

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Optimisation d'un système de conversion
éolienne basé sur la MADA**

Présenté par :

Awad Riyad AL-massrir

Soutenu le : 01 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Dr. Mahdad Belkacem

M.C.A

Président

Dr. Abdeddaim Sabrina

M.C.B

Encadreur

Mr. Messaoud Mohammedi

M.A.A

Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Optimisation d'un système de conversion éolienne basé
sur la MADA**

Présenté par :

Awad Riyad AL-massri

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. Abdeddaim Sabrina

signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Mahdad Belkacem

Signature

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Thème :

Optimisation d'un système de conversion éolienne basé sur la MADA

Proposé par : Awad Riyad AL-massri
Dirigé par : Dr. Abdeddaim Sabrina

Résumé

Pour un développement écologique et économique, les sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, constitue actuellement une bonne alternative sur des sources classiques d'énergie. Le présent travail traite une étude, modélisation, et simulation d'optimisation d'un système de conversion éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation connecté au réseau.

Pour ce but, on a présenté des généralités sur les systèmes éoliens, puis une modélisation de chaque composant de l'aérogénérateur (turbine, MADA, redresseur et onduleur). Le rotor alimenté par l'onduleur commandé par la modulation de largeur d'impulsion MLI.

Pour assurer un fonctionnement optimal de la génératrice éolienne, on a utilisé un algorithme MPPT avec la commande en vitesse et une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse de régulateurs PI. Les résultats extraits par la simulation numérique Matlab/SIMULINK.

Mots clés:

Eolien, Machine asynchrone à double alimentation (MADA), modélisation, onduleur, commande vectorielle.

ملخص

من أجل تنمية بيئية و اقتصادية. تشكل حاليا مصادر الطاقة المتجددة، و خاصة طاقة الرياح بديلا جيدا لمصادر الطاقة التقليدية. يقدم هذا العمل دراسة ، نمذجة و محاكاة تحسين نظام تحويل طاقة الرياح على أساس الألة الغير تزامنية ثنائية التغذية المتصلة بالشبكة.

من أجل ذلك قمنا بتقديم عموميات حول أنظمة الرياح، ثم قمنا بعمل نموذج لكل مكون من مكونات توربين الرياح (التوربين ، MADA ، المموج و المقوم). تغذية العضو الدوار كانت عن طريق المموج المتحكم فيه بتقنية تعديل عرض النبضة.

لضمان التشغيل الأمثل لمولد طاقة الرياح، تم استخدام خوارزمية MPPT مع التحكم بالسرعة و التحكم الشعاعي والذي يسمح بدوره بالتحكم في الطاقة الفعالة و الطاقة الرجعية عن طريق استخدام المصححات (المعدلات) PI ، كما قمنا بعرض وتحليل النتائج المتحصل عليها عن طريق المحاكاة الرقمية / ماتلاب .

كلمات مفتاحية :

توربينات الرياح ، الألة الغير تزامنية ثنائية التغذية ، نمذجة ، مموج ، تحكم اشعاعي .

Sommaire

الشكر

الإهداء

Nomenclature

Acronymes

Liste des figures

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre 1: Généralités sur les systèmes éoliens

1.1	Introduction	3
1.2	Historique de l'éolien	4
1.3	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	6
1.3.1	Les avantages de l'énergie éolienne	6
1.3.2	Inconvénients de l'énergie éolienne	7
1.4	Les types d'éoliennes	7
1.4.1	Eoliennes à axe vertical	8
1.4.2	Eoliennes à axe horizontal	9
1.4.2.1	Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal	9
1.4.3	Les différentes technologies d'éoliennes	11
1.4.3.1	Les éoliennes à vitesse fixe	11
1.4.3.1.1	Les avantages d'éoliennes à vitesse fixe	11
1.4.3.1.2	Les inconvénients d'éoliennes à vitesse fixe	11
1.4.3.2	Les éoliennes à vitesse variable	11
1.4.3.2.1	Les avantages d'éoliennes à vitesse variable	11
1.4.3.2.2	Les inconvénients d'éoliennes à vitesse variable	11
1.5	Principe de fonctionnement d'une éolienne	12
1.5.1	Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	12
1.5.2	Bilan des forces sur une pale	14
1.5.3	Systèmes de régulation de la puissance de l'éolienne	15

1.5.3.1	Système à décrochage aérodynamique "Stall"	15
1.5.3.2	Système d'orientation des pales "pitch"	16
1.6	Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur	17
1.6.1	Machine synchrone	17
1.6.2	Machine asynchrone	18
1.6.2.1	Machine asynchrone à cage	18
1.6.2.2	Machine asynchrone à rotor bobiné	18
1.7	Eolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	18
1.7.1	Structure de la MADA	19
1.7.2	Modes de fonctionnement de la MADA.	20
1.7.3	Intérêt de la MADA	21
1.8	Conclusion	21

Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

2.1	Introduction	22
2.2	Modèle de la turbine	22
2.3	Modèle de l'arbre mécanique	24
2.4	Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA)	25
2.4.1	Hypothèses	25
2.4.2	Modèle mathématique de la MADA	26
2.4.3	Transformation de Park	27
2.4.3.1	Le choix du référentiel	28
2.5	Modélisation des convertisseurs statiques	31
2.5.1	Modélisation de l'onduleur côté rotor de la MADA (CCM)	31
2.5.1.1	La commande MLI d'onduleur	32
2.5.2	Modélisation du redresseur côté réseau (CCR)	33
2.6	Conclusion	34

