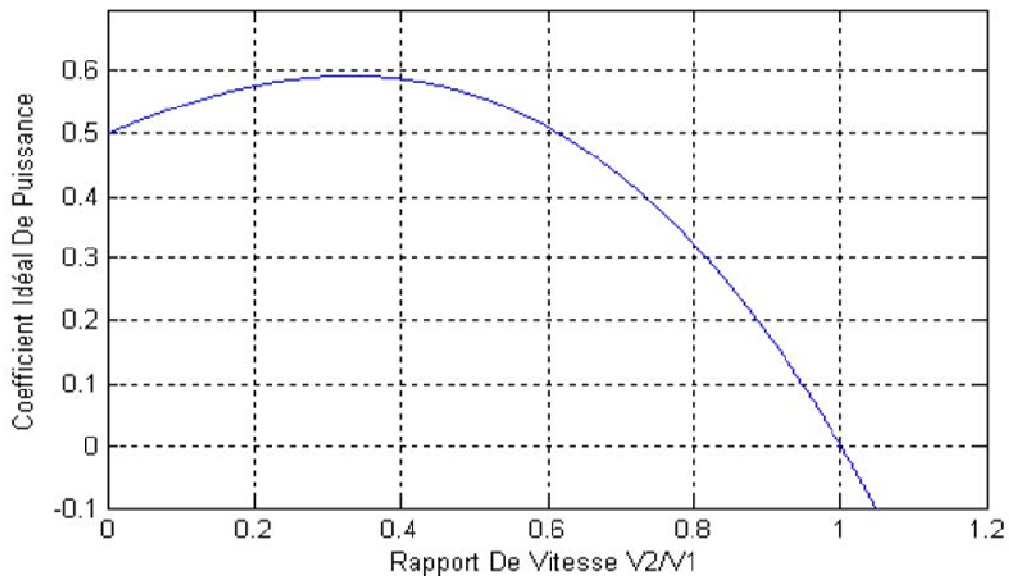


Figure I.6 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le " facteur de Betz " ou " limite de Betz " [14], [15], [16]. Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement.

Dans des cas réels, l'éolienne aura toujours un plus petit coefficient maximum de puissance que le facteur de Betz ; à cause des pertes aérodynamiques qui dépendent de la conception du rotor et de la construction (nombre de pales, poids, rigidité, etc..). Le coefficient de puissance et l'efficacité d'un système d'éoliennes sont différents. L'efficacité d'une éolienne inclut la perte dans la transmission mécanique, la production d'électricité, les pertes du convertisseur, etc., où le coefficient de puissance est l'efficacité de convertir la puissance du vent en puissance mécanique dans l'arbre du rotor. La figure 1.7 montre un diagramme avec les pertes d'un système de la turbine éolienne [17]. Le coefficient de puissance est généralement donné comme fonction du rapport de vitesse en bout de pale d'hélice λ et l'angle d'attaque de pale β . L'angle d'attaque est l'angle entre le plan de la rotation et l'accord du plan latitudinal de la pale [18]. Le rapport de vitesse en bout d'une éolienne est défini comme :

$$\lambda = \frac{u}{v_1} = \frac{\Omega_1 \cdot R}{v_1} \quad (I.13)$$

Où : u - la vitesse tangentielle d'attaque de la pale ;

Ω_1 - la vitesse angulaire du rotor ;

R - le rayon du rotor en mètres ;

v_1 - la vitesse du vent.

La caractéristique du coefficient de puissance par rapport au rapport de la vitesse en extrémité est présentée par la (figure I.7). Cette caractéristique est un élément principal dans la caractérisation des convertisseurs d'énergie éolienne [19].

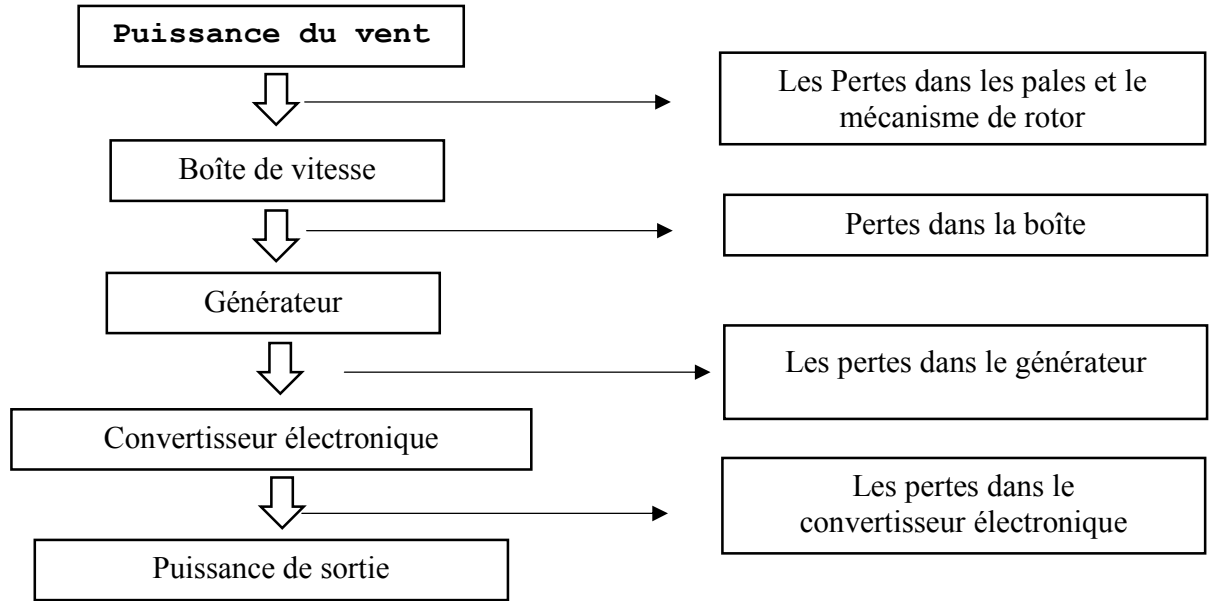


Figure I.7 : Débit de puissance et les pertes

I.4.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.8) et (I.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I.14)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (I.15)$$

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

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

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.

I.4.3 Utilité de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (1.8)

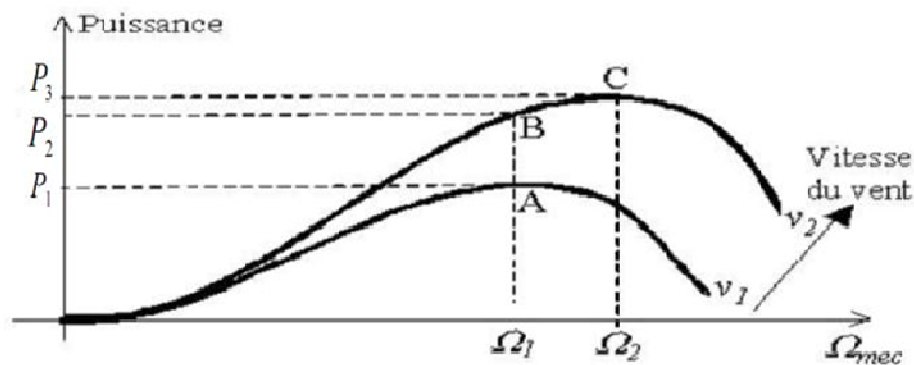


Figure 1.8 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.

Pour une vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A) (Figure 1.8). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [20].

I.5 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

I.5.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I.9), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice. Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et

aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

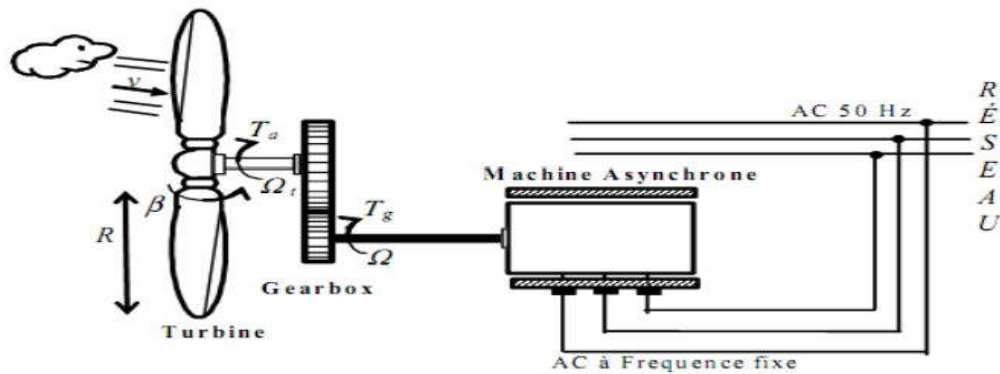


Figure I.9 : Aérogénérateur à vitesse fixe

I.5.1.1 Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

I.5.1.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques).
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

I.5.2 Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse fixe (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.10) [21].

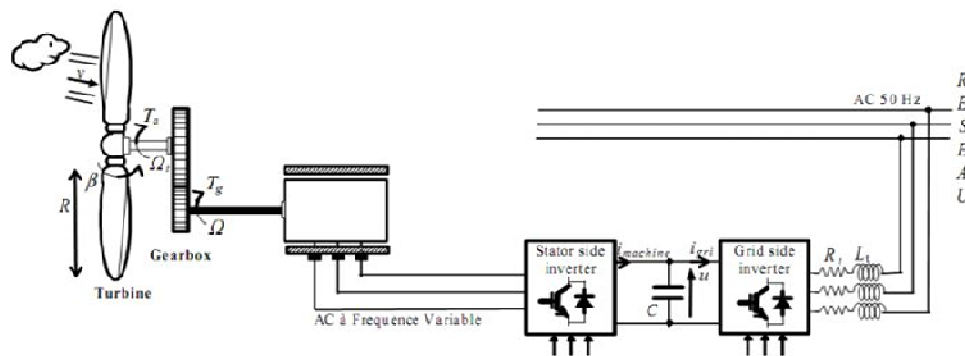


Figure I.10 : Aérogénérateur à vitesse variable

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude.

I.6 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique

I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée.

Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques. De plus, le convertisseur

statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau (Figure I.11). Donc il nous faut des composants de puissances plus performants, voire spéciaux.

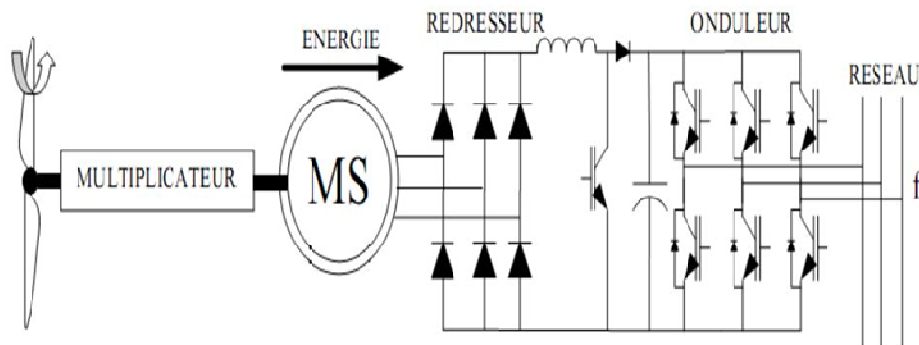


Figure I.11 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne

I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant. Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil, on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point $g=0$)). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%). Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau (éolienne à vitesse fixe) (Figure I.12). De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau.

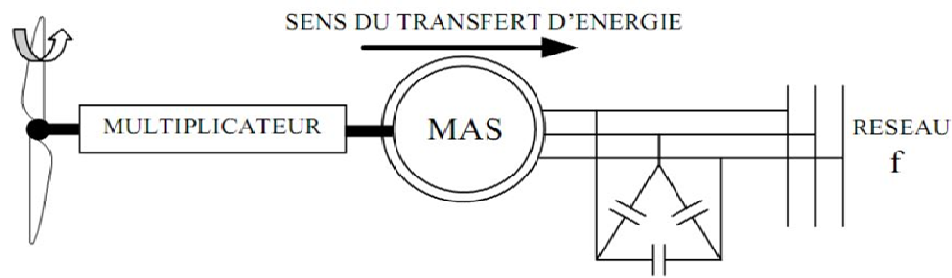


Figure I.12 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne

Par conséquent, la MADA a trouvé la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique. Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux (Figure I.13).

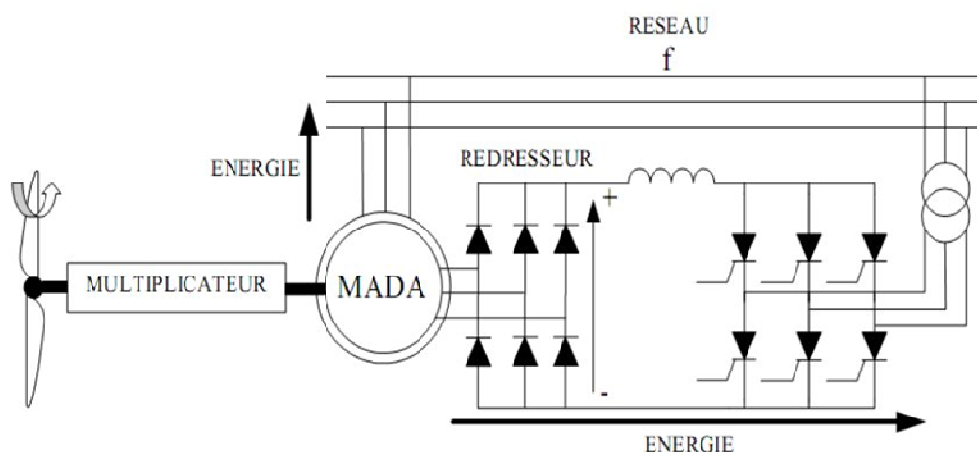


Figure I.13 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne

I.7 Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

I.7.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure I.14).

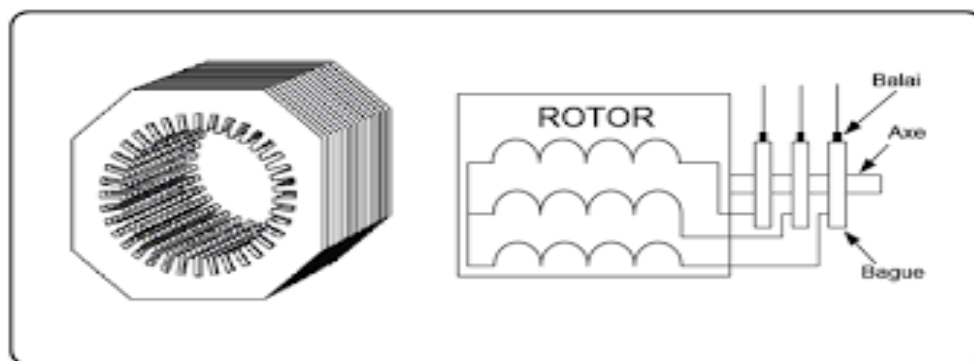


Figure I.14 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

I.7.1.1 Double alimentation par le stator (Brushless)

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Figure I.15).

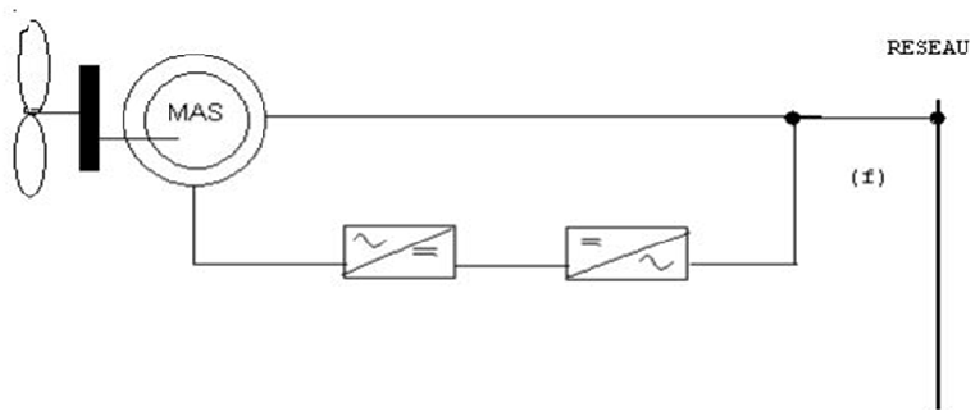


Figure I.15 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une 32^{ème} partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs d'électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine ; le coût s'en trouve réduit. Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

I.7.1.2 Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (Figure I.16). Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie $(1 - g) \cdot P$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste $g \cdot P$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g \cdot f$. Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g) \cdot P$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (Figure I.16). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

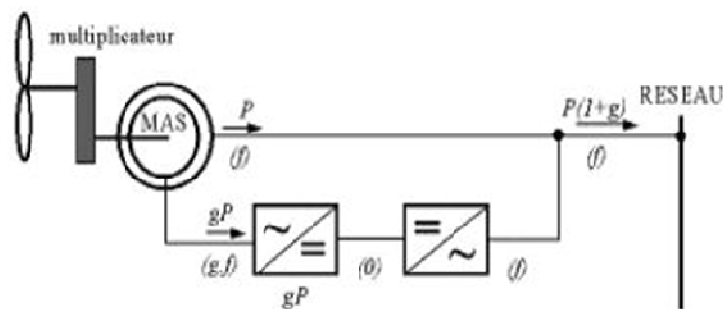


Figure I.16 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

I.7.2 Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au

rotor et via une interface électronique, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement [22]. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique, on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine [23]. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous (Figure I.17) :

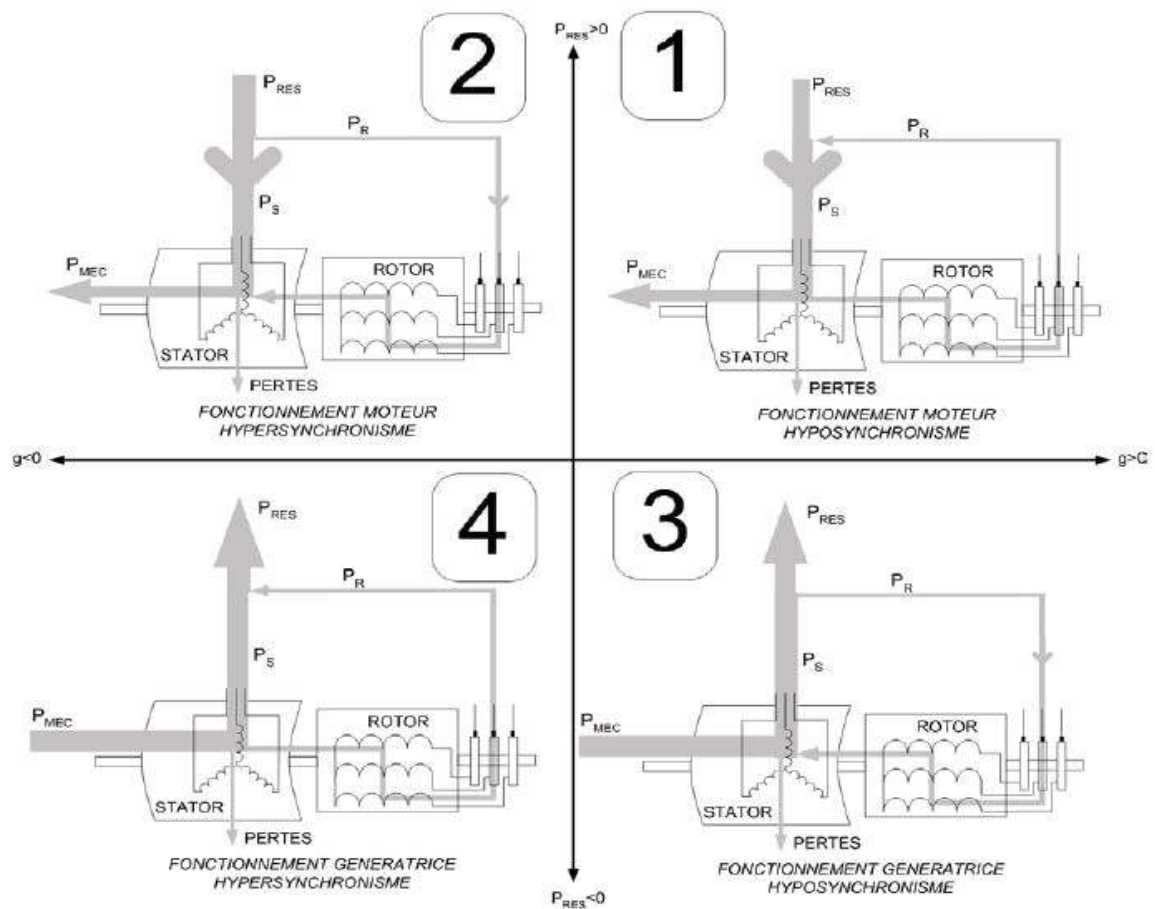


Figure I.17 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

1. Stationnaire ($g=1$)

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F_{em} induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

2. Hypo synchrone ($0 < g < 1$)

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r

tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

3. Synchrone ($g=0$)

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas, les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent, il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

4. hyper synchrone ($g<0$)

Par l'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

I.7.3 Application de la MADA dans le domaine éolien

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance (Figure I.18).

La MADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine.

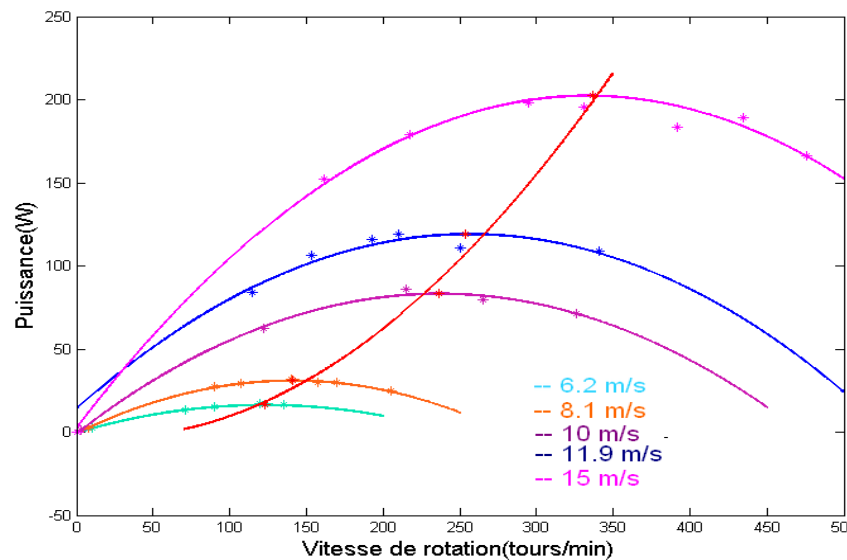


Figure I.18 : Puissance produite par la turbine

I.8 Conclusion

A travers la synthèse bibliographique relative à la machine asynchrone à double alimentation, nous avons pu noter le rôle de celle-ci et ses avantages par rapport aux autres convertisseurs conventionnels.

La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique, cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne.

Nous pouvons conclure de ce chapitre que la MADA devienne une alternative à la machine synchrone ainsi qu'aux autres dispositifs de productions d'énergie électrique dans les réseaux isolés mais aussi en tant que génératrice d'appoint lors des pics de consommations.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA COMMANDE MACHINE

ASYNCHRONE DOUBLA ALIMENTATION.

II.1 Introduction

L'étude du comportement d'un système est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. Nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel de ce système.

Pour les machines électriques tournantes, la modélisation nécessite une parfaite connaissance de la structure électrique (alimentation électrique) et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux) [24].

La modélisation de la machine asynchrone est généralement traitée par la méthode des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé réel à un système diphasé fictif. Pour certaines raisons, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (à définir et à respecter) peuvent être adoptées dans l'élaboration des modèles mathématiques [25].

Dans le présent chapitre, nous présenterons la modélisation de la MADA et de son alimentation. Nous débuterons par la mise en équation de la MADA en exprimant les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement dans le référentiel triphasé que l'on notera (A, B, C). Nous réduirons l'ordre du système et éliminerons la dépendance qui existe entre les coefficients d'inductances et la position du rotor par la transformation de Park. Cette transformation nous permettra de donner un nouveau modèle de la MADA dans le référentiel biphasé de Park noté usuellement (d, q). Ensuite, nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et leur commande MLI. Une série de simulations sera réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK a été envisagée, non seulement dans le but de vérifier les performances de l'association Convertisseurs-MADA sous différentes conditions et valider les modèles obtenus, mais aussi en vue de leur emploi pour valider les stratégies de commandes développées dans les chapitres suivants.

II.2 Modèle mathématique de la MADA

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier l'étude de cette machine, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine a une parfaite symétrie de construction ;
- L'entrefer est d'épaisseur et de perméabilité constante ;
- L'effet d'encoche ainsi que l'effet de peau sont négligeable ;
- Un même nombre des phases entre le stator et rotor ;
- Une répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer, de la force magnétomotrice créée par chaque bobinage ;
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- la résistance des différents enroulements de la machine est constante ;

La représentation schématique d'une machine à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure (II.1).

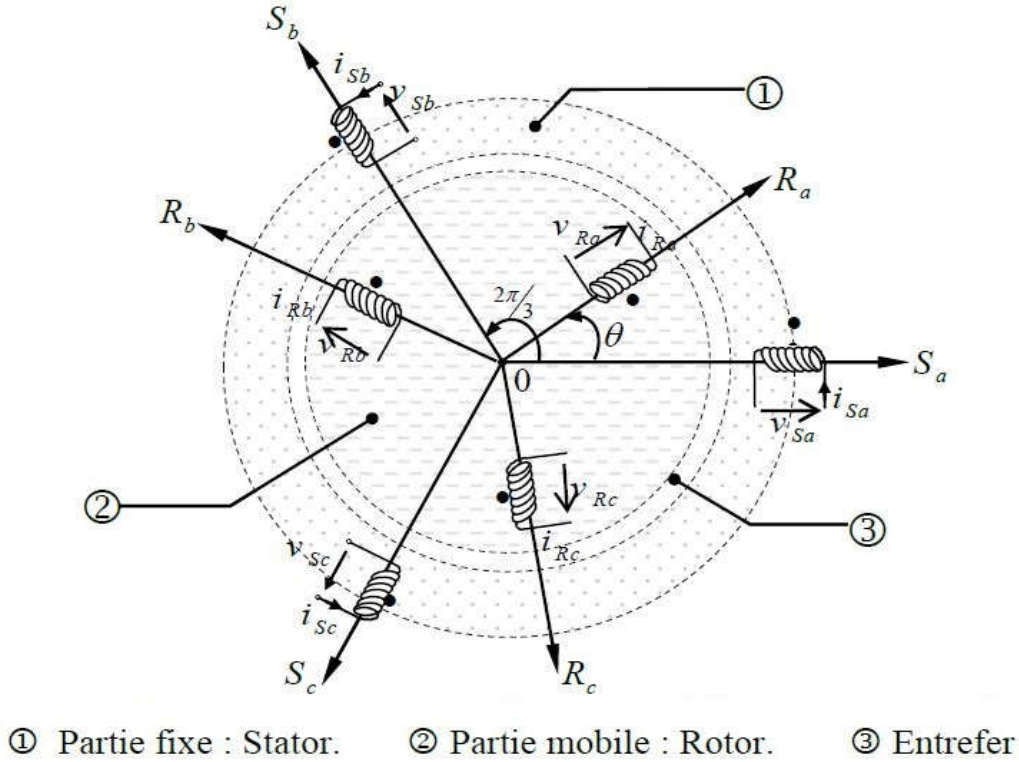


Figure II.1 : Représentation de la MADA dans le système triphasé.

II.2.2 Equations électriques :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

□ **Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

□ **Pour le rotor :**

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

II.2.3 Equations magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{m_s} & L_{m_s} & L_{m_1} & L_{m_3} & L_{m_2} \\ L_{m_s} & L_s & L_{m_s} & L_{m_2} & L_{m_1} & L_{m_3} \\ L_{m_s} & L_{m_s} & L_s & L_{m_3} & L_{m_2} & L_{m_1} \\ L_{m_1} & L_{m_2} & L_{m_3} & L_r & L_{m_r} & L_{m_r} \\ L_{m_3} & L_{m_1} & L_{m_2} & L_{m_r} & L_r & L_{m_r} \\ L_{m_2} & L_{m_3} & L_{m_1} & L_{m_r} & L_{m_r} & L_{m_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (II-3)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_{m_1} = L_m \cos(\theta) \\ L_{m_2} = L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{m_3} = L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

II.3 Modélisation de la MADA dans le plan diphasé d,q

La résolution analytique dans le repère triphasé est très difficile, car le système d'équations différentielles est à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation de la machine. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations les plus utilisées, nous utilisons celle de Park (voir figure II.2) [26][27].

II.3.1 Transformation de PARK

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer des référentiels (A, B, C) vers (α, β, O) , ou (d, q, O) . Le référentiel (α, β, O) est toujours fixe, par rapport à (A, B, C) , par contre le référentiel (d, q, O) est mobile. Il forme avec le repère fixe (α, β, O) un angle qui est appelé angle de la transformation de Park, ou angle de Park [28].

On désigne par : " d " l'axe direct et par " q " l'axe en quadrature arrière. La rotation dans le sens horaire est introduite par la matrice suivante :

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Donc :

$$[x_{d,q,o}] = [R(\theta)] \cdot [x_{\alpha,\beta,o}] \quad (\text{II.5})$$

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

o: indice de l'axe homopolaire.

d: indice de l'axe direct.

q: indice de l'axe en quadrature

La figure (II.2) montre le principe de la transformation de Park.

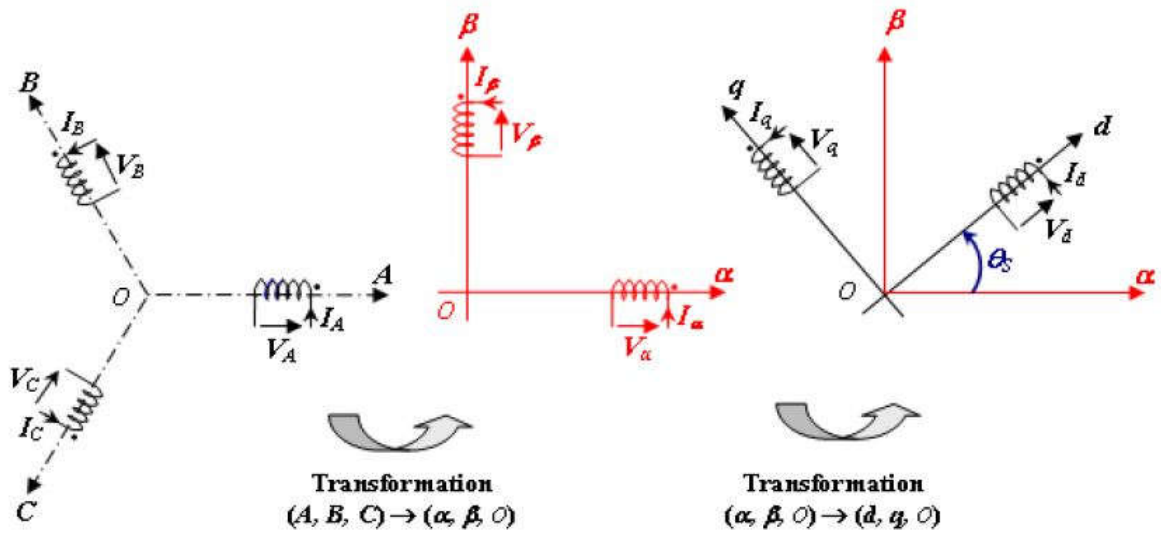


Figure II.2 : Décomposition de la transformation de Park [9].

Pour conserver l'invariance de la puissance instantanée, on utilise la transformation de Concordia associée à la matrice de rotation. La transformation de Park est alors définie de la manière suivante :

$$[x_{d.q.o}] = [P(\theta)] \cdot [x_{A.B.C}] \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

La transformation inverse est définie par :

$$[x_{A.B.C}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [x_{d.q.o}] \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: représentent respectivement les matrices de passage et inverse de Park.

On vérifie que la matrice de passage obtenue est bien orthogonale afin que la puissance instantanée soit invariante :

$$[P(\theta)] \cdot [P(\theta)]^T = [1] \quad (\text{II.10})$$

II.3.2 Application de la transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur parmi les vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques. En supposant que le système est équilibré, donc la composante homopolaire nulle.

Désignons par θ_s et θ_r les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park [29].

La figure (II.3) illustre la position relative des différents référentiels dans l'espace.

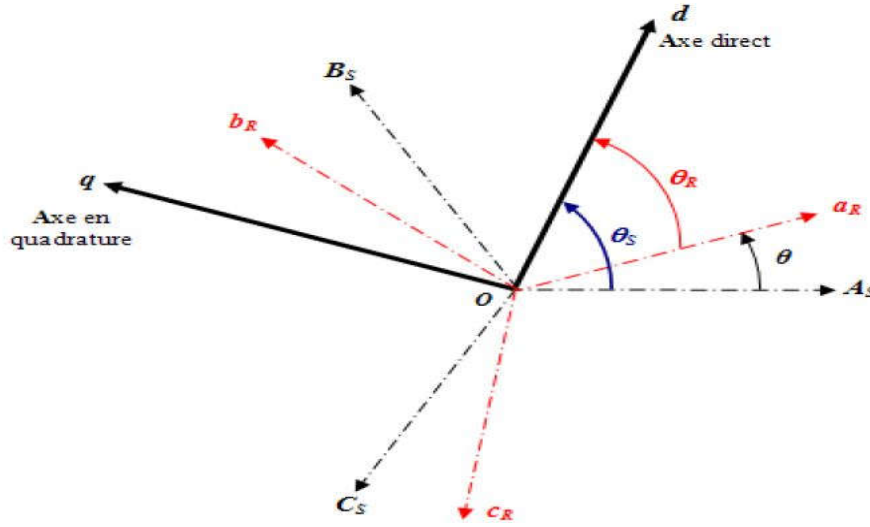


Figure II.3 : Position spatiale des différents référentiels.

On obtient le modèle diphasé représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta)][V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{cases} [I_{s,dq}] = [P(\theta)][I_{s,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

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

II.4 Equations Electriques et Magnétiques suivant l'axe (d, q)

Les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec : ω : Vitesse rotorique.

ω_s : Vitesse du système d'axe (d, q)

Les expressions des flux statoriques et rotoriques suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$l_r = L_r - L_m$: inductance cyclique propre du rotor.

$l_s = L_s - L_m$: inductance cyclique propre du stator.

$L_m = \frac{3}{2} l_m$: inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

II.5 Choix du référentiel

Pour effectuer une étude par simulation du moteur asynchrone, 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 d'axes qui sont des cas particuliers, dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.5.1 Référentiel fixé par rapport au stator (d, q) :

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

$$\omega_a = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0 \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = -\omega$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs rotoriques.

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \omega \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \omega \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2 Référentiel fixé par rapport au rotor (d, q) :

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

$$\omega_a = \omega \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

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

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{xs} \\ V_{ys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xs} \\ I_{ys} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

$$\begin{bmatrix} V_{xr} \\ V_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xr} \\ I_{yr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xr} \\ \Phi_{yr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Ce référentiel est utilisé pour l'étude des grandeurs statoriques.

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

II.5.3 Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d, q) :

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent, d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

$$\omega_a = \omega_s, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s = \omega_r$$

Pour un référentiel lié au champ tournant, le système d'équation devient comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

Les expressions des flux sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + L_m I_{dr} & (a) \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + L_m I_{qr} & (b) \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + L_m I_{ds} & (c) \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + L_m I_{qs} & (d) \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent,

En remplace (II-24) dans (II-22) et (II-23) on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + l_s \frac{dI_{ds}}{dt} + L_m \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s l_s I_{qs} - \omega_s L_m I_{qr} & (a) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + l_s \frac{dI_{qs}}{dt} + L_m \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s l_s I_{ds} + \omega_s L_m I_{dr} & (b) \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + l_r \frac{dI_{dr}}{dt} + L_m \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega l_r I_{qr} - \omega L_m I_{qs} & (c) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + l_r \frac{dI_{qr}}{dt} + L_m \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega l_r I_{dr} + \omega L_m I_{ds} & (d) \end{cases} \quad (II-25)$$

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

En générale, le référentiel lié au champ tournant est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel à un fait que les grandeurs deviennent continues.

II.6 Expression du couple électromagnétique

Il existe plusieurs méthodes qui nous permettent d'exprimer l'équation du couple électromagnétique, deux méthodes sont distinguées. La méthode des travaux virtuels, et la méthode du bilan des puissances instantanées [30][31]. Ainsi, grâce à cette dernière, nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) & (II - 26) \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot M (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) & (II - 27) \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega & (II - 28) \end{cases}$$

II.7 Résultats de simulation

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Le modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park dans le plan (d-q) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le fonctionnement générateur et de 4KW de puissance pour le fonctionnement moteur. Les paramètres sont donnés dans l'annexe.

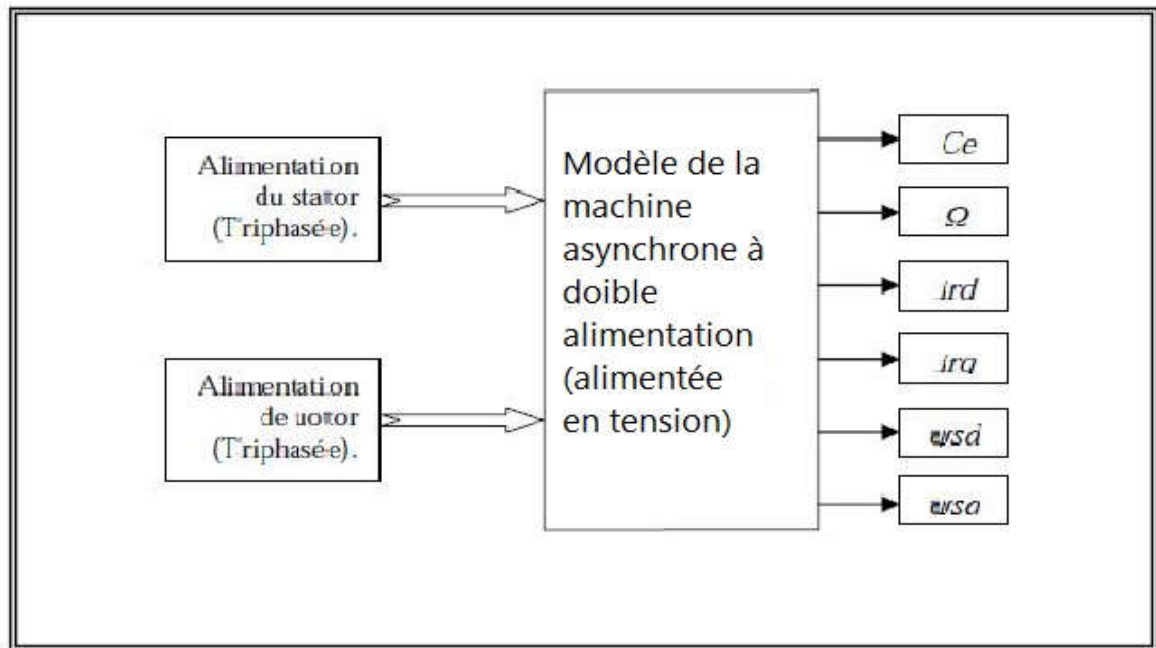
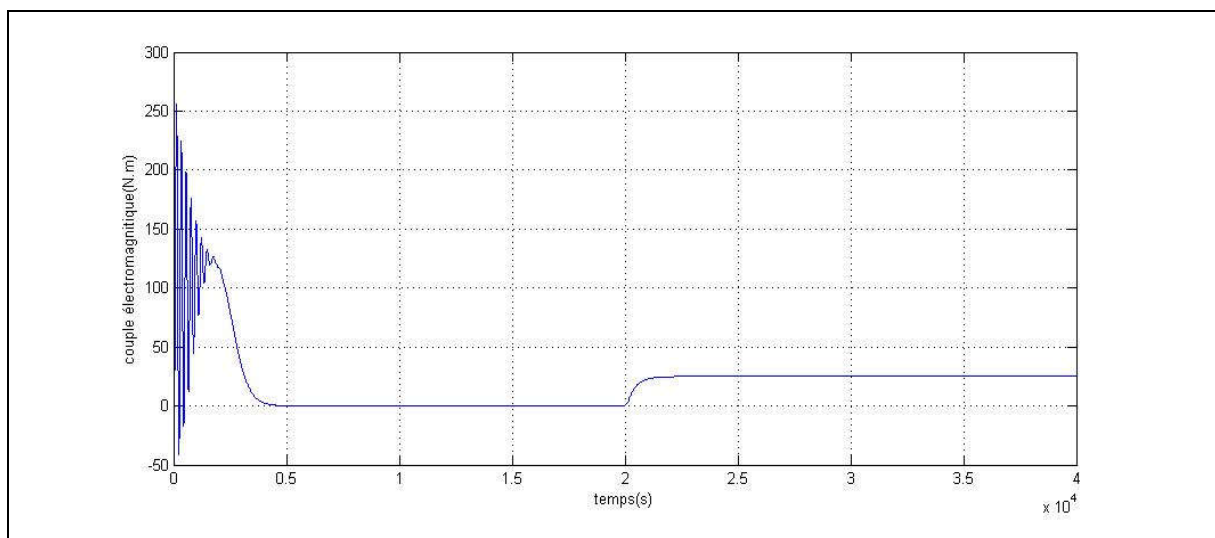