Chapitre 3 : Commande de la chaîne de conversion éolienne

3.1	Introduction	35
3.2	Caractéristiques puissance-vitesse de l'éolienne	36

3.3	Techniques d'extraction du maximum de la puissance	37
3.3.1	Algorithmes MPPT classiques	37
3.3.1.1	MPPT avec commande en vitesse	38
3.4	La commande vectorielle de la MADA	39
3.4.1	Principe de la commande vectorielle	39
3.4.2	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	40
3.4.3	Contrôle indépendant des puissances actives et réactives	43
3.4.3.1	Commande indirecte	43
3.4.4	Le calcul des paramètres du régulateur PI	44
3.5	Conclusion	46

Chapitre 4 : Simulation de la chaîne de conversion éolienne

4.1	Introduction	47
4.2	Simulation de la commande indirecte sans régulateur de puissance	47
4.2.1	Résultats de simulation sans onduleur	48
4.2.2	Résultats de simulation avec onduleur	50
4.2.3	Interprétation des résultats	51
4.3	Simulation de la chaîne de conversion éolienne	52
4.3.1	Résultats de simulation	52
4.3.1.1	Résultats de simulation avec vitesse de vent fixe	53
4.3.1.2	Résultats de simulation avec un profil de vent	56
4.4	Conclusion	61
	Conclusion générale	62
	Références Bibliographiques	
	Annexe	

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1	Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde	3
Figure 1.2	Répartition des sources d'énergies renouvelables dans le monde en 2011	3
Figure 1.3	Eolienne de pompage d'eau ancienne	4
Figure 1.4	La puissance éolienne mondiale installée	5
Figure 1.5	Les pays les plus productifs	5
Figure 1.6	Parts de marché des 10 premiers fabricants d'éoliennes	6
Figure 1.7	Correspondance taille-puissance des éoliennes	7
Figure 1.8	Eoliennes à axe vertical	8
Figure 1.9	Eolienne à axe horizontal	9
Figure 1.10	Éléments constituant une éolienne à axe horizontal	10
Figure 1.11	Tube de courant autour du rotor éolien	13
Figure 1.12	Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent	13
Figure 1.13	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	14
Figure 1.14	Bilan des forces sur une pale	15
Figure 1.15	Différence de la nature de l'écoulement normal et décroché	16
Figure 1.16	Variation de l'angle de calage d'une pale	16
Figure 1.17	Système utilise la machine synchrone à fréquence variable	17
Figure 1.18	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	18
Figure 1.19	Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	19
Figure 1.20	Structure du rotor de la MADA	19
Figure 1.21	Modes de fonctionnement de la MADA	20

Chapitre 2

Figure 2.1	Système de conversion éolienne à base de la MADA	22
Figure 2.2	Évolution du coefficient de puissance de la turbine utilisée	23
Figure 2.3	Couplage mécanique	24
Figure 2.4	Schéma bloc du modèle de la turbine	25
Figure 2.5	Passage du système triphasé au biphasé	27
Figure 2.6	Modèle de PARK de la MADA	29
Figure 2.7	Configuration du convertisseur côté rotor (CCM)	31
Figure 2.8	Configuration du convertisseur côté cote réseau (CCR)	33

Chapitre 3

Figure 3.1	Synoptique de contrôle du system de conversion éolien	35
Figure 3.2	Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur	36
Figure 3.3	Caractéristiques puissance-vitesse d'un aérogénérateur à vitesse variable	37
Figure 3.4	Schéma bloc de la commande en vitesse dans la zone B	38
Figure 3.5	Modèle de la MADA pour le contrôle découplage des puissances	43
Figure 3.6	Schéma bloc de la commande indirecte sans régulateur de puissances	44
Figure 3.7	Système régulé par un régulateur PI	44

Chapitre 4

Figure 4.1	Schéma bloc de la simulation de la commande indirecte sans régulateur de puissance	47
Figure 4.2	Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence	48
Figure 4.3	Allure du courant rotorique quadrature mesuré et de référence	48
Figure 4.4	Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence	49
Figure 4.5	Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence	49
Figure 4.6	Allure du couple électromagnétique	49
Figure 4.7	Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence	50
Figure 4.8	Allure du courant rotorique quadrature mesuré et de référence	50
Figure 4.9	Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence	50
Figure 4.10	Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence	51
Figure 4.11	Allure du couple électromagnétique	51
Figure 4.12	Schéma bloc de la simulation de la chaîne de conversion éolienne, à base de la MADA	52
Figure 4.13	Allure du coefficient de puissance de la turbine	53
Figure 4.14	Allure de la vitesse mécanique de la machine mesurée et de référence	53
Figure 4.15	Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence	54
Figure 4.16	Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence	54
Figure 4.17	Allure du courant rotorique en quadrature mesuré et de référence	55
Figure 4.18	Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence	55
Figure 4.19	Allure du profil de vent	56
Figure 4.20	Allure du coefficient de puissance de la turbine	56
Figure 4.21	Allure de la vitesse mécanique de la machine mesurée et de référence	56
Figure 4.22	Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence	57