Figure II.4 Schéma bloc de simulation de la MADA alimentée par une tension triphasée

Les résultats de simulation présentés dans les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnement moteur (MADA), alimentée par une source de tension triphasés au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 380V en appliquant un couple résistant $C_r = 25 \text{ N.m}$. on $t = 2\text{s}$



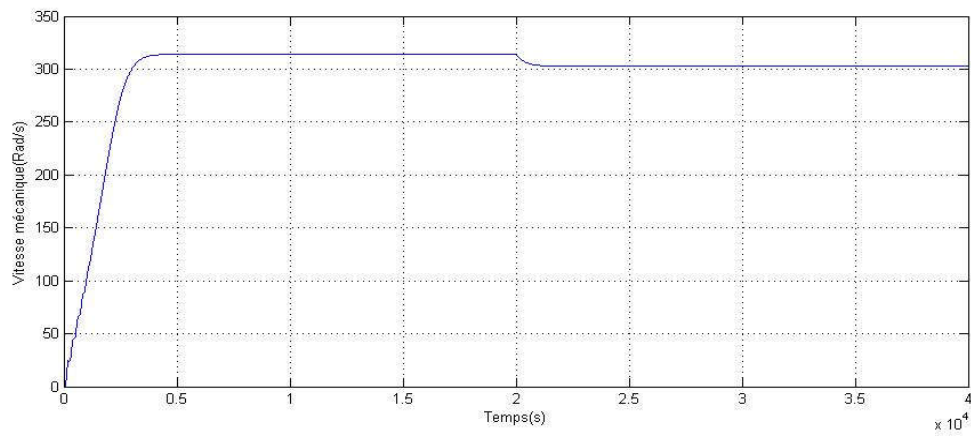


Figure II.5 : Le couple électromagnétique et la vitesse mécanique de la MADA

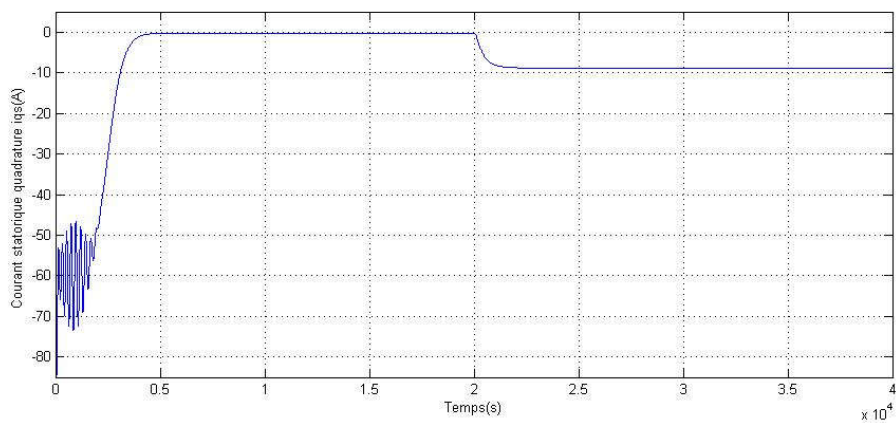
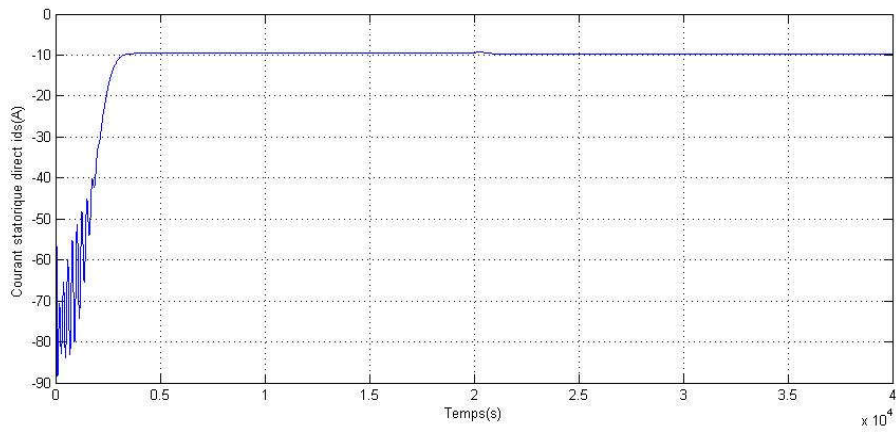


Figure II.6 : les composantes du courant statorique de la MADA

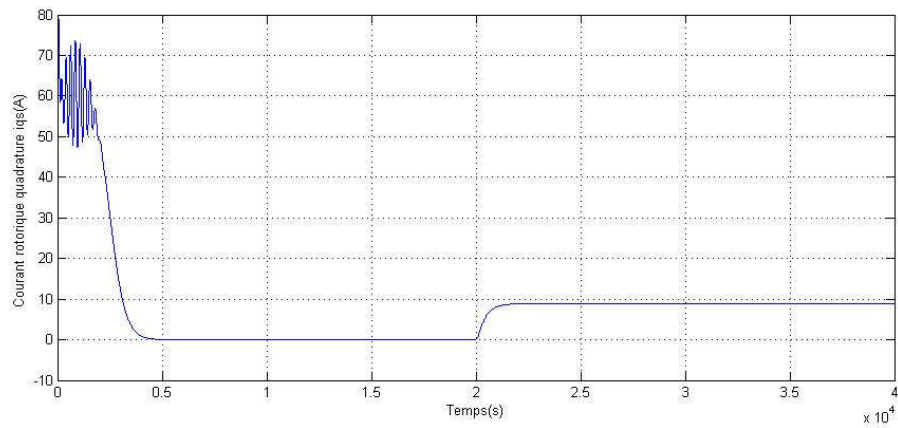
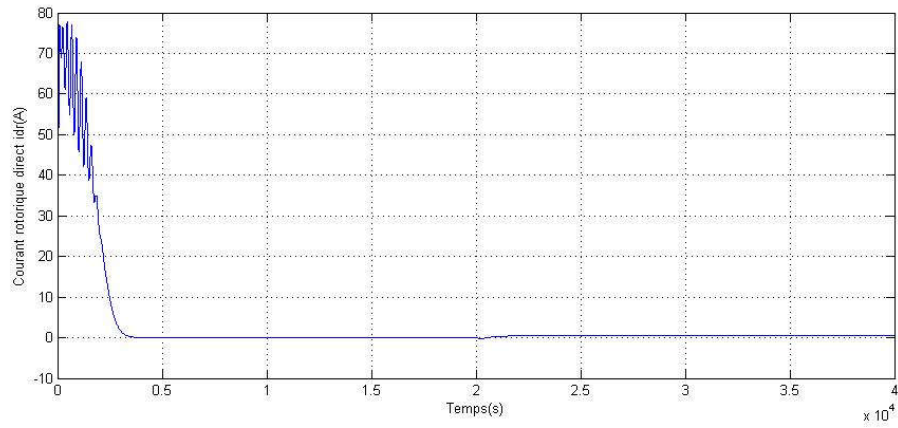


Figure II.7 : les composantes du courant rotorique de la MADA

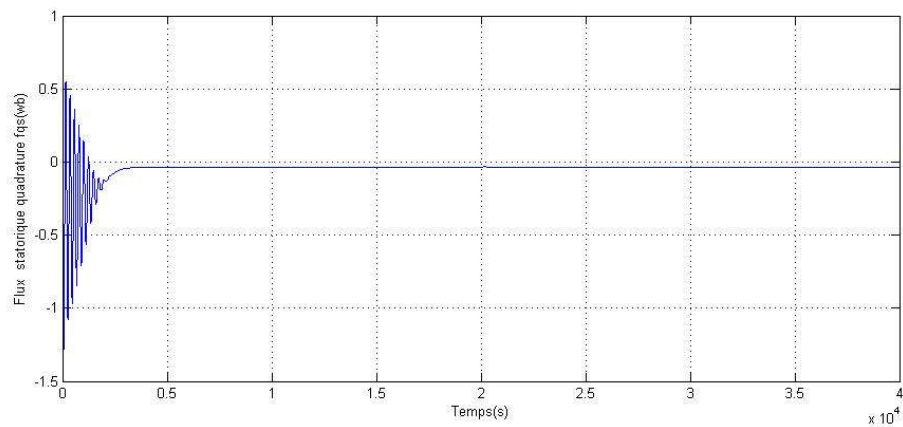
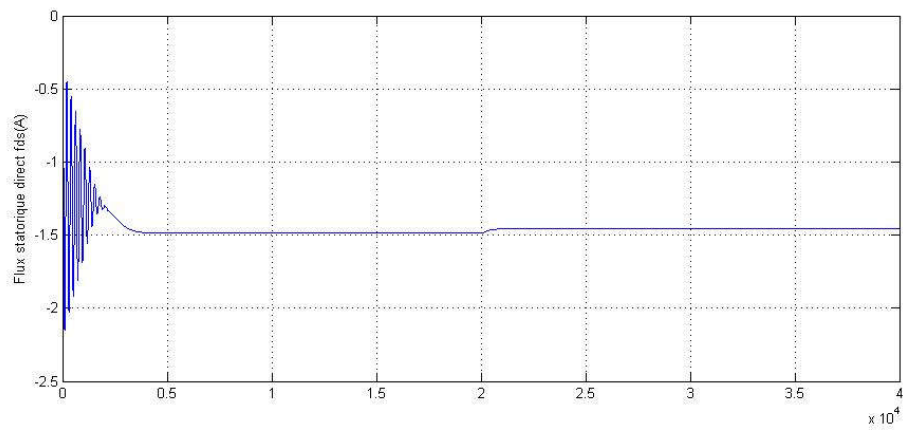
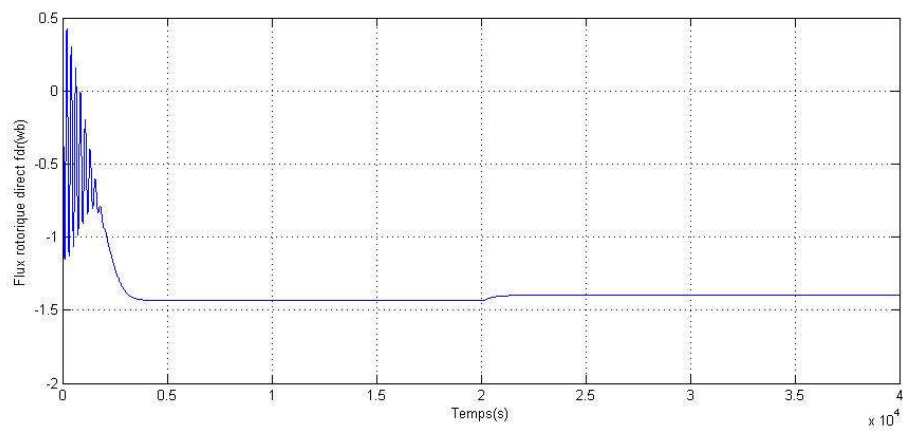


Figure II.8 : les composantes du flux statorique de la MADA



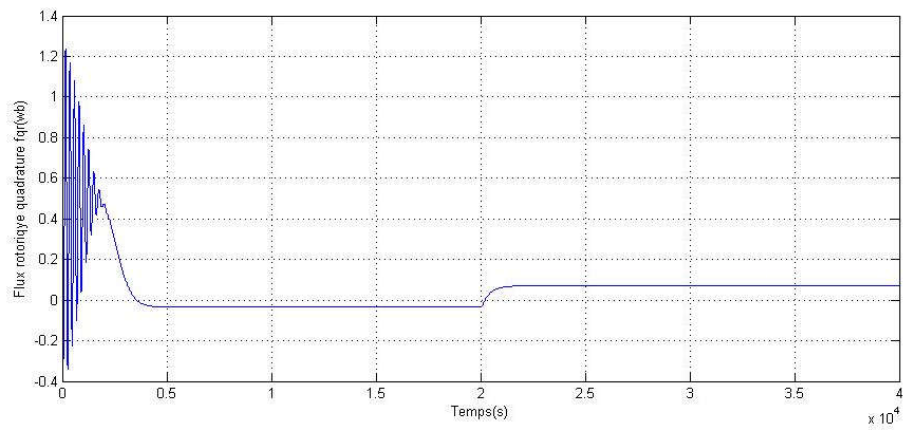


Figure II.9 : les composantes du flux rotorique de la MADA

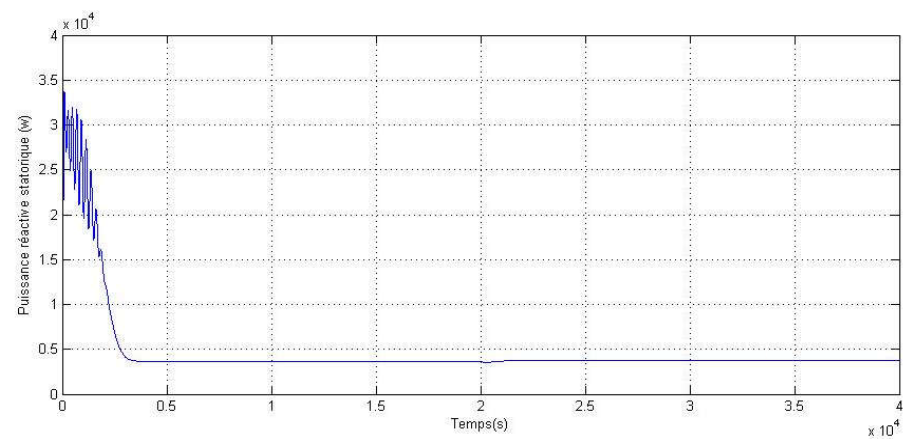
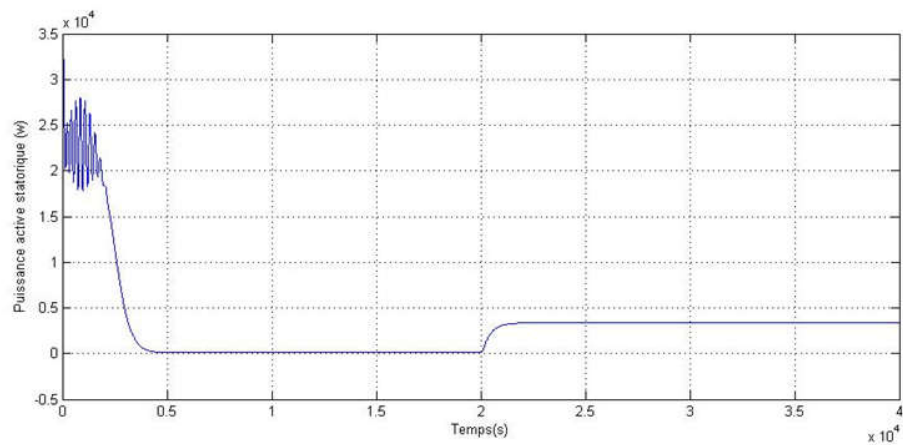
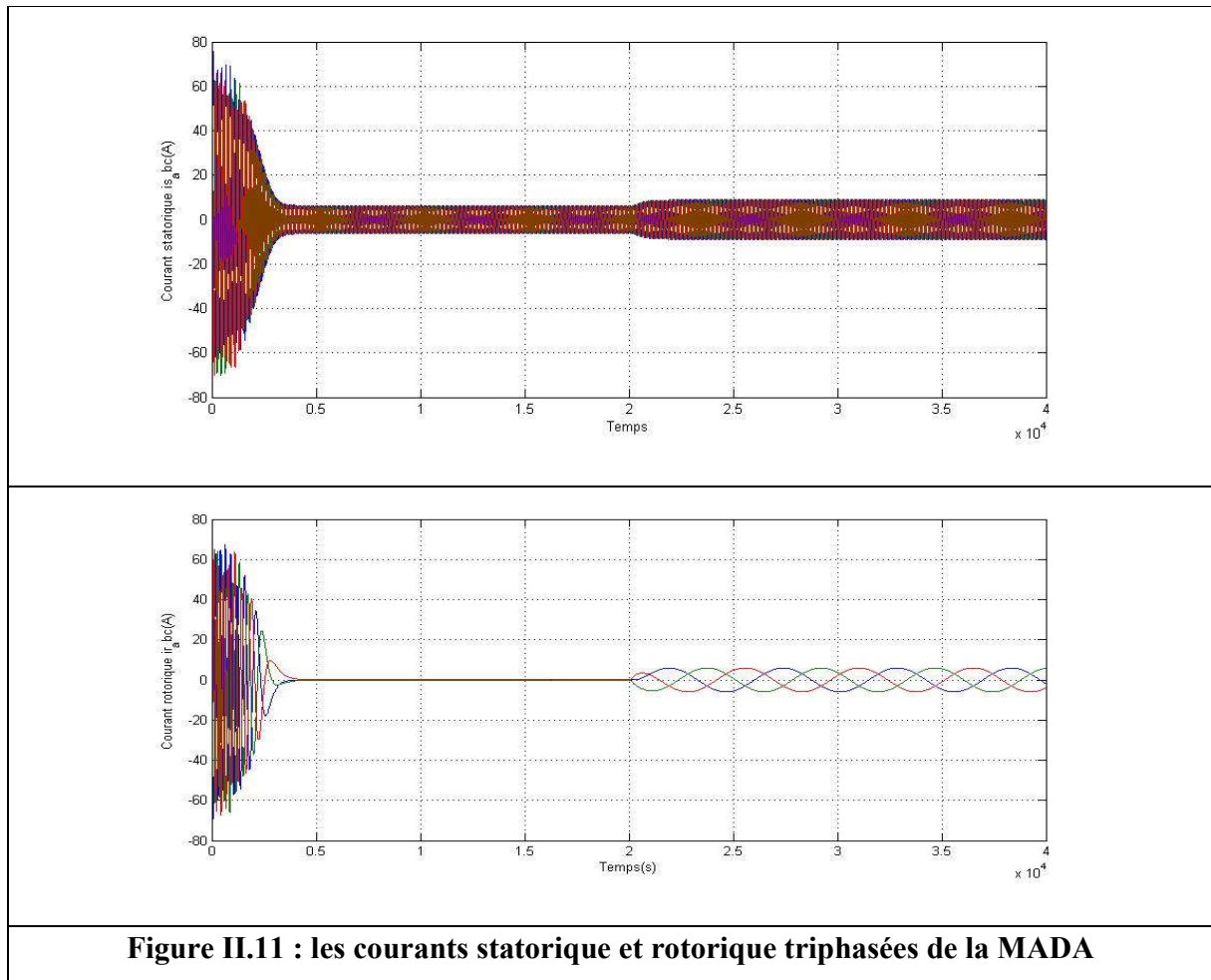


Figure II.10 : les puissance active et réactive statorique de la MADA



II.7 Interprétations des résultats :

La modélisation et la simulation de la MADA ont permis de déterminer et d'analyser les caractéristiques du couple, de la vitesse, le flux et des courants pour différentes valeurs d'alimentation rotoriques. On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent. Dans le régime transitoire, la machine consomme des courants importants. Après le régime transitoire les courants diminuent et à l'instant de l'application de la charge ils augmentent de nouveau.

Au démarrage, le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations. Lors de l'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques et une diminution de

la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques. Les résultats obtenus montrent bien le couplage existant entre les différentes variables de la machine. Donc, pour améliorer la réponse dynamique de la machine et éliminer le couplage existant entre le couple et le flux, on a recours à la commande vectorielle qui permet d'avoir un contrôle indépendant du couple et du flux et un réglage de la vitesse.