Figure 4.23	Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence	57
Figure 4.24	Allure du courant rotorique en quadrature mesuré et de référence	58
Figure 4.25	Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence	58
Figure 4.26	Allure de la puissance rotorique active	59
Figure 4.27	Allure du courant rotorique par phase	59
Figure 4.28	Allure du courant et la tension statorique par phase (a)	60
Figure 4.29	Allure du courant et la tension statorique par phase (a) en zoom	60
Figure 4.30	Allure du couple électromagnétique mesuré et de référence	61

Acronymes

MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation.
CCM	Convertisseur coté machine.
CCR	Convertisseur coté réseau.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
IGBT	Insulate Gate Base Transistor (en anglais).
PI	Proportionnelle-Intégrale
MPPT	Maximum Power Point Tracking (en anglais)

Nomenclature

V_v	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur (vitesse moyenne du vent (m/s)).
V_2	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur (m/s).
m	La masse d'air en mouvement traversant la surface S_t des pales en une seconde.
S_t	Surface balayée par les pales (m^2).
ρ	Densité de l'air (kg/m^3).
$P_{aéro}$	Puissance aérodynamique (kW).
p_v	Puissance du vent (W).
C_p	Coefficient de puissance.
λ	Vitesse réduite spécifique (ratio).
R_t	Rayon de la pale(m).
Ω_t	Vitesse mécanique de la turbine (rad/s).
G_t	Gain du multiplicateur.
Ω_m	Vitesse mécanique de la machine (rad/s).
β	Angle de calage des pales ($^\circ$).
\vec{V}	Le vecteur de la vitesse du vent arrivant face à pale.
\vec{V}_{rot}	Le vecteur représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur.
\vec{V}_{res}	La résultante de (\vec{V} , \vec{V}_{rot}).
\vec{F}_{res}	La force produite par l'action du vent sur la pale.
\vec{F}_{ax}	La force poussée axiale.
\vec{F}_{rot}	La force poussée en direction de la rotation.
V_{v-n}	Vitesse nominale du vent (m/s).
g	Glissement.
$T_{aéro}$	Couple aérodynamique (N.m).
C_T	Coefficient du couple aérodynamique.
T_{em}	Couple électromagnétique de la MADA (N.m).
J_t, J_g	Moment d'inertie de la turbine, de la génératrice ($kg \cdot m^2$).
T_{Bv}, T_{HV}	Couple côté basse vitesse, Couple côté haute vitesse (N.m).
T_g	Couple d'entraînement de la génératrice (N.m).
f_t, f_g	Coefficient de frottement de la turbine, de la génératrice (Nm/rad .sec).
J	Moment d'inertie totale de la partie tournante.
f	Coefficient de frottement total de la partie tournante (Nm/rad .sec).

V_s, V_r	Tensions statoriques et rotoriques (V).
R_s, R_r	Résistance statorique, rotorique (Ω).
I_s, I_r	Courants statoriques et rotoriques (A).
Φ_s, Φ_r	Flux statoriques et rotoriques (Wb).
L_s, L_r	Inductance statorique, rotorique (H).
M_s, M_r	Inductances mutuelles entre (2) phases statoriques et (2) phases rotorique (H).
θ	Angle entre l'axe rotorique \vec{O}_{ra} , et l'axe statorique \vec{O}_{sa} , (rad).
θ_r	Angle entre l'axe rotorique \vec{O}_{ra} , et l'axe direct \vec{O}_d , (rad).
θ_s	Angle entre l'axe statorique \vec{O}_{sa} , et l'axe direct \vec{O}_d , (rad).
ω_{coor}	Vitesse de rotation du système des axes (d-q), (rad/s).
ω_s, ω_r	Les pulsations statoriques et rotorique (rad/s).
V_{sd}, V_{sq}	Composantes de la tension statorique selon les axes (d-q), (V).
V_{rd}, V_{rq}	Composantes de la tension rotorique selon les axes (d-q), (V).
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Flux du stator selon les axes (d-q), (Wb).
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Flux du rotor selon les axes (d-q). (Wb)
I_{sd}, I_{sq}	Composantes du courant statorique selon les axes (d-q), (A).
I_{rd}, I_{rq}	Composantes du courant rotorique selon les axes (d-q), (A).
M_{sr}, M_{rs}, M	L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique (H)
e_{sd}, e_{sq}	F.e.m.s statoriques d'axe direct et en quadrature (V).
e_{rd}, e_{rq}	F.e.m.s rotoriques d'axe direct et en quadrature (V).
P	Nombre de paires de pôles.
T_r	Couple résistant (N.m).
P_s, Q_s	Puissance statorique active, réactive (W).
P_r, Q_r	Puissance rotorique active, réactive (W).
V_{DC}	Tension du bus continu (V).
$V_{raN}, V_{rbN}, V_{rcN}$	Tensions simples des phases rotoriques (V).
$u_{rab}, u_{rbc}, u_{rca}$	Tensions composées des phases rotoriques (V).
v_{ao}, v_{bo}, v_{co}	Tensions des trois phases modulées (V).
v_{No}	Tension modulé du point neutre des bobinages rotoriques (V).
m'	Le rapport entre la fréquence de porteuse f_p sur la fréquence de référence $f_{\text{réf}}$.
f_p	Un signal triangulaire à haut fréquence (HZ).
$f_{\text{réf}}$	Un signal sinusoïdal de référence à basse fréquence (HZ).