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons établi le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation avec son alimentation. La complexité des équations différentielles de ce modèle a été réduite moyennant d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et grâce à l'application de la transformation de Park. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine, ce qui permet une facilité de résolution et de simulation.

Cette modélisation pour le mode de fonctionnement Moteur permis essentiellement de retrouver les résultats classiques de la machine asynchrone à double alimentation, de valider ainsi le modèle et de vérifier que les simulations effectuées par MATLAB sont valables. Comme nous avons pu le voir dans les résultats de simulation, et vu son caractère spécifique, la modélisation de la machine asynchrone double alimentée pose de sérieux problèmes de stabilité en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclés, et spécialement les commandes de type vectoriel devient indispensable. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la commande vectorielle (découplée) de la MADA, qui permet d'avoir un comportement dynamique similaire à celui d'une machine à courant continu.

CHAPITRE III

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE

ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

III.1 Introduction :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de BLONDEL sur la théorie de la réaction des deux axes [32]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [33].

Dans ce but, BLASCHKE (1971) et HASSE ont proposé une méthode de contrôle vectoriel de la machine asynchrone. Et dans ce sens, la commande vectorielle dite aussi 'commande à flux orienté devient d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine [34].

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment. Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par BLASCHKE.
- Méthode indirecte développée par HASSE.

Lors de ce chapitre, nous allons appliquer la commande vectorielle par la méthode indirecte sur la MADA pour contrôler la puissance active et réactive délivré au réseau électrique et de la même méthode aussi, on va contrôler la vitesse cette machine, les résultats de simulation seront donnés à la fin du chapitre.

III.2 Définition de la commande vectorielle

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires [36].

Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie, elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des

régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour toutes les machines à courant alternatif. La technique de la commande appliquée à cette machine est réalisée aux moyens des régulateurs PI pour la puissance active et réactive statoriques et pour les courants rotoriques pour déterminer les rapports cycliques des interrupteurs utilisés pour réaliser une modulation de largeur d'impulsion du convertisseur statique [32].

Dans ce type de commande, la machine est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la figure III.1. Le courant i_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{dr} et i_{qr} sont mutuellement découplées.

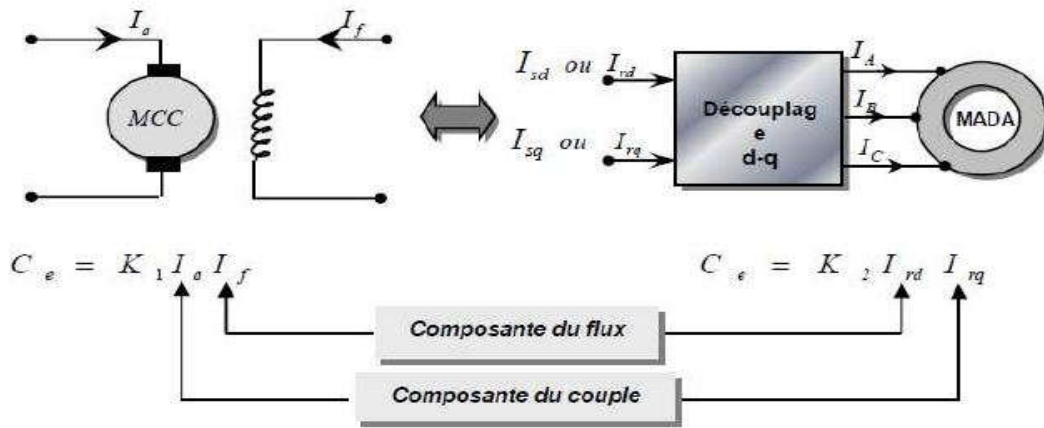


Figure III.1 : Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu

III.2.1 Procède d'orientation du flux :

Il existe trois types d'orientation du flux :

- Orientation du flux rotorique avec les conditions $\Phi_{qr} = 0 \Leftrightarrow \Phi_{dr} = \Phi_r$ (III.1)

- Orientation du flux statorique avec les conditions $\Phi_{qs} = 0 \Leftrightarrow \Phi_{dr} = \Phi_s$ (III.2)

- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions $\Phi_{gq} = 0 \Leftrightarrow \Phi_{gd} = \Phi_g$ (III.3)

Dans notre cas l'orientation du flux statorique est la méthode choisie.

III.2.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique

La commande par orientation du flux consiste à régler la puissance réactive (le flux) par une composante du courant et la puissance active (le couple) par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe (d - q) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux [37].

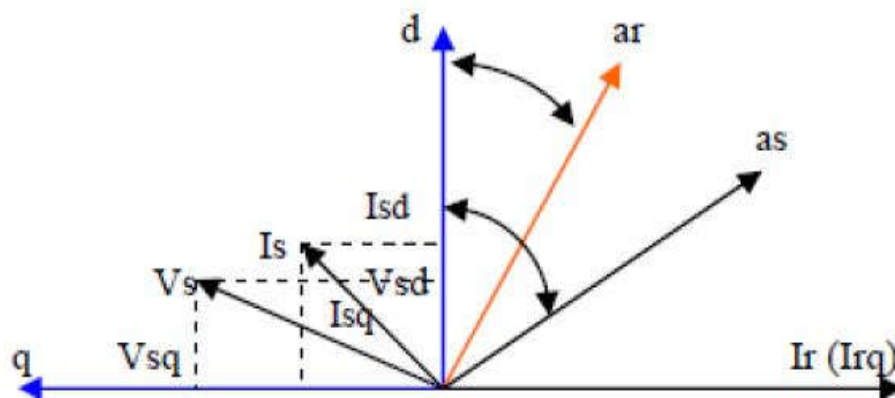


Figure III.2 Orientation du flux statorique, rotorique et d'entrefer.

III.3 Contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie électrique, nous réalisons un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotorique, aux puissances actives et réactive statoriques [38] [37]

III.3.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Les tensions liées au flux statorique selon l'axe d et q peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (III.4)$$

Les equations du flux :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (III.5)$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \\ C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{qr} I_{dr} - \Phi_{dr} I_{qr}) \\ C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \end{cases} \quad (III.6)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques, on vérifie que :

$$\begin{aligned} C_{em} &= \frac{3}{2} p (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) \\ C_{em} &= \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} I_{qr} - \Phi_{qs} I_{dr}) \end{aligned} \quad (III.7)$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine, les équations (III .7) deviennent :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} I_{qr}) \quad (III.8)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux Φ_{ds} devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la

machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé, les tensions statoriques s'expriment par l'expression (II.1):

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{III. 9})$$

R Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [39], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (\text{III. 10})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable [40], [38], [41], [42], [43], les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= 0 \\ V_{qs} &= V_s = \omega_s \Phi_s \end{aligned} \quad (\text{III. 11})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{aligned} \Phi_{ds} &= l_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ 0 &= l_s I_{qs} + L_m I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III. 12})$$

III.3.2 Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir de l'équation (III.12), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{L_s}{L_m} I_{dr} \\ I_{qs} &= \frac{L_s}{L_m} I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III. 13})$$

III.3.3 Relations entre les puissances statoriques et courants statoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$P_s = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \quad (III.14)$$

$$Q_s = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$) donne :

$$P_s = V_s I_{qs} \quad (III.15)$$

$$Q_s = V_s I_{ds}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.15) dans l'équation (III.14), on obtient les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives :

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_s &= \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \end{aligned} \quad (III.16)$$

De l'expression (III.11) nous pouvons écrire :

$$V_s = \frac{\Phi_s}{\omega_s} \quad (III.17)$$

L'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \quad (III.18)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante L_m comme constante, le système obtenu lie de façon

proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d plus la constante $(\frac{V_s^2}{\omega_s L_s})$ imposée par le réseau.

III.3.4 Relations entre les tensions rotoriques et courants rotoriques

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.11) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.13), et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.4). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (III.19)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [44] :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (III.20)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g \frac{V_s L_m}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (III.19), (III.20), permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (figure III.3).

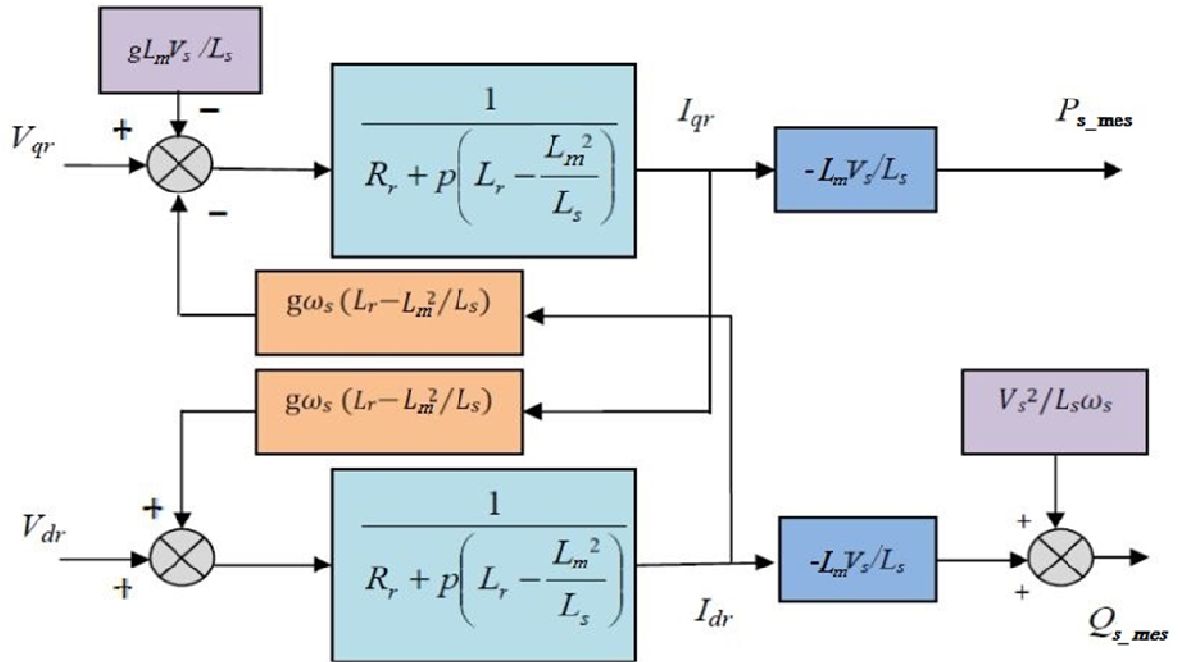


Figure III.3 Schéma bloc du système à réguler

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques. V_{dr} et V_{qr} sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure III.4) et les courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} commodes variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne P_{s_ref} et Q_{s_ref} .



Figure III.4 : Bloc de contrôle à flux orienté.

Il est à noter que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Du fait du faible couplage entre les axes d et q (glissement faible) il est possible

d'établir aisément une commande pour ce système. Ainsi les deux axes pourront être commandés séparément avec leurs propres régulateurs. Cette commande utilisant les puissances actives et réactives comme des consignes est appelée « Commande en P et Q ».

III.4 Etablissement des angles nécessaires aux transformations

Afin d'aligner le flux sur l'axe d, il suffit de retrancher de la phase des tensions statoriques θ_s la valeur $\pi/2$. Cela permettra d'avoir un angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques telles que :

$$\theta_1 = \theta_s - \frac{\pi}{2} \quad (\text{III.21})$$

Cette méthode (Figure III.5) est fiable seulement dans le cas où les tensions statoriques sont stables en fréquence avec peu de fluctuations [38].

L'angle θ_m étant celui que forme le rotor avec le stator, l'angle θ_2 nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques est :

$$\theta_1 = \theta_2 - \theta_m \quad (\text{III.22})$$

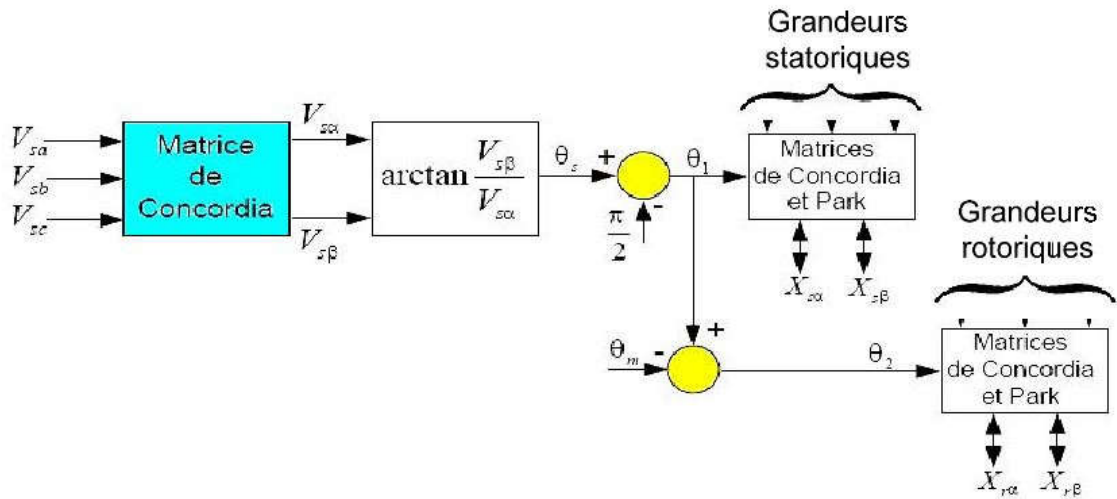


Figure III.5 - Etablissement des angles pour les transformations de Park.

III.5 Control indépendant des puissances active et réactives

III.5.1 Commande vectorielle directe

III.5.1.1 Définition générale

Cette méthode de commande a été proposée par BLASCHKE. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué.

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères ; telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leurs fréquences varient avec la vitesse, ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [45], [46].

III.5.1.2 Commande directe en puissance active et réactive

Dans cette section, on présente la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} .

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{V_s L_m}{L_s}$. Dans cette étude, on a considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. On ne placera donc pas des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la MADA, on considère que la tension du réseau est stable, ce qui permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois, on négligera les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure III.3 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui donne le schéma simplifié représenté dans la figure III.6.

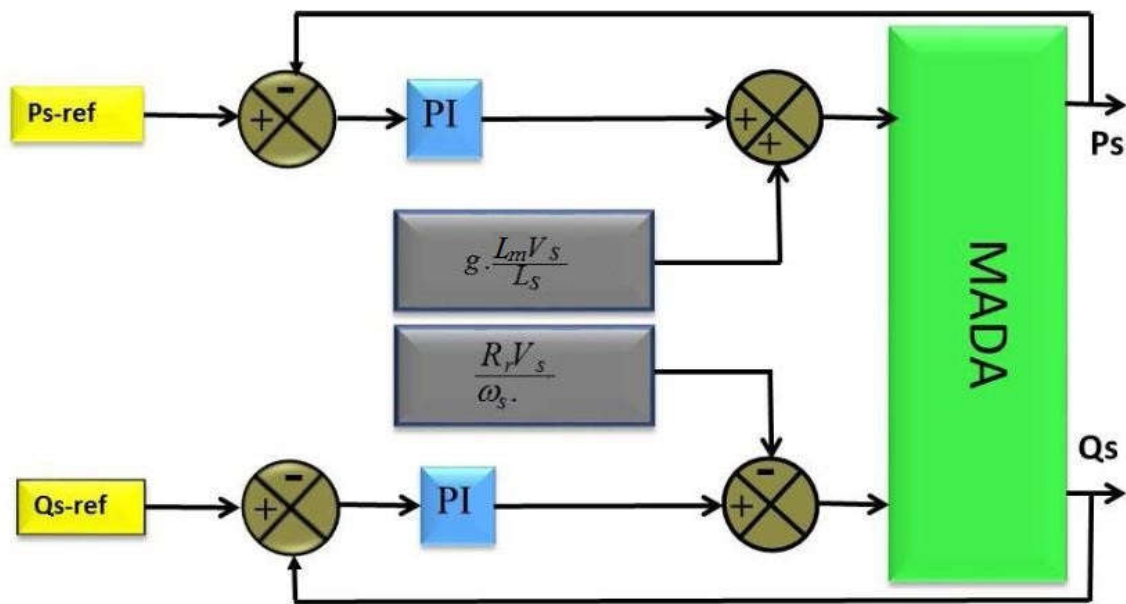


Figure III.6 Schéma bloc de la commande vectorielle directe des puissances actives et réactives

III.5.2 Commande vectorielle indirecte

III.5.2.1 Définition générale

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux, mais seulement sa position, l'idée est proposée par HASSE. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs. Elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [32], [45].

III.5.2.2 Commande indirecte en puissance active et réactive

- Commande en boucle ouverte :

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir les puissances indirectement à travers les courants rotoriques en n'utilisant pas les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axes d et q.

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système (III.16) on déduit les références des courants rotoriques direct et en quadrature suivant les relations :

$$\begin{aligned} I_{rdref} &= \frac{V_s}{\omega_s L_m} - \frac{L_s}{V_s L_m} Q_{sref} \\ I_{qrref} &= - \frac{L_s}{V_s L_m} P_{sref} \end{aligned} \quad (III.23)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc de la figure (III.7) :

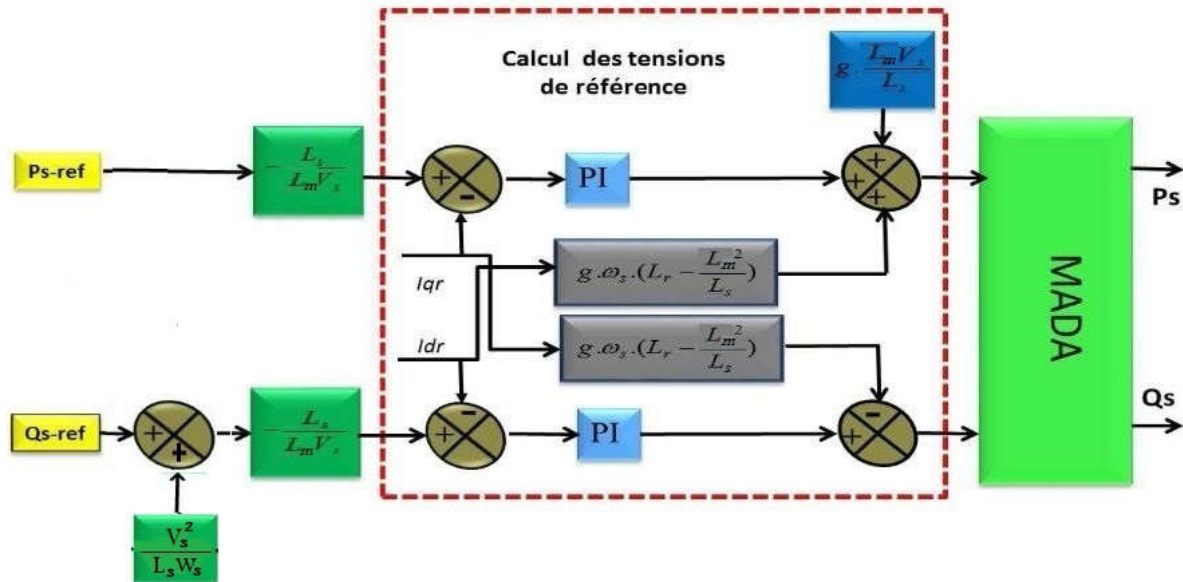


Figure III.7 : schéma bloc de la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

- **Commande en boucle fermée :**

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplage apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA.

Nous obtenons ainsi la structure de la commande présentée sur la figure suivante :

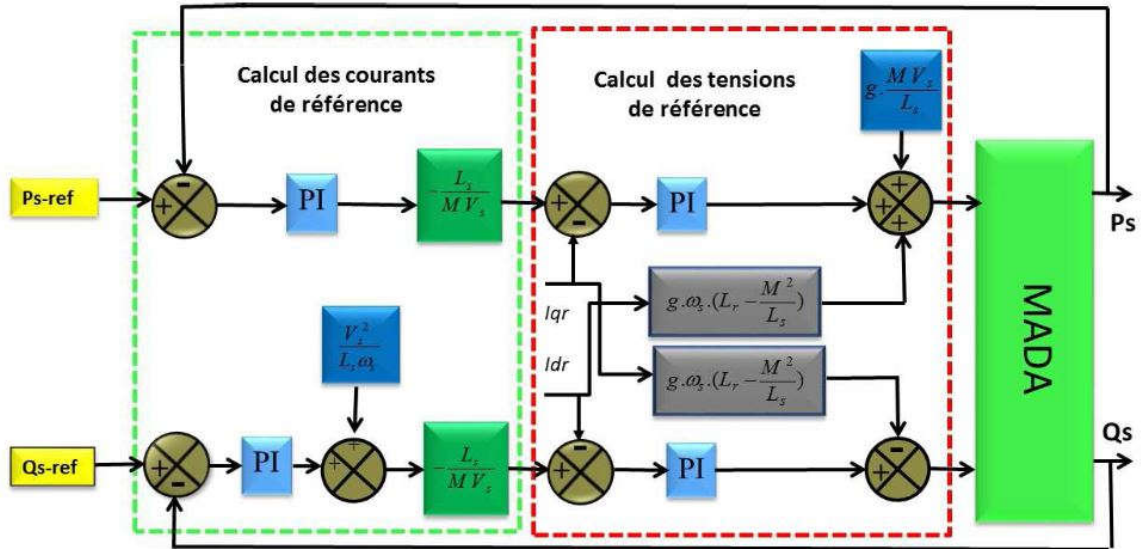


Figure III.8 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA.

De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identique aux premiers.

Dans le présent travail, nous allons recourir à cette méthode pour faire la régulation des puissances.

III.5.2.2 Boucle de régulation de vitesse

Comme l'objectif de notre travail est d'utiliser la MADA dans la chaîne éolienne, il sera très indispensable de faire la régulation en vitesse de cette machine afin de rendre facile son intégration dans cette chaîne. Par la suite, nous allons détailler le fonctionnement de la turbine éolienne et nous pourrons voir que la vitesse de rotation de référence de la machine ainsi que son couple seront fournis par la turbine suivant la technique de contrôle qui sera lui appliquée.

A partir de ce qui précède dans la régulation des puissances, la boucle interne de régulation des courants rotoriques reste inchangé, il nous reste donc de trouver la relation entre la vitesse de rotation et le courant rotorique en quadrature d'une part et celle liée la puissance réactive et le courant rotorique directe d'une autre part.

Les équations électriques et mécaniques développées le deuxième chapitre et avec le négligement des pertes par friction, nous donnent :

$$\frac{P}{js} (C_e - C_r) = \Omega_r \quad (III. 24)$$

$$\frac{P}{js} \Omega_r = (C_e - C_r)$$

$$\frac{P}{js} \Omega_r = G_{\Omega_r} (\Omega_{r_ref} - \Omega_r) \quad (III. 25)$$

Avec K_{Ω_r} est le régulateur PI pour le contrôle de la vitesse rotorique, donné par :

$$K_{\Omega_r} = (K_{p\Omega_r} + \frac{K_{i\Omega_r}}{s}) \quad (III. 26)$$

L'équation (III.25) devient alors :

$$\frac{js}{P} \Omega_r \left(K_{p\Omega_r} + \frac{K_{i\Omega_r}}{s} \right) \Omega_{r_ref} - \left(K_{p\Omega_r} + \frac{K_{i\Omega_r}}{s} \right) \Omega_r \quad (III. 27)$$

$$\frac{\Omega_r}{\Omega_{r_ref}} = \frac{\frac{P}{j}(SK_{p\Omega_r} + K_{i\Omega_r})}{S^2 + S\frac{PK_{p\Omega_r}}{j} + \frac{PK_{i\Omega_r}}{j}} \quad (\text{III. 28})$$

Boucle de régulation de la puissance réactive statorique

La puissance réactive statorique est exprimée par :

$$Q_s = V_{qs}I_{qs} - V_{ds}I_{ds} = V_{qs}I_{ds} \quad (\text{III. 29})$$

En remplaçant V_{qs} , nous avons :

$$Q_s = (R_s I_{qs} + \Omega_e \Phi_{ds}) I_{ds} \quad (\text{III. 30})$$

En négligeant la résistance statorique et en remplaçant I_{ds} , nous aurons :

$$Q_s = \frac{\Omega_e}{6L_s} (\Phi_{ds}^2 - \frac{L_m}{L_r} \Phi_{ds} \Phi_{dr}) \quad (\text{III. 31})$$

La différentielle de l'équation (III.31) par rapport au temps permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} Q_s = -\frac{\Omega_e}{6L_s} \frac{L_m}{L_r} \Phi_{ds} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \quad (\text{III. 32})$$

Avec :

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = V_{dr} - R_r I_{dr} + (\Omega_e - \Omega) \Phi_{qr} \quad (\text{III. 33})$$

$$\Phi_{qr} = L_r I_{qr} \quad (\text{III. 34})$$

Nous obtenons donc :

$$\frac{d}{dt} Q_s = -\frac{\Omega_e}{6L_s} \frac{L_m}{L_r} (V_{dr} - R_r I_{dr} + (\Omega_e - \Omega) 6L_r I_{qr}) \quad (\text{III. 35})$$

$$6SQ_s = 6Q_s = KQ_s(Q_{s_ref} - Q_s) \quad (\text{III. 36})$$

Où : $\lambda = \frac{6L_s L_r}{\Omega_e}$; et K_{Q_s} et le régulateur PI pour la puissance réactive statorique, donné comme suit : $K_{Q_s} = (K_{pQ_s} + \frac{K_{iQ_s}}{s})$. Ainsi (III.35)(III.36) peut être réécrite par la façon suivante :

$$\lambda S Q_s = \left(K_{pQ_s} + \frac{K_{iQ_s}}{S} \right) Q_{s_ref} - \left(K_{pQ_s} + \frac{K_{iQ_s}}{S} \right) Q_s \quad (III. 37)$$

$$\frac{Q_s}{Q_{s_ref}} = \frac{\frac{1}{\lambda} (S K_{pQ_s} + K_{iQ_s})}{S^2 + S \frac{K_{pQ_s}}{\lambda} + \frac{K_{iQ_s}}{\lambda}} \quad (III. 38)$$

De l'équation (III.35), nous pouvons tirer le courant rotorique directe de référence :

$$I_{dr_ref} = \frac{1}{R_r} (V_{dr} (\Omega_e - \Omega) \lambda L_r I_{qr} + \frac{\lambda Q_s}{\Phi_{ds}}) \quad (III. 39)$$

Le terme de couplage $(V_{dr} (\Omega_e - \Omega) \lambda L_r I_{qr})$ reste très faible, il peut donc être négligé. Les courants rotoriques sont régulés par action sur les tensions rotoriques.

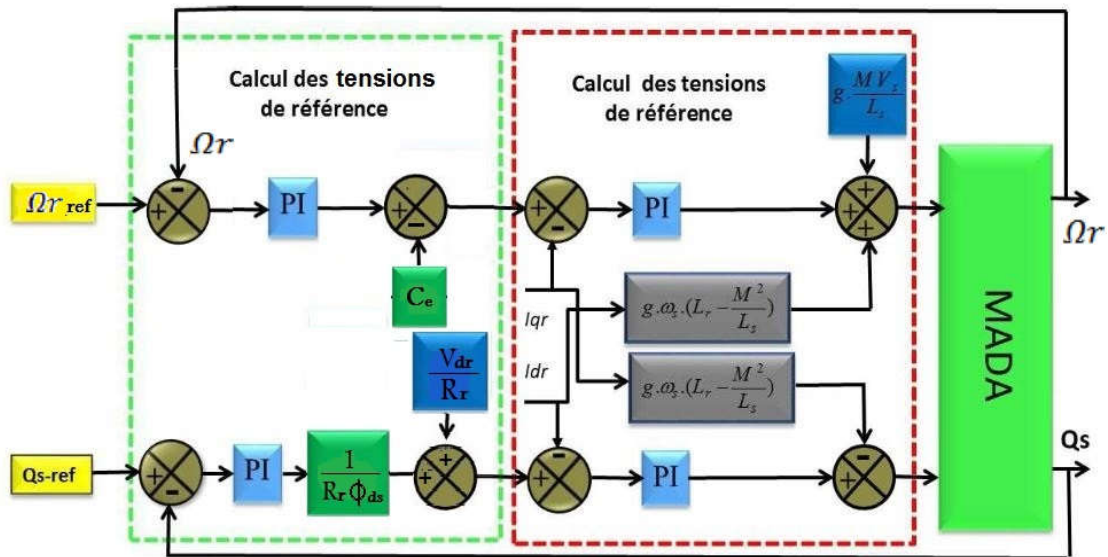


Figure III.23 : Schéma bloc de la régulation de vitesse et puissance réactive statorique

III.6 Synthèse du régulateur PI

La stratégie de commande de la MADA utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance.

Le régulateur PI résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions [46] :

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir.

Sa fonction de transfert est :

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.40})$$

➤ Boucle des puissances

Dans un premier temps, une commande à base de régulateurs PI sera réalisée. Cette dernière en étant simple et rapide à mettre en œuvre, procure l'avantage d'avoir des performances acceptables.

Comme il a été illustré dans les paragraphes précédents, chaque axe comprend un régulateur de type PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$. Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité (Figure III.9).

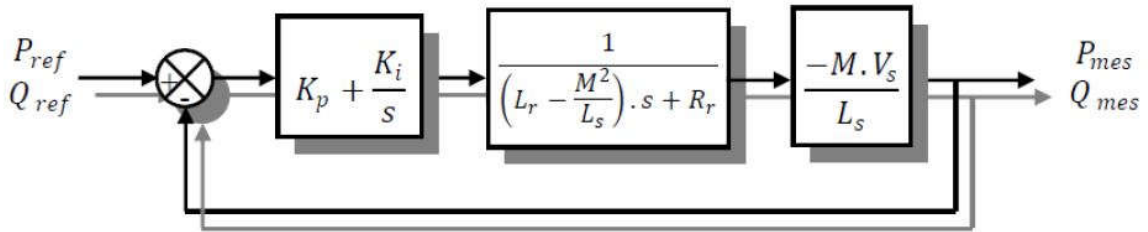


Figure III.9 Système régulé par un PI.

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$\mathbf{FTBO} = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{S + \frac{L_s L_m}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}} \quad (\text{III.41})$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert.

Cette méthode de synthèse sera utilisée pour la détermination des gains des différents régulateurs utilisés dans la commande de MADA. Rappelons que la symétrie du système compensé nous permet de calculer un seul régulateur pour les deux axes pour les puissances et pour les courants.

Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} \quad (\text{III.42})$$

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

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

$$\mathbf{FTBO} = \frac{K_p \cdot \frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{S} \quad (\text{III.43})$$

Ce qui nous donne la boucle fermée :

$$\mathbf{FTBF} = \frac{1}{1 + \tau_r} \quad (\text{III.44})$$

Avec

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{L_m V_s} \quad (\text{III.45})$$

Avec τ_r : le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de (10 ms), 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'impose 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.

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{L_m V_s} \quad (\text{III.46})$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s R_r}{L_m V_s} \quad (\text{III.47})$$

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

➤ Boucle des courants

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commandes indirectes en boucle ouvert et en boucle fermé, ainsi que tous les termes de perturbation compensés, on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

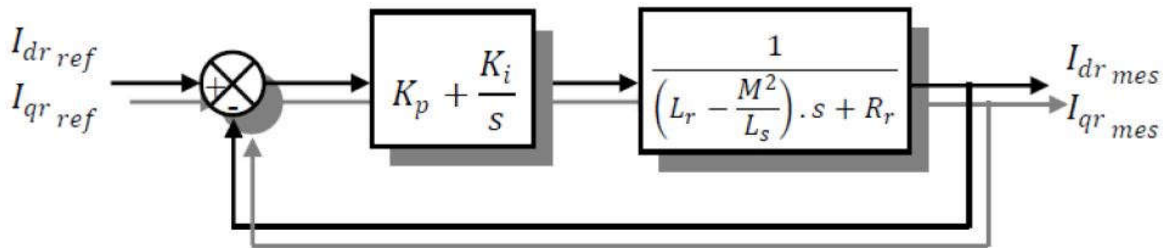


Figure III.10 Schéma de la régulation des courants rotorique.

III.7 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

III.7.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [47]. La (Figure III.11), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [48].

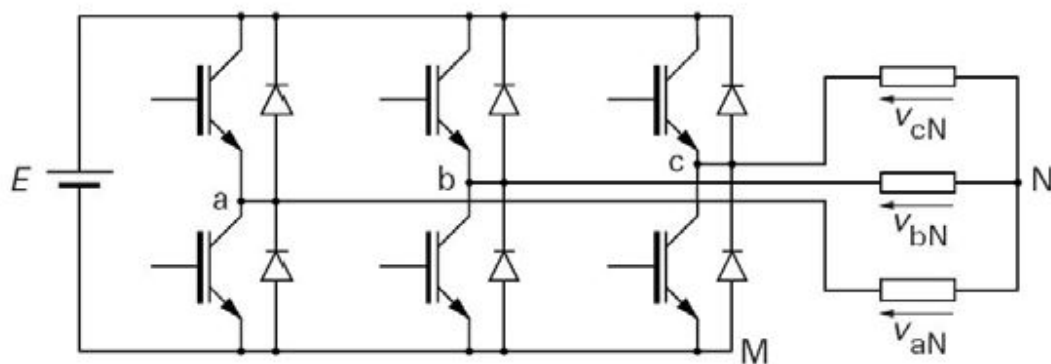


Figure III.11 Onduleur de tension à deux niveaux.

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

- Branche1

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

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

- Branche 2

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

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

- Branche 3

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

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

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

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{DC} - (S_a - S_b) \\ U_{bc} &= V_{DC} - (S_b - S_c) \\ U_{ca} &= V_{DC} - (S_c - S_a) \end{aligned} \quad (III.48)$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (III.49)$$

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

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ca}) \\ u_b &= \frac{1}{3} (U_{bc} - U_{ab}) \\ u_c &= \frac{1}{3} (U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \quad (III.50)$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{DC}}{3} (2.S_a - S_b - S_c) \\ u_b &= \frac{V_{DC}}{3} (2.S_b - S_a - S_c) \\ u_c &= \frac{V_{DC}}{3} (2.S_c - S_b - S_a) \end{aligned} \quad (III.51)$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.52)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie [48].

III.8 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [47]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

La (Fig.III.12) représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente une charge triphasée à partir d'un générateur de tension continue

En contrôlant les états des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur, on fixe les valeurs des tensions de sortie de l'onduleur. L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions u_{ao} , u_{bo} et u_{co} sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a , f_b et f_c qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0

dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales, on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elles aussi un système triphasé équilibré.

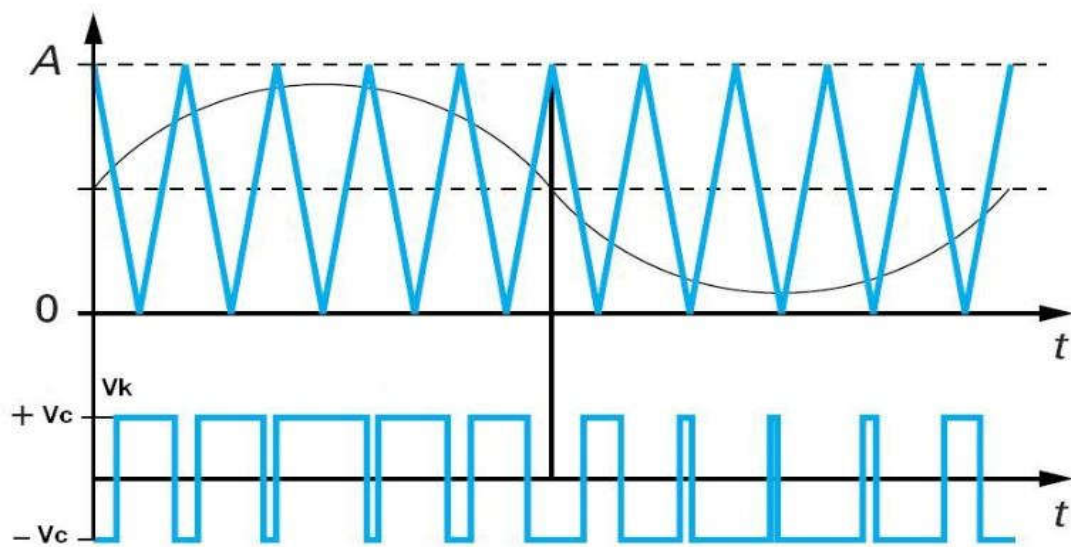


Fig. III.12 Principe de la MLI triangulo-sinusoidale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

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

$$m = \frac{f_p}{f}$$

(III.53)

- Taux de modulation qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence et celle de la porteuse (U_p):

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p}$$

(III.54)

Le choix d'un indice de modulation multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation varie suivant la référence imposée.

III.9 Résultats de simulation

- **Pour l'onduleur de tension avec la technique MLI**

Pour cette stratégie de commande, on visualise les tensions de phase, pour une fréquence $f_s = 50$ Hz et un rapport d'amplitude $r = 0.85$, et cela pour une valeur de $m = 20$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes.

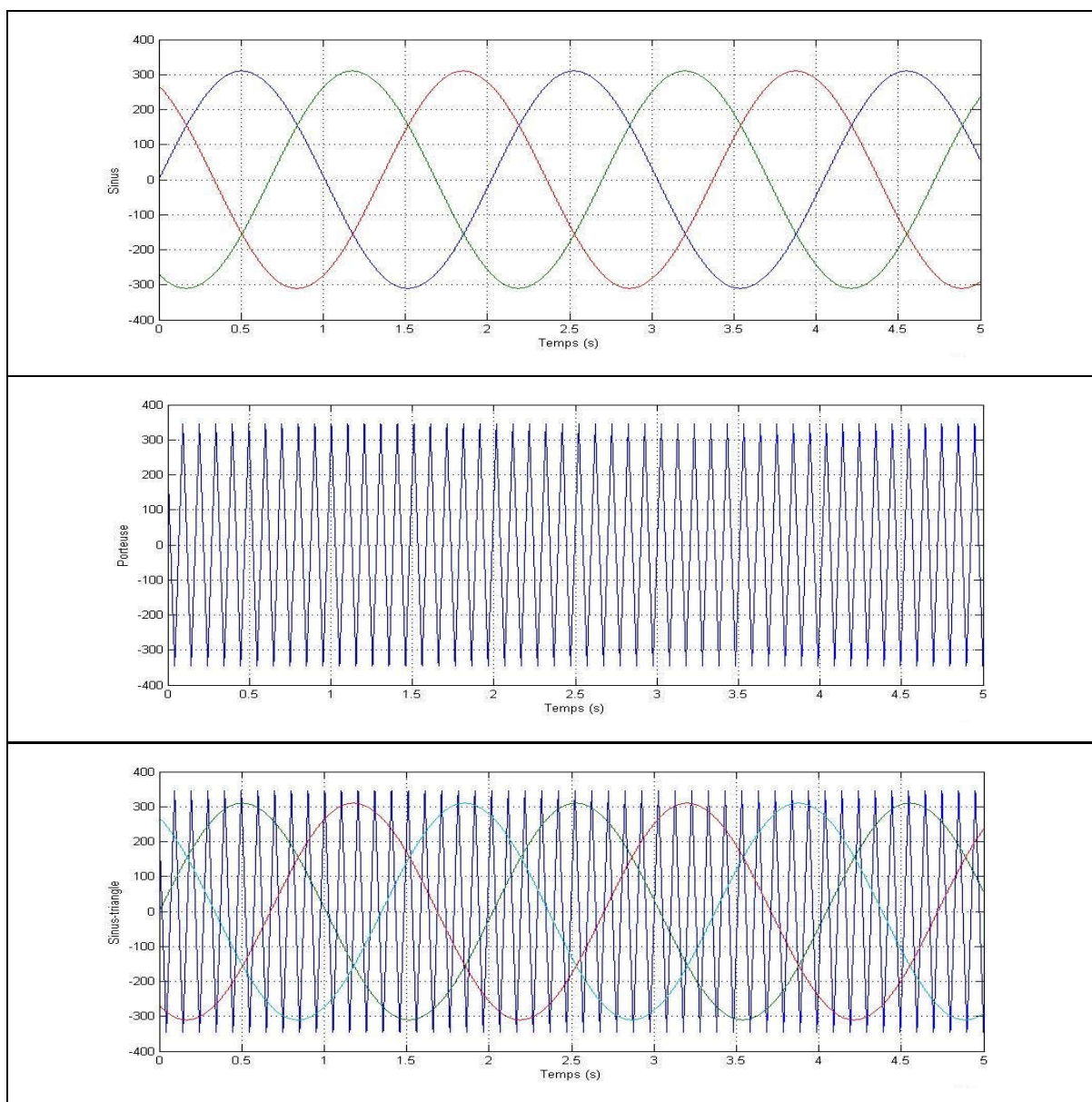
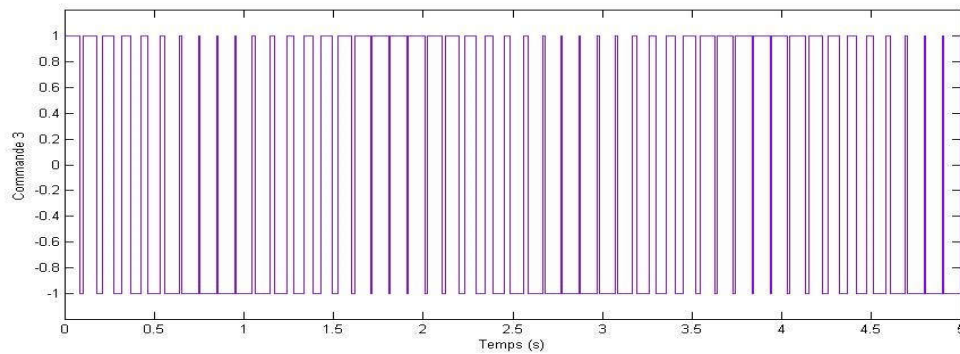
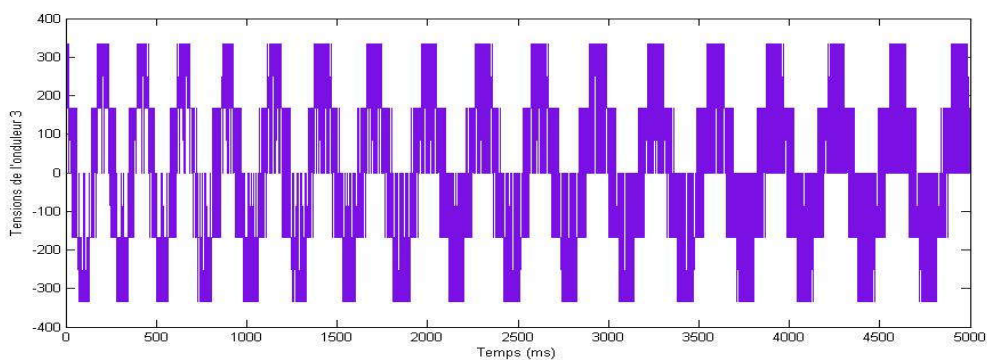