r	le rapport de l'amplitude de la tension de référence $V_{réf}$ et celle de la porteuse V_p
$V_{réf}$	La tension de référence de l'onduleur (V).
V_p	La tension porteuse (V).
s_a, s_b, s_c	Fonctions de conversion du CCM.
i_R	Courant modulé par le CCR (A).
i_m	Courant modulé par le CCM (A).
i_C	Courant du bus continu (A).
e_A, e_B, e_C	F.e.m des tensions du réseau coté CCR (V).
R_f, L_f	Résistance (Ω), inductance (H) du filtre de sortie du CCR.
i_{Af}, i_{Bf}, i_{Cf}	Courants traversant le filtre (A).
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tension des tensions du réseau coté CCR (V).
$V_{V-cutin}$	Vitesse de démarrage de l'éolienne (m/s).
$V_{V-cutoff}$	Vitesse d'arrêt de l'éolienne (m/s).
C_{P_max}	Valeur maximale du coefficient de puissance.
λ_{opt}	Valeur optimale du ratio de vitesse.
$\Omega_{t_réf}$	Référence de la vitesse mécanique de la turbine (rad/s).
$\Omega_{m_réf}$	Référence de la vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
$P_{aéro_max}$	Puissance aérodynamique maximale (W).
$T_{ém_réf}$	Référence du couple électromagnétique (N.m).
$P_{s_réf}$	Références des puissances statoriques actives (W).
$Q_{s_réf}$	Références des puissances statoriques réactives (W).
$V_{rq_réf}, V_{rd_réf}$	Références des tensions rotoriques selon les axes (d-q), (V).
$I_{rq_réf}, I_{rd_réf}$	Références des courants rotoriques selon les axes (d-q), (A).
K_p, K_i	Les gains de régulateur PI.
τ_r	Constant de temps en boucle fermée.

Introduction générale

Aujourd'hui plus de 80% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement.

Dans ce context général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en électricité à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de ce type de source et la qualité de l'énergie fournie.

Dans le domaine de la production de l'énergie électrique à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis performances / coût.

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les secteurs industriels en raison de leur fiabilité et leur construction simple.

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à haute puissance et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse. L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche au long de la dernière décennie. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines.

Commander une telle machine est une opération délicate à cause du couplage existant entre leurs différentes variables. Contrairement à ce type de machine, la machine à courant continu présente l'avantage de la simplicité de sa commande.

Afin d'obtenir une machine asynchrone à double alimentation dont les performances sont semblables à une machine à courant continu, il est nécessaire d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique. C'est l'idée de l'apparition de la technique de la commande

vectorielle, ou la commande par orientation du flux. Cette technique est proposée en 1973 par Blaschke et Hasse.

L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances pour applications de la production d'énergie et des entraînements électriques à vitesse variable.

Pour présenter ce travail, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre, consacré sur la généralité au système de conversion d'énergie éolienne, Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes, on aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne connectée au réseau. Nous commencerons par le modèle aérodynamique de la turbine, la génératrice asynchrone double alimentation, et finalement les convertisseurs de puissance.

Le troisième chapitre abordera le développement:

- D'un algorithme de contrôle pour le suivi des points de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes d'énergie éolienne.
- La commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Ceci nous permet d'obtenir un modèle de la MADA analogue à celui de la machine à courant continu. Le stator de la MADA est alimenté par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé à commande MLI.

On présente dans le dernier chapitre, les résultats de simulation numérique illustrant le comportement de la structure de commande découplée des puissances actives et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA), avec un bloc MPPT par commande de la vitesse de rotation de la machine.

1.1 Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies du soleil, du vent, des cours d'eau, et de la biomasse sont des ressources renouvelables. Ces sources permettent la production de l'électricité [1].

En dépit de l'évolution de la dépendance du monde sur les énergies renouvelables, l'énergie classique occupe toujours la première place en termes de l'utilisation de la production de l'électricité, la figure (1.1) montre la répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

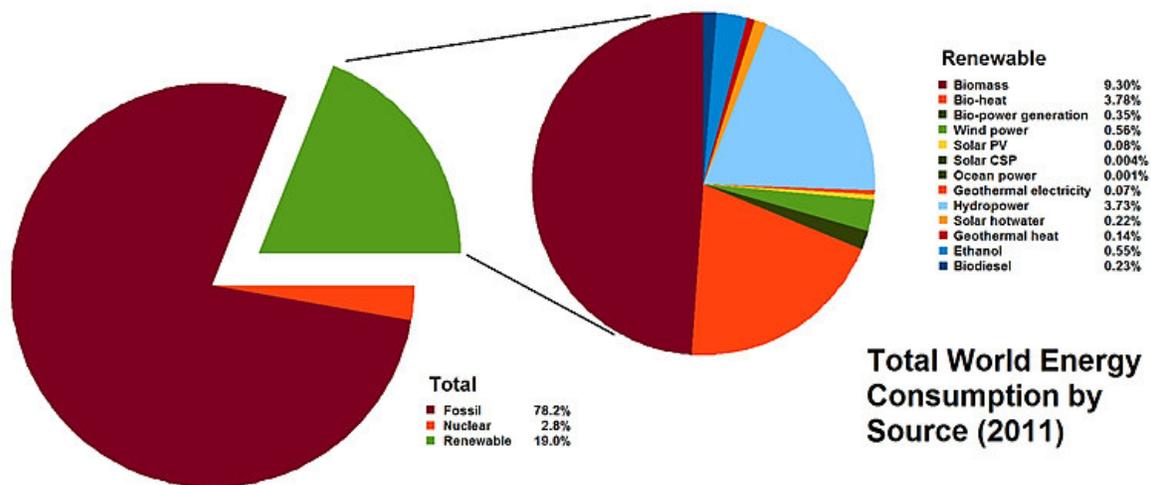


Fig.1.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [2].