Figure III.12 Principe de la MLI sinus triangle**Figure III.13** : signaux de commande de l'onduleur**Figure III.14** : Tensions simples de l'onduleur

- **Pour la technique de commande vectorielle des puissances active et réactive**

Afin de vérifier le comportement de la commande vectorielle utilisée, Nous avons soumis le système à des échelons de puissance active et réactive, les valeurs et les instants de ces échelons sont come suit :

Échelon de puissance active :

- de 0 à 1s : $P_{ref} = -2KW$
- de 1 à 1.5s : $P_{ref} = -1KW$
- de 1.5 à 2s : $P_{ref} = -3KW$

Échelon de puissance réactive :

- de 0 à 2s : $P_{ref} = 0 \text{ W}$

La tension continu de l'onduleur $U_c = 400\text{V}$

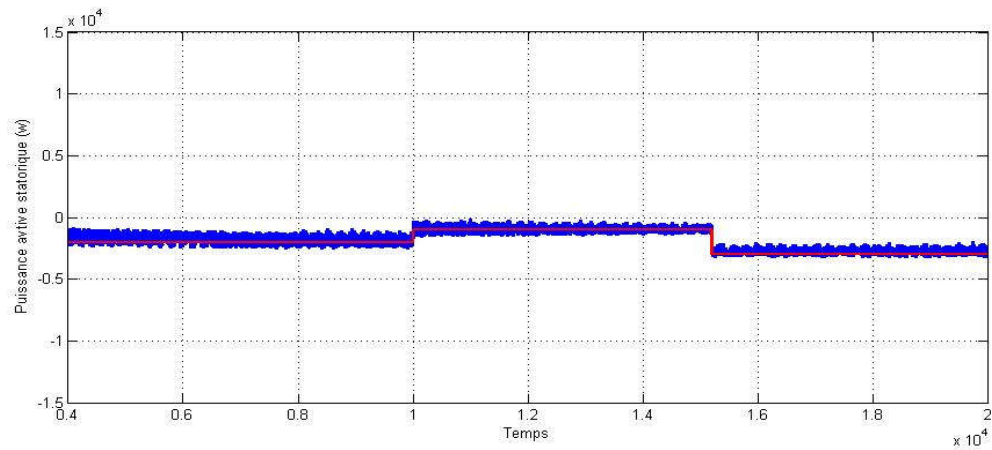


Figure III.15 La puissance active statorique

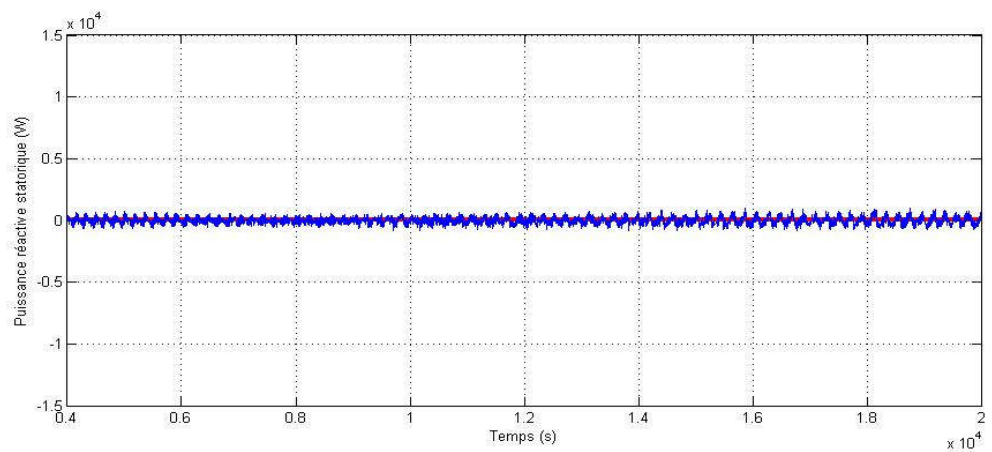
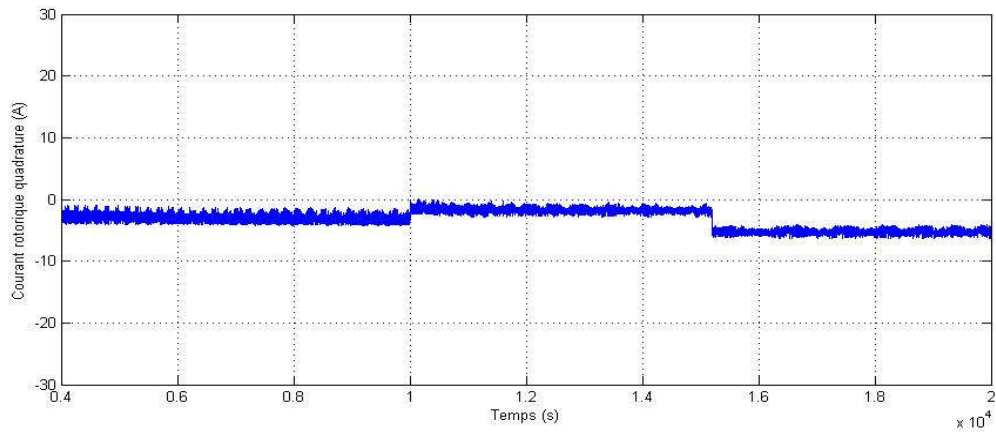
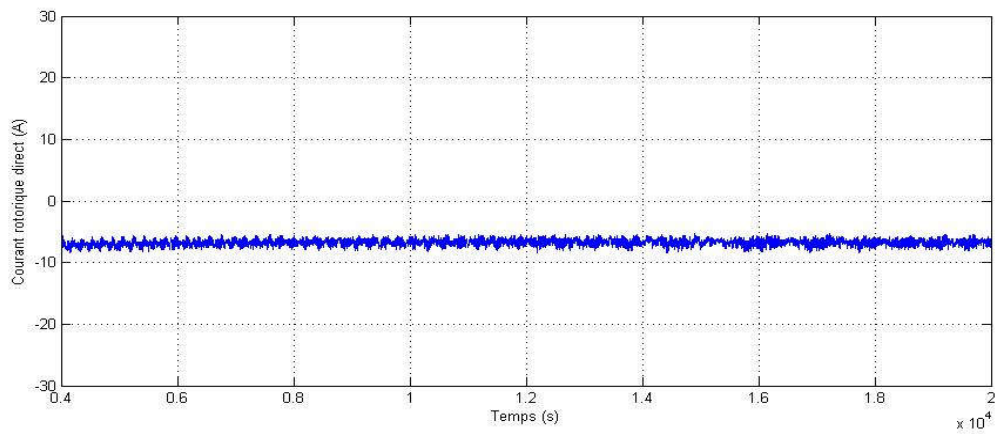
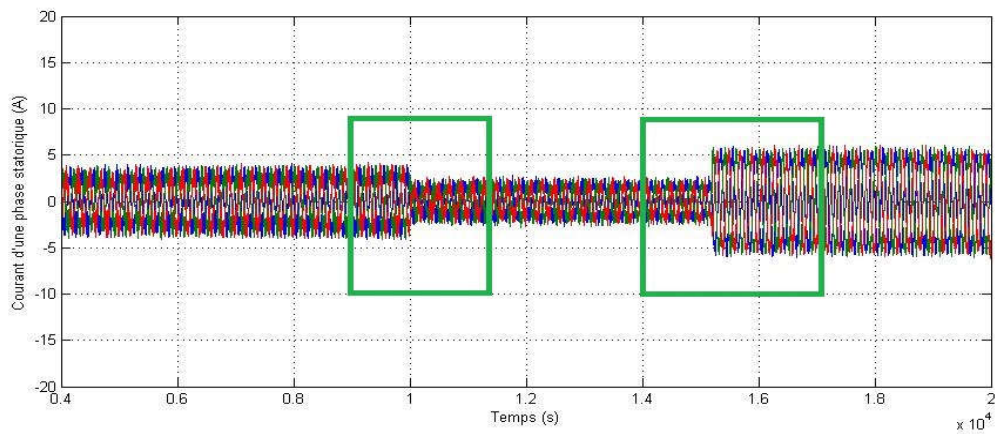


Figure III.16 La puissance réactive statorique

**Figure III.17** Courant rotorique quadrature**Figure III.18** Courant rotorique directe**Figure III.19** Courant d'une phase statorique

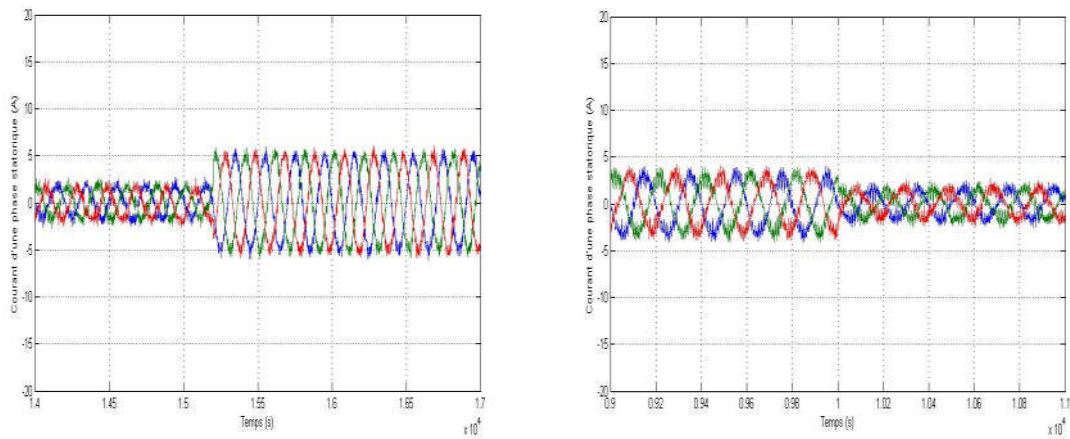


Figure III.20 Courant d'une phase statorique (avec une zoom)

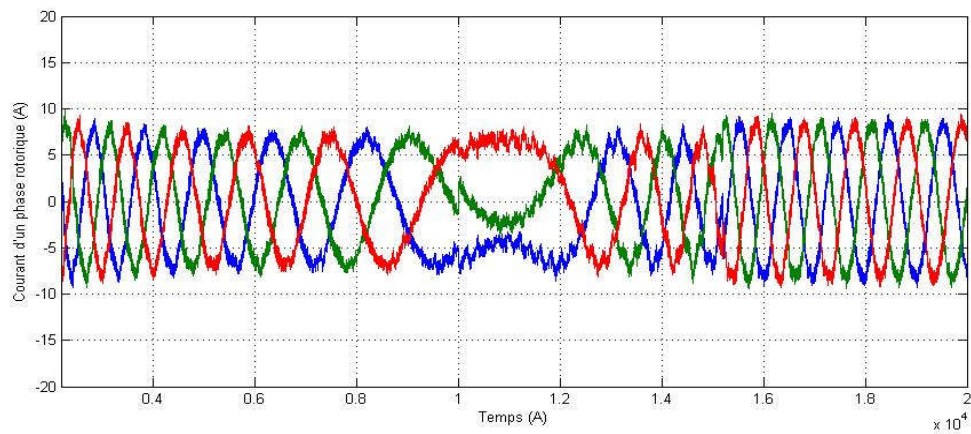


Figure III.21 Courant d'une phase rotorique

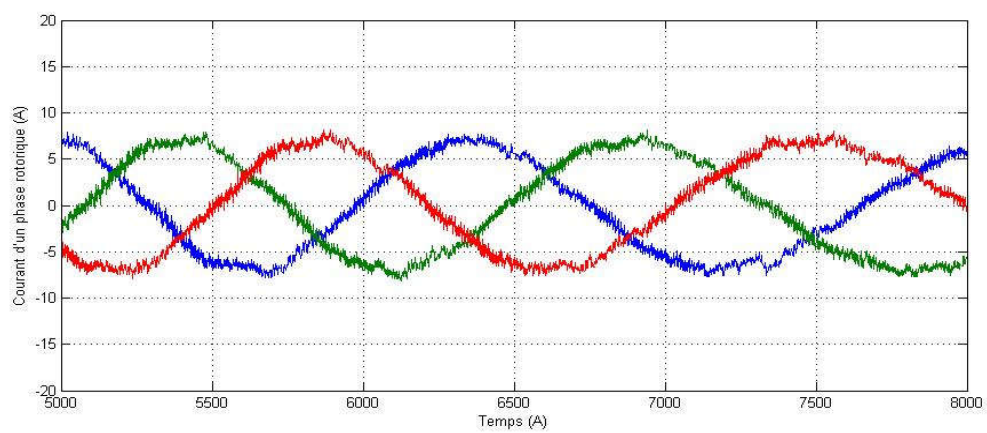


Figure III.22 Courant d'une phase rotorique (avec une zoom)

III.10 Interprétations des résultats :

Les résultats de la simulation présentent les différentes courbes des courants obtenues par la commande de puissance active et réactive générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances actives et réactives statoriques ou autrement dit celle du couple et du flux.

La composante quadrature du courant rotorique I_{qr} contrôle le couple électromagnétique donc la puissance active. La composante directe I_{dr} contrôle le flux et donc la puissance réactive transitée entre le stator et le réseau. Cela est constaté lors des variations des composantes directes et quadrature des courants rotoriques qui sont respectivement les images des puissances réactives et actives.

En ce qui concerne le courant statorique, il est à noter que celui-ci a une forme quasi sinusoïdale pour la commande indirecte avec régulateur PI, et donc pas d'harmoniques dans le stator qui peuvent causer des pertes fer supplémentaires.

- **Pour la technique de commande vectorielle de la vitesse de rotation et de la puissance réactive**

Cet essai consiste à réaliser des échelons de vitesse d'entraînement de la MADA :

- de 0 à 1s : $\Omega_{r_ref} = 1400 \text{ tr/min}$
- de 1 à 2s : $\Omega_{r_ref} = 1450 \text{ tr/min}$

Échelon de puissance réactive :

- de 0 à 2s : $P_{ref} = 0 \text{ W}$

III.10.1 Résultats de simulation

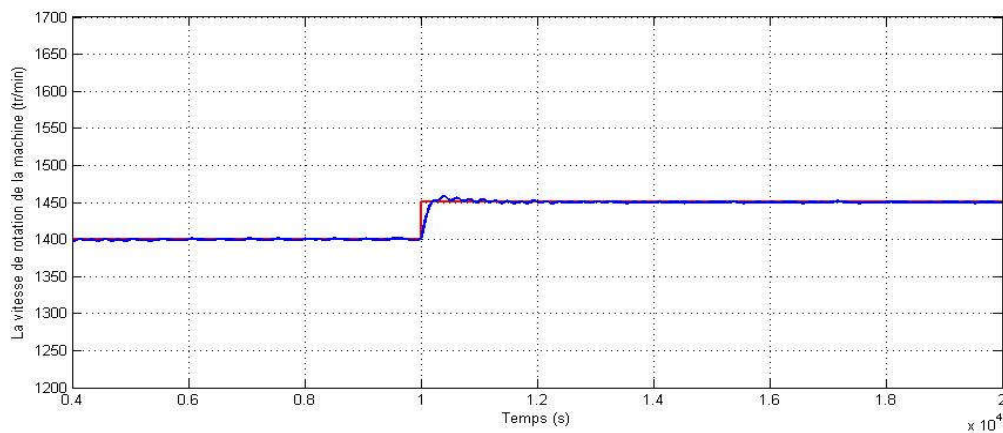


Figure III.24 La vitesse de rotation de la machine

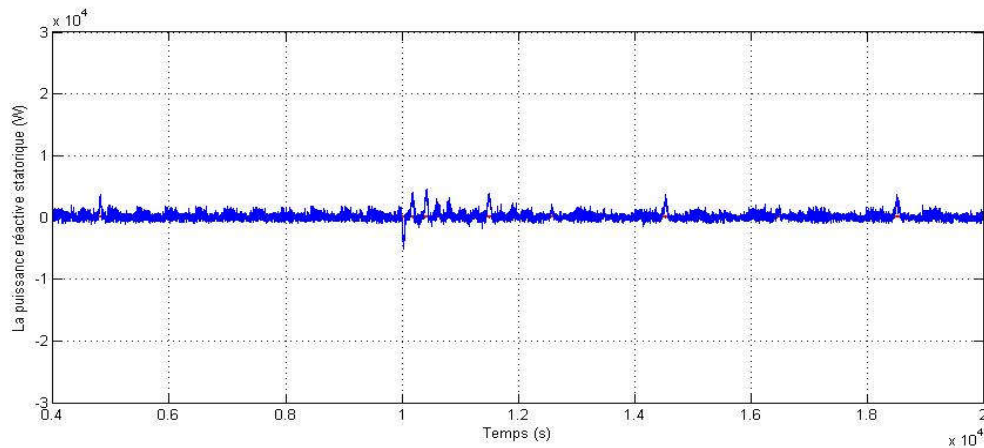


Figure III.25 La puissance réactive statorique

III.10.2 Interprétations des résultats :

Comme le montre la figure III.24, nous avons appliqué une consigne de 1400tr/min, puis elle passe à 1450 tr/min à l'instant 1s. Nous pouvons remarquer que la vitesse de rotation suit bien sa valeur de référence, avec un temps de réponse admissible et un dépassement faible.

Au regard de la figure III.25, il est clair que la puissance réactive statorique mesurée est à sa valeur de référence. Nous constatons aussi, que la variation brusque de la vitesse influe de manière transitoire sur le comportement de la puissance réactive statorique. Mais

dans l'ensemble, la méthode d'asservissement utilisée a permis d'avoir un découplage entre la commande de la vitesse et la commande de la puissance réactive statorique.

III.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la commande vectorielle en puissances active et réactive ainsi que la commande de vitesse de rotation, le convertisseur DC-AC coté rotor a été aussi étudié et modélisé.

Les résultats obtenus, nous permettent de dire que la stratégie de commande utilisée est fiable, et peut être appliquée pour les systèmes de production de l'énergie éolienne à base de la MADA, cette étude sera justifiée dans le chapitre suivant avec l'intégration de la MADA dans la chaîne éolienne.