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien représente la vedette, elle est l'une des plus prometteuses, dans le domaine de la production d'électricité. La figure (1.2) montre la proportion de l'utilisation de cette énergie par rapport aux autres énergies renouvelables.

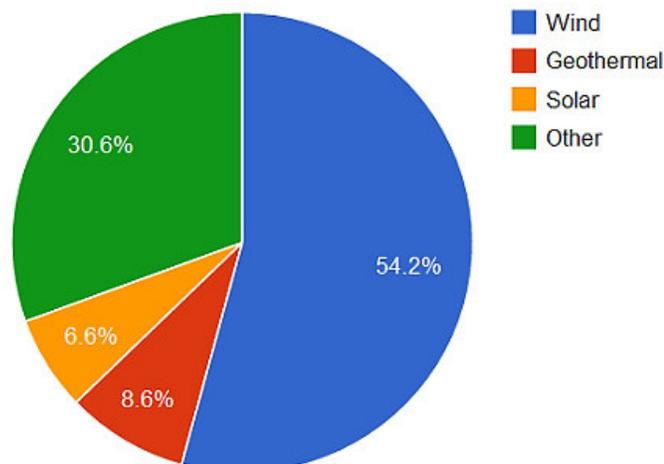


Fig.1.2: Répartition des sources d'énergies renouvelables dans le monde en 2011[2].

1.2 Historique de l'éolien

- **Les moulins à vent**

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent, apparus à l'an 600 tout d'abord en Orient puis en Egypte. Les moulins à vent produisant une énergie mécanique qui servait à moudre les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les cultures, comme le montre la figure (1.3).

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

- **Les premières éoliennes**

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. Cette éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite.

Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle.

En 1957, Johannes Juul crée une turbine qu'il appellera Gedser et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1 000 kW [3].



Fig.1.3: Eolienne de pompage d'eau ancienne [3].

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne.

• L'énergie éolienne aujourd'hui

- La puissance éolienne mondiale a atteint 318000 MW à la fin de l'année 2013, la figure (1.4) illustre la puissance éolienne mondiale installée pendant la période 2010 – 2013 [4].



Fig.1.4 : La puissance éolienne mondiale installée [4].

- Les pays les plus productifs sont représentés sur la figure (1.5).



Fig.1.5: Les pays les plus productifs [4].

- Les 10 premiers fabricants d'éoliennes en 2010 sont montrés sur la figure (1.6).

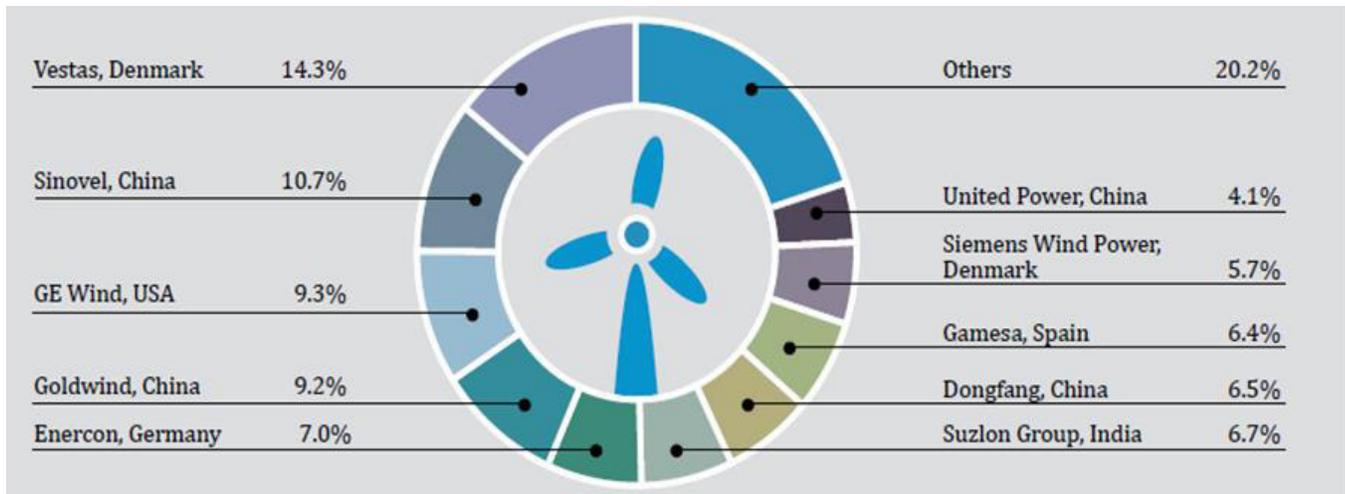


Fig.1.6: Parts de marché des 10 premiers fabricants d'éoliennes [5].