CHAPITRE IV

ASSERVISSEMENT DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE.

IV .1 Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à sa contrôle.

Puis, à l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

IV .2 Modélisation de la turbine éolienne

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

IV .2.1 Modélisation de la turbine

La figure (VI.1) montre le schéma d'une turbine éolienne.

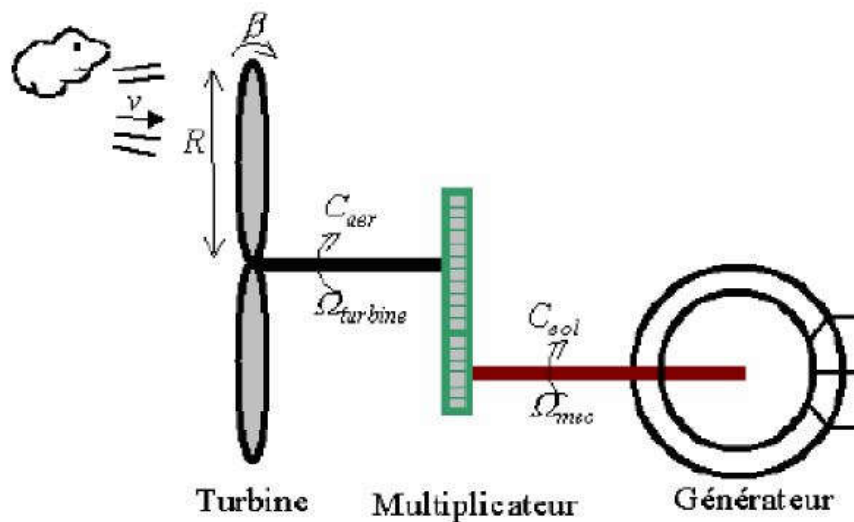


Figure IV.1 Schéma d'une turbine éolienne

La puissance du vent est définie comme suit :

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (\text{IV. 2})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [43], [16] :

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} C_p \frac{\rho S v^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}}$$

Avec :

- C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (\text{IV. 4})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{IV. 5})$$

- λ : est le ratio de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{V_{vent}} \quad (\text{IV. 6})$$

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

Les valeurs des constantes C_1 à C_6 dépendent du type de la turbine et du constructeur. Nous avons dans notre cas : $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 0.21$, et $C_6 = 0.0068$.

Les caractéristiques $C_p - \lambda$ sont obtenus en utilisant les équations (IV.4) et (IV.5) pour différentes valeurs de β comme l'illustre la figure IV.2. La valeur maximale de C_p est atteinte pour λ . Ce ratio de vitesse est défini comme étant la valeur nominale (λ_{nom}).

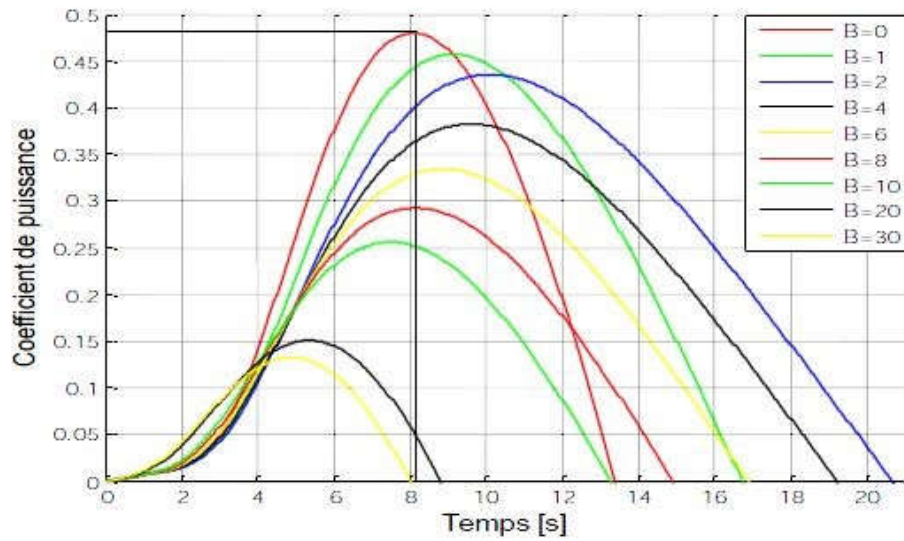


Figure IV.2 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

IV.2.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (IV. 7)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (IV. 8)$$

IV.2.3 Equation dynamique de l'arbre

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

$$j_t \frac{d\Omega_{turbine}}{dt} = \sum des\ couples = C_{mec} \quad (IV.9)$$

j_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{mec} : C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte.

- Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} .
- Le couple de frottement visqueux C_{vis} .

Et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (IV.10)$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (IV.11)$$

IV.2.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

La figure (V.2) montre le schéma bloc du modèle de la turbine [16].

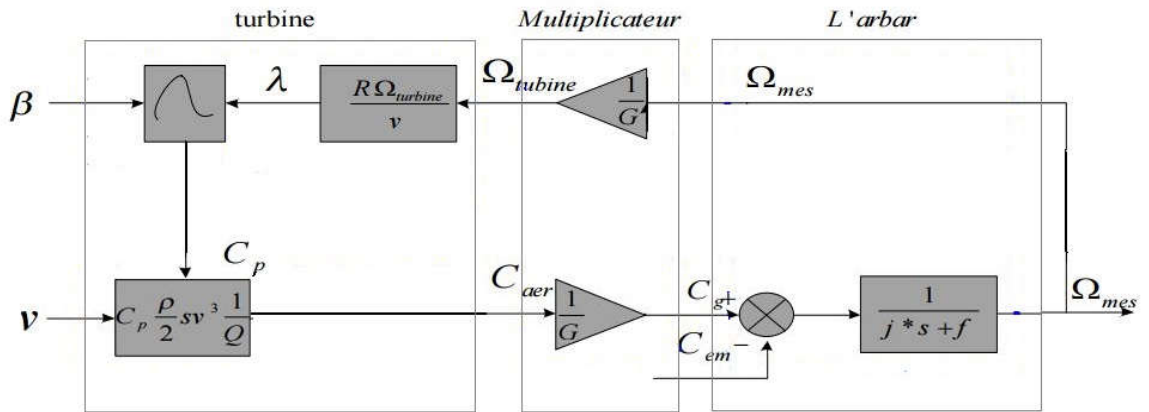


Figure IV.3: Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (V.5)) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

v : La vitesse du vent.

λ : L'angle d'orientation des pales.

$\Omega_{turbine}$: La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur équation (V.6), (V.7).

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées :

- Le couple du multiplicateur
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale
- Le couple électromagnétique de la génératrice

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système

IV.3 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne figure (V.3) :

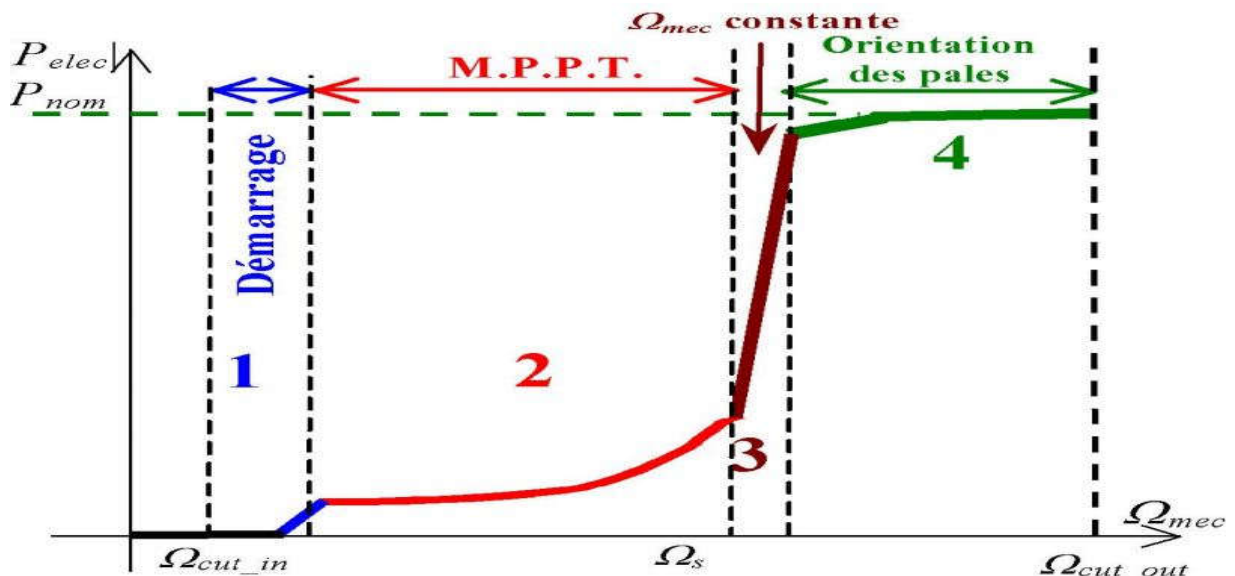


Figure IV.4 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse $\Omega_{dé}$. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal (Coefficient de puissance). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

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

IV.4 Modes de fonctionnement de la turbine

Les turbines à vitesse variable à régulateur pitch peuvent fonctionnées dans trois modes différents, selon la vitesse du vent disponible, et la puissance demandée de la turbine éolienne

IV.4.1 maximisation de la puissance excrète MPPT

A partir de la figure IV.2, nous pouvons remarqué que pour $\beta = 0^\circ$, $\lambda_{opt} = 8.1$ et $C_{p_max} = 0.48$. Dans ce cas, le couple mécanique tiré du vent est donné par expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \quad (IV. 12)$$

En utilisant les équations (IV.3) et (IV.4), nous avons :

$$C_{aer} = \frac{1}{2\Omega_{turbine_estimée}} \rho \pi R^2 v_{vent}^3 C_p = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V_{vent}^2 C_p \quad (IV.13)$$

Sachant que dans ce mode ; $C_p = C_{p_max} = constant$, de (IV.3) nous pouvons écrire :

$$P_{aer} = K v_{vent}^3 \quad (IV.14)$$

$$\text{Ou } K = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p_max} = \text{constant} \quad (IV.15)$$

Cette dernière équation nous ramène à dire que, si le générateur éolien tourne à une vitesse qui correspond à la vitesse du vent v_{cent} d'une manière à ce que la turbine fonctionne au point de puissance maximale (comme le montre la figure IV.2). Donc, il permet ainsi d'extraire la puissance maximale disponible.

L'algorithme MPPT permet donc de suivre le point maximum de puissance, dans une certaine plage de vitesse du vent tout en gardant un coefficient de performance maximale C_{p_max} .

IV.4.2 Fonctionnement à puissance maximale (commande par angle pitch)

Quand la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, le couple électromagnétique n'est pas suffisant pour contrôler la vitesse du rotor, car cela surcharge le générateur et les convertisseurs. Pour éviter que la vitesse rotorique du générateur devienne très élevée, la puissance extraite du vent doit être limitée. Cette opération peut être effectuée par la réduction du coefficient de performance de la turbine C_p . Comme il est expliqué auparavant, la valeur de C_p peut être manipulée par le changement de l'angle d'orientation des pales (angle pitch). Varier l'angle pitch veut dire faire tourner faiblement les pales de la turbine.

Dans cet algorithme, la vitesse du vent est variable, et la vitesse de la turbine est maintenue à sa valeur nominale ($\Omega_t = \Omega_{t_nominal}$), et λ correspondant est calculé en utilisant l'équation (IV.19). La puissance de sortie de la turbine est maintenue à sa valeur nominale

($P_{aer} = P_{aer_nominal}$). Le C_p correspondant à la puissance nominale est calculé par l'équation (IV.19). La valeur de l'angle de pitch β est obtenue par la résolution de l'équation non-linéaire $C_p(\lambda_{pitch}, \beta) = C_{p_pitch}$.

$$\begin{cases} \lambda_{pitch} = \frac{\Omega_{tur_nominale} R}{v_{cent}} \\ C_{p_pitch} = \frac{P_{aer_nominale}}{0.5 \rho \pi R^2 v_{vent}^3} \end{cases} \quad (IV. 16)$$

IV.4.3 limitation de puissance (puissance contrôlée)

Dans la pratique, il n'est pas toujours possible de faire fonctionner la turbine éolienne en mode MPPT, ou en mode puissance maximale seulement. Dans plusieurs cas, la puissance générée ne doit pas dépasser une limite prédéfinie. Ainsi dans cette condition, la turbine à vitesse variable à angle pitch variable doit fonctionner dans le mode puissance limitée.

Si la vitesse du vent est inférieure à la valeur nominale, l'angle pitch est toujours maintenu à zéro ($\beta = 0$), et λ est variable. Ensuite, nous calculons la valeur de C_p correspondant comme dans l'équation (IV.20). Sachant que C_p est limité à C_{p_max} , ainsi si la puissance disponible est inférieure à la puissance demandée, nous restons dans le mode MPP ($C_p = C_{p_max}$), sinon la puissance sera limitée et par conséquent, C_p sera réduit. λ est déterminée par la résolution de l'équation non-linéaire $C_p(\lambda, 0) = C_{p_lim}$. La vitesse de la turbine est par la suite calculée selon la puissance demandée P par l'équation (IV.20).

$$\begin{aligned} C_{p_lim} &= \frac{P}{0.5 \rho \pi R^2 v_{vent}^3} \\ \Omega_{turb_lim} &= \frac{\lambda v_{vent}}{R} \end{aligned} \quad (IV. 3)$$

Pour différents valeurs de la limite de puissance P , la vitesse rotorique du générateur peut prendre parfois deux valeurs, qui permettent de générer la même puissance P à partir de la turbine. Dans ce cas, l'algorithme développé choisit la vitesse du générateur la plus proche de la vitesse de fonctionnement précédente. Ainsi, l'algorithme va permettre de minimiser la période transitoire et améliorer le fonctionnement de la machine.

Si la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale, alors la vitesse de la turbine est maintenue à sa valeur nominale ($\Omega_{turb} = \Omega_{turb_nominale}$), et la vitesse du vent est variable. λ correspondant est calculé, ainsi que C_p qui dépend de la limite de puissance P (équation IV.21). l'angle pitch β est déterminé en résolvant l'équation non-linéaire $C_p(\lambda_{lim}, \beta) = C_{p_lim}$

$$\lambda_{lim} = \frac{\Omega_{tur_nominale} R}{v_{vent}} \quad (IV. 3)$$

$$C_{p_lim} = \frac{P}{0.5\rho\pi R^2 v_{vent}^3} \quad (IV. 3)$$

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent.

La majorité des éoliennes ont été réalisés à vitesse constante. Par la suite, le nombre des éoliennes de vitesse variable installé dans les parcs éoliens a augmenté. Nous notons que le l'efficacité énergétique des éoliennes à vitesse variable est largement améliorée par rapport à ceux avec une vitesse fixe. Les performances de ces deux structures sont évaluées par un travail de simulation, à montrer l'avantage de la MPPT par rapport la turbine.

IV.5 Résultats de la simulation :

Simulation : comportement de notre turbine pour β ($\beta=0$) fixée avec V_{vent} variable. Pour la simulation de la turbine éolienne on considère la simulation de la turbine avec MPPT, c'est à dire comportement de notre turbine β fixée et vitesse du vent variable (figure II.24) Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous :

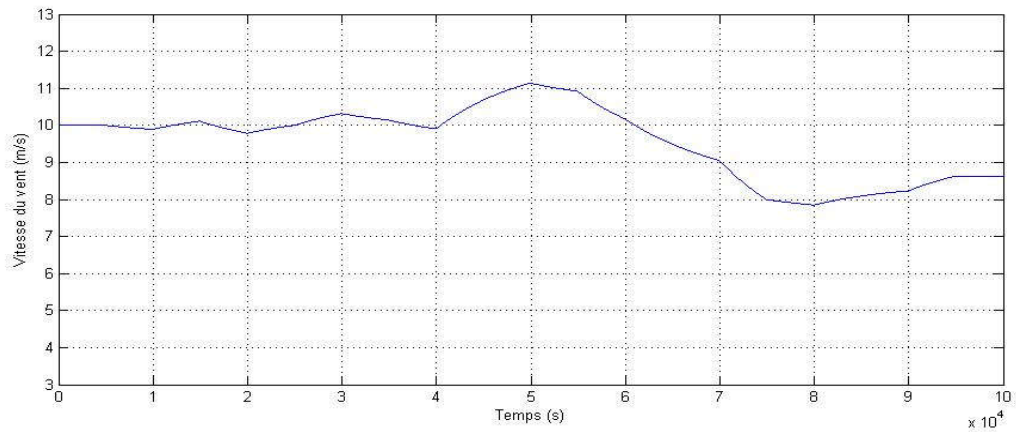
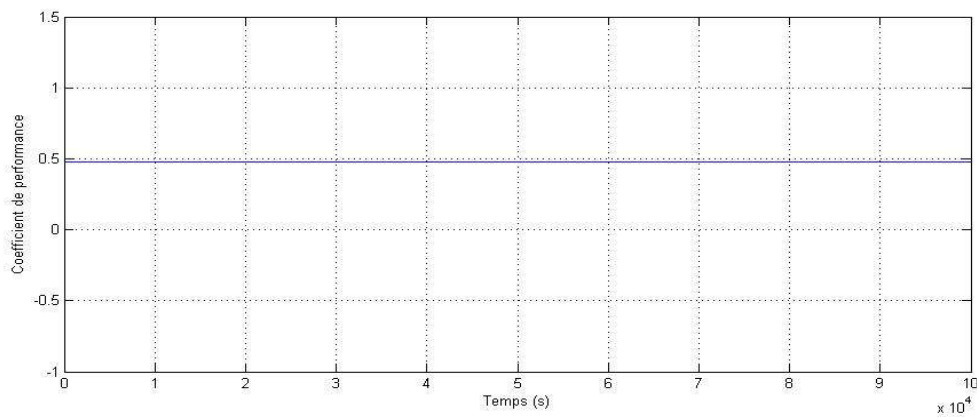


Figure IV.5 Vitesse du vent en fonction du temps.

La figure (II.18) montre la variation de la vitesse du vent en fonction d



u temps, la vitesse du vent varie entre (7.9 et 11.2 m/s)

Figure IV.6 : coefficient de puissance C_p de la turbine

La figure (II.25) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps, pour un une vitesse du vent variable et β fixée, le coefficient C_p prend toujours une valeur constant $C_p=0.48$

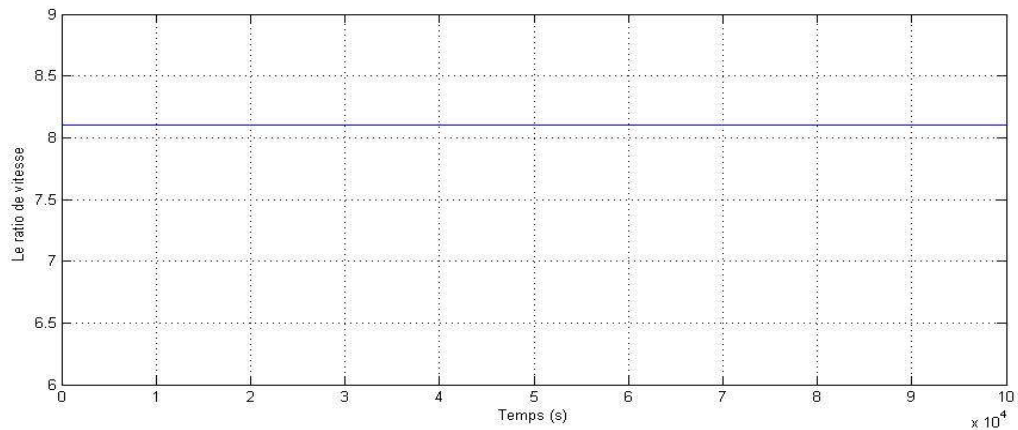


Figure IV.7 : coefficient λ de la turbine

La figure (II.20) montre l'évolution du coefficient λ en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable ; l'allure de la courbe est constante de la valeur ($\lambda=8.1$).