1.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

1.3.1 Les avantages de l'énergie éolienne

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
2. L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
3. Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
4. Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
5. La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
6. L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
7. Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
8. Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original [6].

1.3.2 Les inconvénients de l'énergie éolienne

1. L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
2. Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.
3. L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
4. Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
5. Les bruits mécaniques, et peuvent être bruyantes lorsqu'il y a beaucoup de vent.

1.4 Les types d'éoliennes

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

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

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

La figure (1.7) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

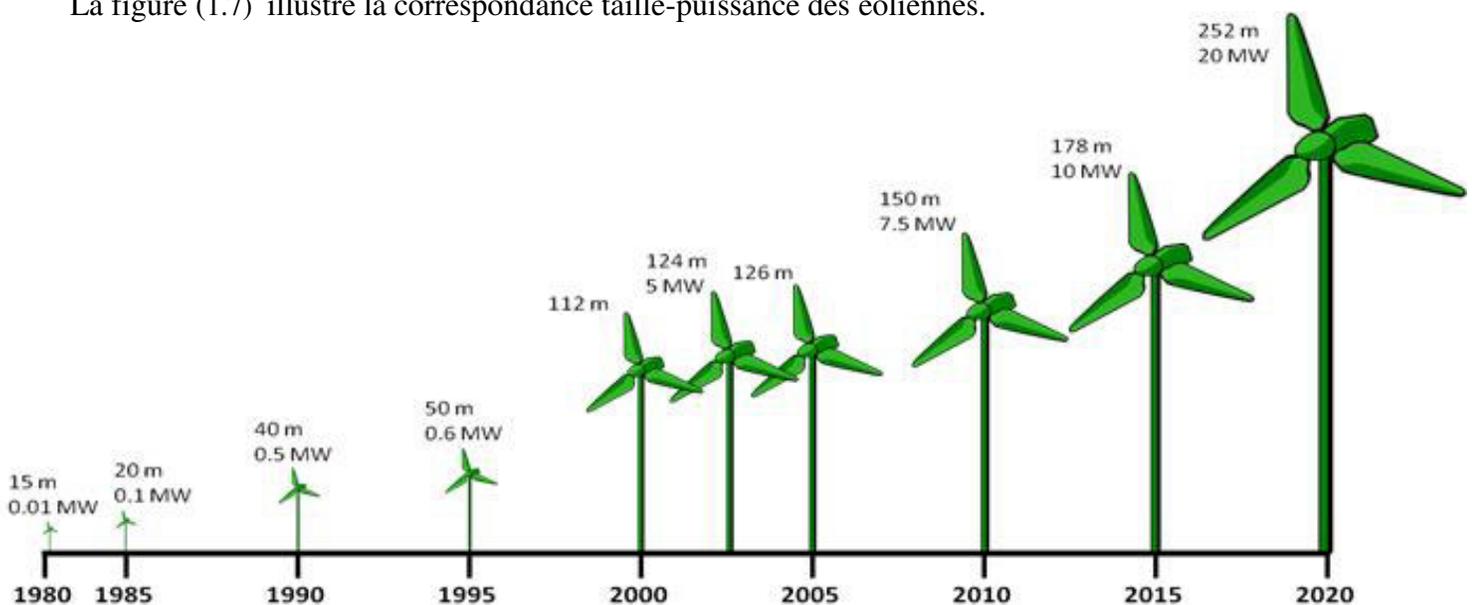


Fig.1.7: Correspondance taille-puissance des éoliennes [3].

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types d'éoliennes.

1.4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, elles présentent les avantages suivants:

- Ne pas nécessiter de système d'orientation des pales.
- Avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance donc facilement accessibles.

Mais ces éoliennes possèdent quelque inconvénient comme:

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement; parce qu'au démarrage la génératrice fonctionne comme un moteur absorbant ainsi du courant du réseau.
- le rendement des éoliennes à axe vertical est faible par rapport aux éoliennes à axe horizontal [8].

La figure (1.8) illustre les différents types d'éoliennes à axe vertical.

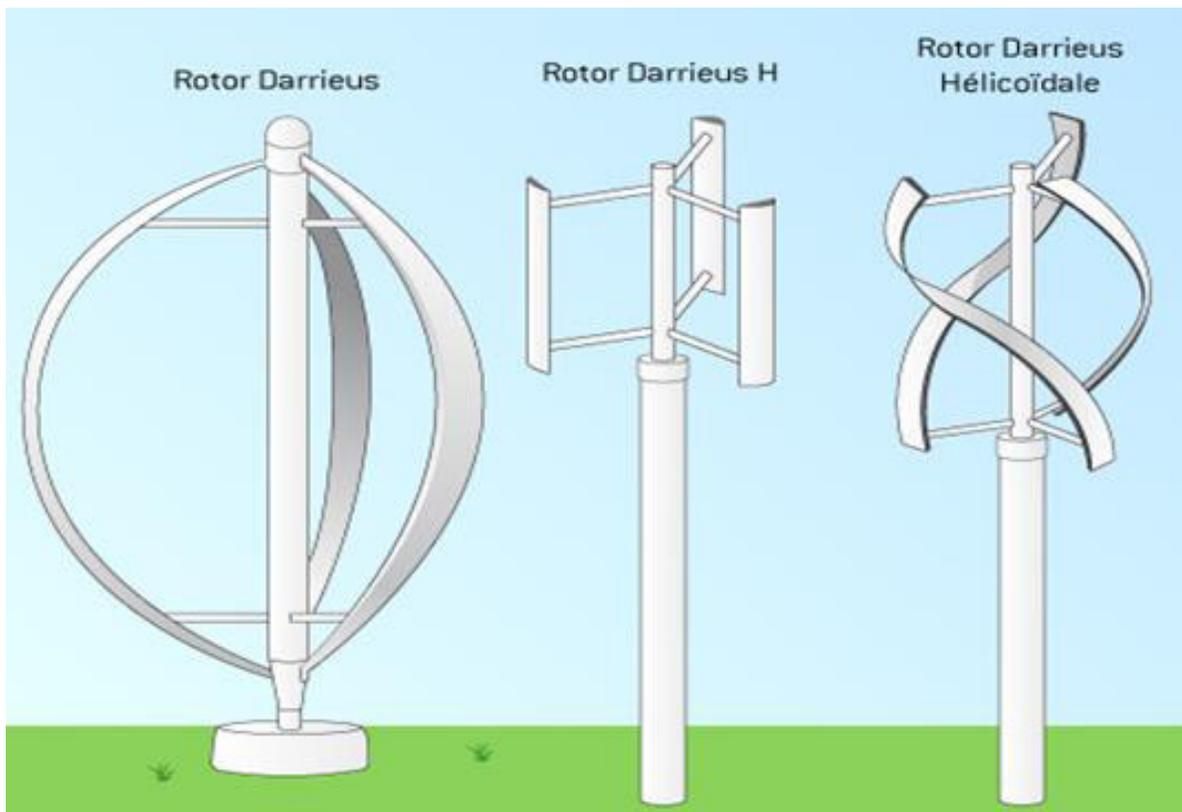


Fig.1.8: Eoliennes à axe vertical.

1.4.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical, elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation, le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le rendement de puissance aérodynamique, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, la figure (1.9) montre une éolienne tripale à axe horizontal [9], c'est cette éolienne que sera le sujet de notre thèse.



Fig.1. 9: Eolienne à axe horizontal.

1.4.2.1 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

La figure (1.10) montre les trois éléments principaux, constituant une éolienne à axe horizontal.

- Le mat : est un élément porteur, généralement c'est un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation des pales plus longues. Le mat a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Le frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens.

- Un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
 - Les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle.
- Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor, leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs.
- Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [10].