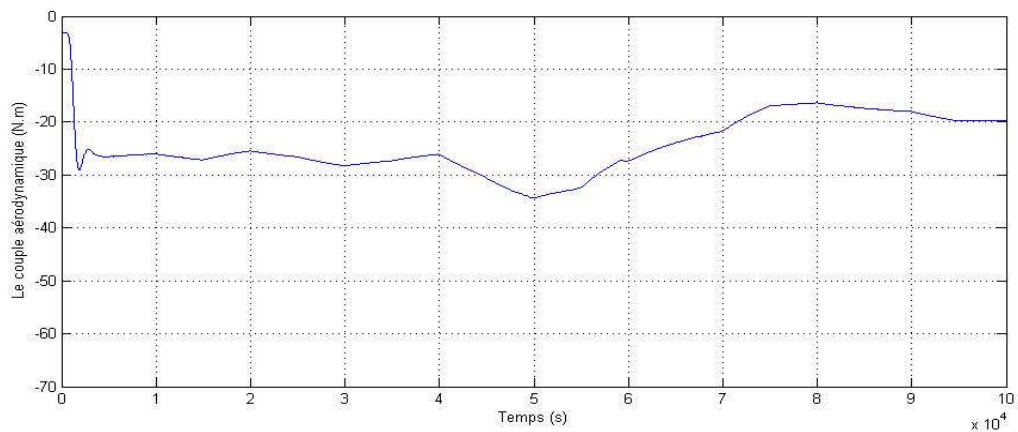


Figure IV.8 : couple mécanique de la turbine (N.m)

La figure (II.27) montre l'évolution de la couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et β variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ $[0 -35]$ ce qui montre clairement la perturbation que crée le MPPT sur le couple mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.

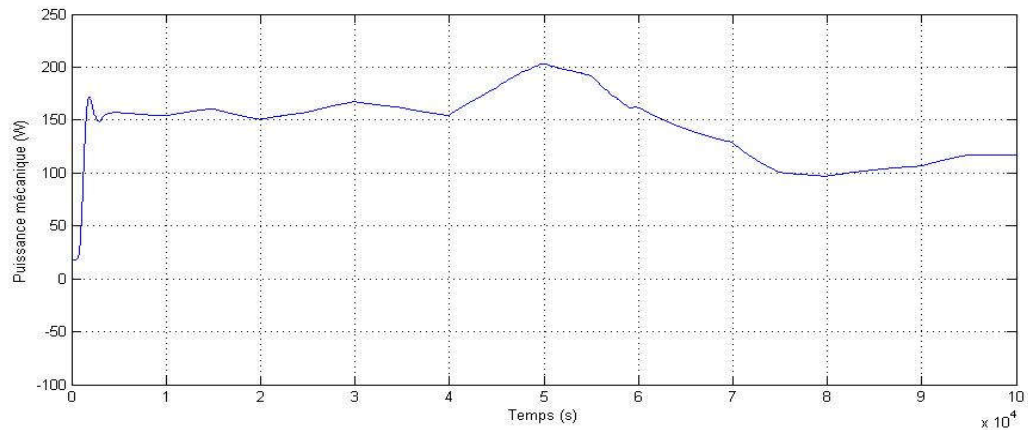


Figure IV.9 : puissance mécanique de la turbine

La figure (II.22) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [20 200] ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la puissance mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.

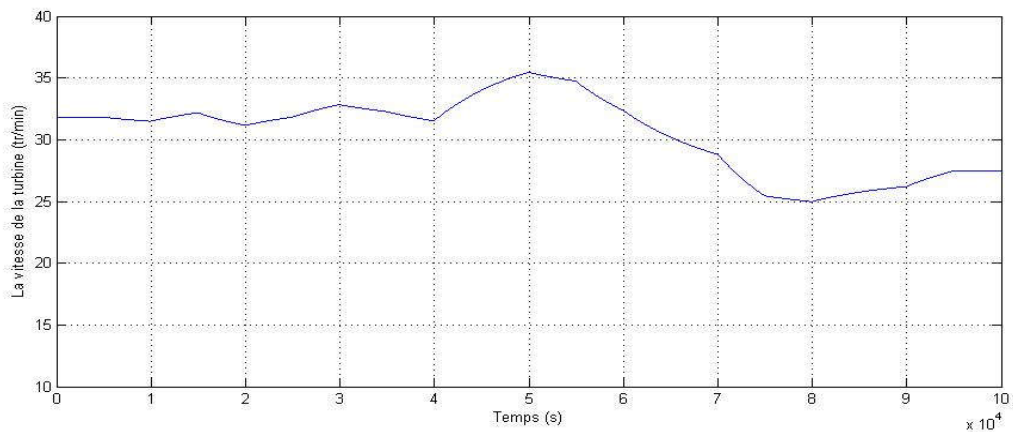
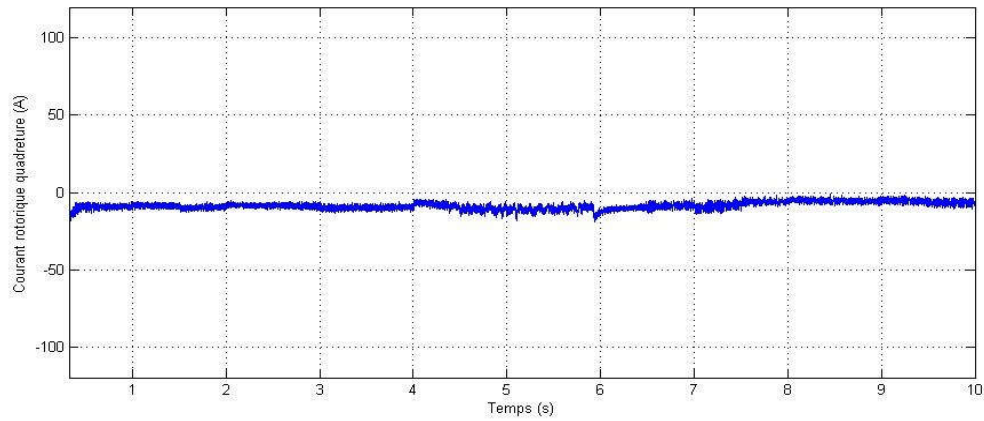
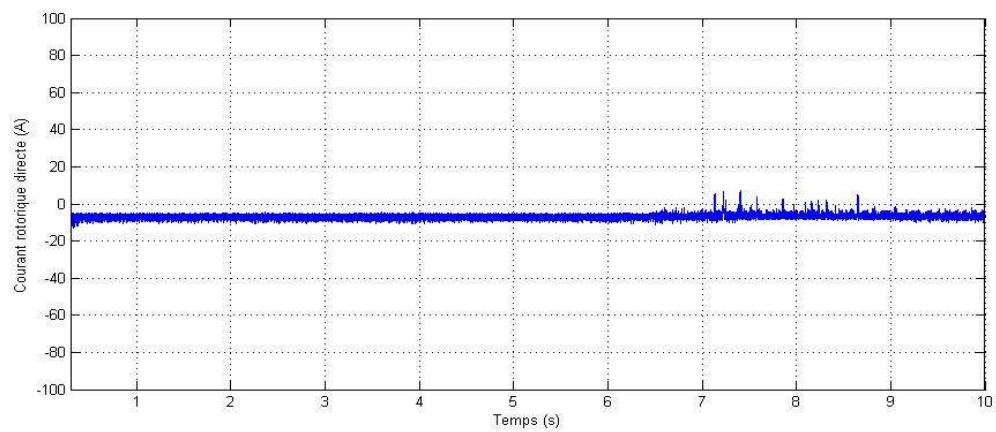
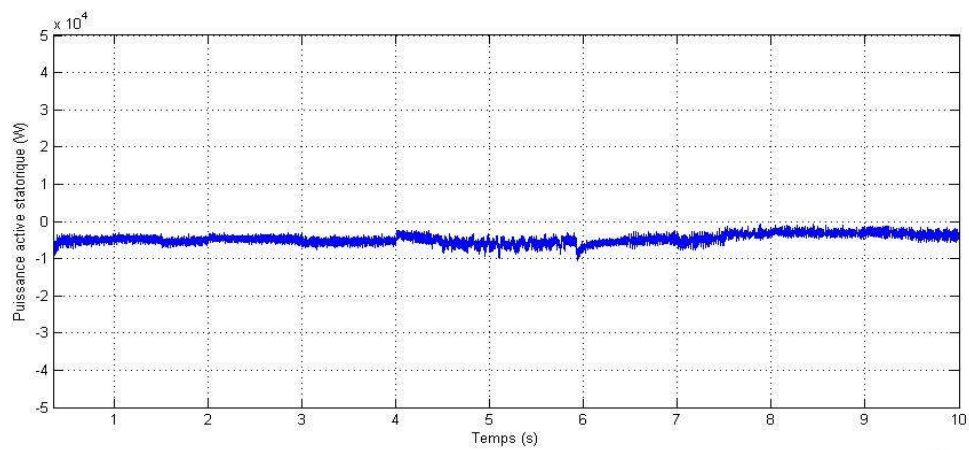


Figure IV.10 : vitesse de rotation de la turbine.

La figure (II.28) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour une vitesse du vent variable et β constant, vitesse de rotation de la turbine prend toujours une forme d'allure variable, il se met à varier entre autour de la valeur 25 et 35 ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur vitesse de rotation de la turbine.

**Figure IV.11** Courant rotorique quadrature**Figure IV.12** Courant rotorique direct**Figure IV.13** la puissance active statorique

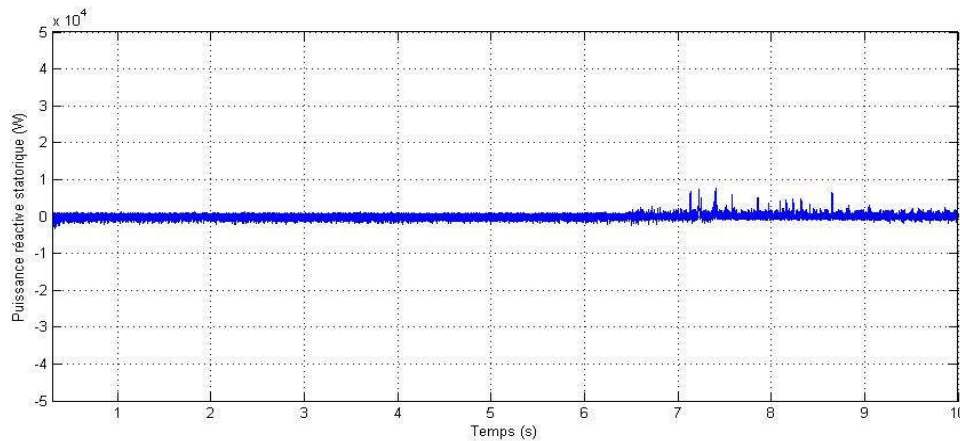


Figure IV.14 la puissance active statorique

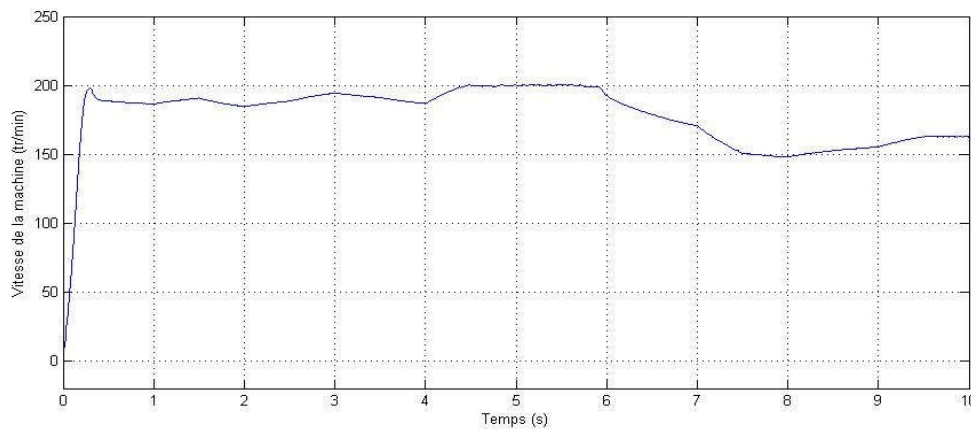


Figure IV.15 Vitesse de la machine

La puissance active suit bien le courant rotorique quadrature (les figure IV.11 et IV.13) et la puissance réactive suit bien sa référence nulle comme le courant rotorique directe (les figure IV.12 et IV.14) par ce que la puissance active indépendant pour le courant rotorique quadrature et la puissance réactive indépendant pour le courant rotorique directe et la figure IV.15 représenter la vitesse de la machine asynchrone double alimentation relié avec la turbine éolienne cette figure aussi il prend presque la même forme de la figure de la vitesse du vent.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre il a été établi une modélisation des différents constituants de la turbine.

Ceci nous a permis d'instaurer un modèle global composé de celui de l'aérogénérateur, de la liaison mécanique et de la MADA.

A partir de ce modèle, un émulateur éolien a été mis en oeuvre. Il nous a permis de vérifier la capacité d'intégration de la MADA dans un système éolien. Nous avons pu donc obtenir des résultats probants.

Ainsi, nous avons constaté que la MADA est capable d'assurer, par son fonctionnement à vitesse variable, un rendement proche de celui du maximum théorique MPPT. Ceci a été observé à travers l'évolution du coefficient de puissance en fonction du temps.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion général

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation « alimentation et commande », et l'étude de l'interaction de ces machines avec le réseau de distribution. Pour ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur l'éolienne et l'étude de vent plus les différents types d'éolienne et leurs utilisations. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation était l'objectif du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine asynchrone double alimentation étudiées nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink nous confirment la validité du modèle linéaire pour l'application envisagée de la machine plus les résultats de simulation très validité. Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA. Pour cela, on applique le contrôle indépendant des puissances actives et réactives statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans la quelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques afin d'envisager un pilotage de la machine par le rotor. Suivant la prise en compte des couplages entre les axes ou non, trois méthodes ont étaient considérées. La comparaison des résultats de simulation de ces trois méthodes en termes de suivi de consigne et de robustesse a permis de dévoiler la méthode qui sera retenue, et présenter la modélisation des éléments de la chaîne éolienne en mode connecté au réseau constitué d'une machine asynchrone à double alimentation, pilotée par le rotor via le convertisseur MLI.

Et dans Le dernier chapitre on intégrée la MADA dans un système éolien, la modélisation de la turbine a été présentée. Un algorithme de puissance excrète MPPT de la puissance captée du vent a été mis en œuvre, ou on a supposé que la vitesse du vent varie légèrement au régime permanent. Le fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent été illustrée et la puissance est effectivement maximisé.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne, l'alimentation et la commande d'une machine asynchrone à double alimentation et l'apport qu'elle pourra porter son application dans une chaîne de conversion éolienne. Après avoir présenté un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a été présentée, ainsi nous avons appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques. Ensuite nous sommes intéressés à des cascades basées sur une machine asynchrone à double alimentation et des convertisseurs. Les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances de l'application de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine éolien.

Annexe : Paramètres du système

1 Paramètres de la MADA :

1. Valeurs nominales :

4 kW, 220 / 380 – 50Hz.

15/8.6A, 1440 tr/min.

2. Paramètres de la MADA :

☐ Résistance statorique : $R_s = 1.2\Omega$.

☐ Résistance rotorique : $R_r = 1.8\Omega$.

☐ Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.1554H$.

☐ Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.1568H$.

☐ Inductance cyclique mutuelle : $L_m = 0.15H$.

☐ Le nombre de paires de pôles est : $p = 2$.

2 Constantes mécaniques de la MADA :

☐ Moment d'inertie : $J_{mach} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.

☐ Coefficient de frottement visqueux : $f_r = 0.001 \text{ N.m.s / rd}$.

2 Paramètres de la Turbine éolienne :

Puissance nominale	5kW
Rayon des pales	3 m
Nombre de pales	3
Vitesse de vent Min/max	3/20 m/s
Vitesse de vent nominale	10 m/s
Rapport de multiplication	11.25

Angle de pitch

0deg

Densité de l'air

1.025 kg/m³

Références :

- [1] A.MERICKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] D.BENACHOUR, El Watan, 30 novembre 2006.
- [3] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [4] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [5] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [6] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la generation éolienne", JCGE'03, 5 et 6 juin 2003, Saint-Nazaire, pp. 141-145.
- [7] D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.
- [8] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [9] K. Eftichios, K. Kostas, "Design of a maximum power tracking system for windenergy-conversion applications", IEEE Transaction on industrial electronics, vol. 53, no, pp. 486-494, April 2006.
- [10] G. Lalor, A. Mullane, M. Malley, "Frequency control and wind turbine technologies", IEEE Transaction on power system, vol. 20, no. 4, pp. 1905-1913, November 2005.
- [11] U. Leeton, U. Kwannetr, T. Kulworawanichpong, "Power Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Particle Swarm Optimization", International Conference on Electrical Engineering, Electronics Computer Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), 2010.

[12] V. ROGEZ, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004.

[13] LIUCHEN CHANG. « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - Summer / Été 2002

[14]. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2002

[15]. E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition. Berlin, Germany: Springer, 2006

[16]. S. Heier, Grid integration of wind energy conversion systems, 2nd edition. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2006.

[17]. S. Heier, Grid integration of wind energy conversion systems, edition. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2006.

[18]. Hugo. Eduardo. Mena. Lopez, Maximum power tracking control scheme for wind generator systems, 2007

[19]. Z. Lubosny, Wind turbine operation in electric power systems, Berlin, Germany: Springer, 2003. [17]. S. N. Bhadra, D. Kastha, S. Banerjee, Wind Electrical Systems, Oxford, UK: Oxford University Press, 2005.

[20] FREDERIC POITIERS, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes 19-12 -2003.

[21] OMAR BOUHALI, « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.

[22] S.EL-AIMANI. « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[23] F. POITIERS, « Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation », sixième conférence des jeunes chercheurs en génie électrique JCGE'03, SaintNazaire, 5 et 6 juin 2003.

[24] **P-E. Vidal**, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double Alimentation »
Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse ,France, 2004.

[25] **A. Doria-Cerezo**, « Modeling, simulation and control of a doubly-fed induction machine
cont-rolled by a back-to-back converter », PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, 2006.

[26] G. Salloum, "Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation" , Thèse de Doctorat , ENSEEIHT de Toulouse, 2007.

[27] A. Khirnass, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue d'une application pour la Conversion de l'Énergie Éolienne : Étude et réalisation", Thèse de Magistère, EMP d'Alger, 2010 .

[28] **A.E. DENDOUGA**, «Controle des puissances active et reactive de la machine à double alimentation (DFIM)», Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.

[29] **B. Hopfenspeger et D.J. Atkinson**, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras, 2001.

[30] **S. Tnani**, «Contribution à l'étude et la commande de la machine généralisée», thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté, octobre 1995.

[31] **S. Gusia**, «Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI: Application aux actionnements électriques», Thèse de Doctorat, Université catholique de Louvain, France, 2005.

- [32] B. Hamane, "Contrôle robuste d'aérogénérateur". Mémoire de magister, 2012, Université d'Oran, Algérie.
- [33] N. Akkari, "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation". Thèse de doctorat, 2010, Université de Batna, Algérie.
- [34] S. Khojet El Khil, "Commande Vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)". Thèse de doctorat, 2006, Institut national polytechnique de Toulouse, France.
- [35] L. Benalia, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentés". Thèse de doctorat, 2010, Université de Batna, Algérie.
- [36] L. Baghli, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", Cours, UFM de Lorraine-UHP université Henri Poincaré Nancy1, France, 2005.
- [37] **A. ZEMMIT** «Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA)», mémoire Master de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie, Juin 2013.
- [38] **F. Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [39] **B. Hopfenspeger et D.J. Atkinson**, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras, 2001.
- [40] **S. Drid**, « 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 et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [41] **A. Boyette**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11, France, 2006.
- [42] **B. Hopfenspeger et D.J. Atkinson**, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras, 2001.
- [43] **Y. Bekakra, D. Ben attous**, « Sliding Mode Control of Doubly Fed Induction Machine », Proceedings of 3rd International Conference on Electrical Engineering Design and

Technologies (ICEEDT'09), Oct. 31 – Nov. 02, 2009, Soussa, Tunisia.

[44] **N. Akkari**, « Commande adaptative de la machine asynchrone à double alimentation par des

sources de tension », Thèse de magister de l'université de Batna, 2005.

[18] Y. Djeriri, "Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien".

Mémoire de magister, 2009, Université de Sidi Bel. Abbés, Algérie.

[45] Y. Albia, "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté". Mémoire de magister, 2009, université de Batna, Algérie.

[46] Thomas Ackermann « Wind Power in Power Systems » John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

[47] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ?, » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7

[48] S. METATLA ; « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire de magister, ENP, el Harrach 2009.