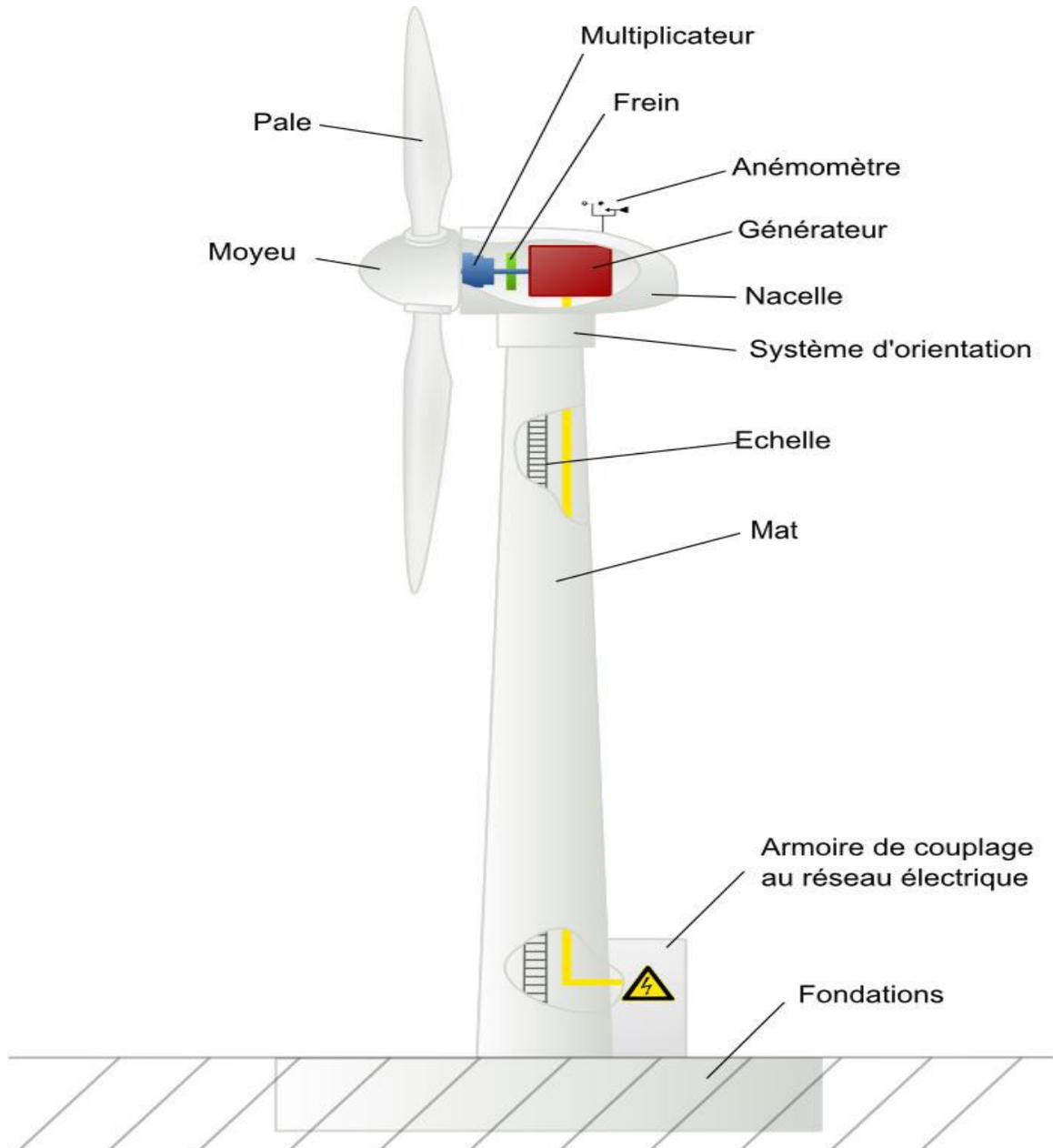


Fig.1.10: Eléments constituant une éolienne à axe horizontal [3].

1.4.3 Les différentes technologies d'éoliennes

Le système éolien peut être utilisé en deux applications, système reliés au réseau et système autonome, ces systèmes fonctionnent en deux technologies.

1.4.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau, sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

1.4.3.1.1 Les avantages d'éoliennes à vitesse fixe

- Simplicité de système électrique.
- Utilisation d'une machine standard, robuste et moins cher.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin une interface d'électronique de puissance.

1.4.3.1.2 Les inconvénients d'éoliennes à vitesse fixe

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée.

1.4.3.2 Les éoliennes à vitesse variable

La vitesse variable permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent, les convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet le découplage de la fréquence du réseau et la vitesse de rotation et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable.

1.4.3.2.1 Les avantages d'éoliennes à vitesse variable

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent.
- Augmentation du rendement énergétique.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques.
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

1.4.3.2.2 Les inconvénients d'éoliennes à vitesse variable

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.

- La taille de ces convertisseurs, devient relativement importante pour les éoliennes de grande taille.
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA [11].

1.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

L'éolienne en générale est constituée par une partie mobile: Le rotor de l'éolienne tourne sous l'effet du vent et transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, sur l'arbre principal. La vitesse de rotation de l'arbre est de (12 à 15 tours/minute) et doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ de (1000 à 1500 tours/minute), cette vitesse assure un bon fonctionnement de la génératrice qui produit l'électricité. Par les convertisseurs de puissance on peut ajuster la fréquence des courants produits par la génératrice et permettant au rotor de tourner en vitesse variable en fonction de la vitesse du vent. La tension produite par la génératrice de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance situé dans la nacelle ou au pied du mat jusqu'à un niveau de 20 ou 30 kV, puis couplée avec le réseau électrique [11].

1.5.1 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

- **Loi de Betz**

La théorie globale du rotor éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz. Soit le système représenté sur la figure (1.11), où V_v et V_2 représenté respectivement la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent V_v et V_2 . Soit $\frac{V_v+V_2}{2}$; la masse d'air en mouvement traversant la surface S_t des pales en un second est:

$$m = \frac{\rho S_t (V_v + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance aérodynamique alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent:

$$P_{aéro} = \frac{m(V_v^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

En remplaçant m par son expression dans (1.1) on obtient l'expression suivante :

$$P_{aéro} = \frac{\rho S_t (V_v + V_2)(V_v^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

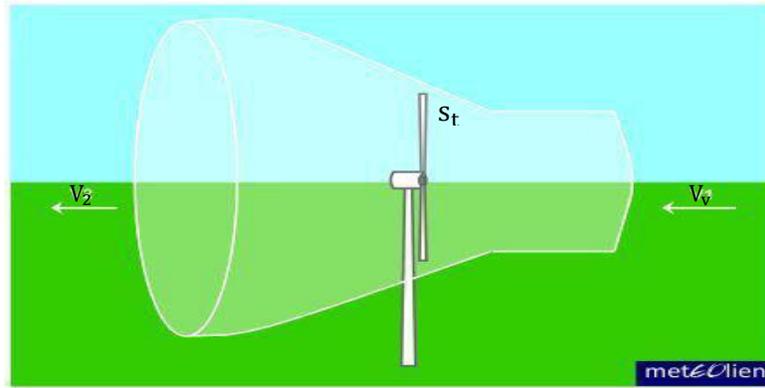


Fig.1.11: Tube de courant autour du rotor éolien.

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface s_t sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_v , la puissance de vent théorique p_v correspondante serait alors :

$$p_v = \frac{1}{2} \rho s_t V_v^3 \quad (1.4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible sont montres à l'expression (1.5) et appelé coefficient de puissance C_p , alors :

$$\frac{p_{aéro}}{p_v} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_2}{V_v}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_v}\right)^2\right]}{2} \quad (1.5)$$

La caractéristique correspondante à l'expression (1.5) dans la figure (1.12), présente un maxima de $\frac{16}{27}$, soit 0.597, correspondant au quotient $\frac{V_2}{V_v} = \frac{1}{3}$; Cette limite théorique appelée la **limite de Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [10].

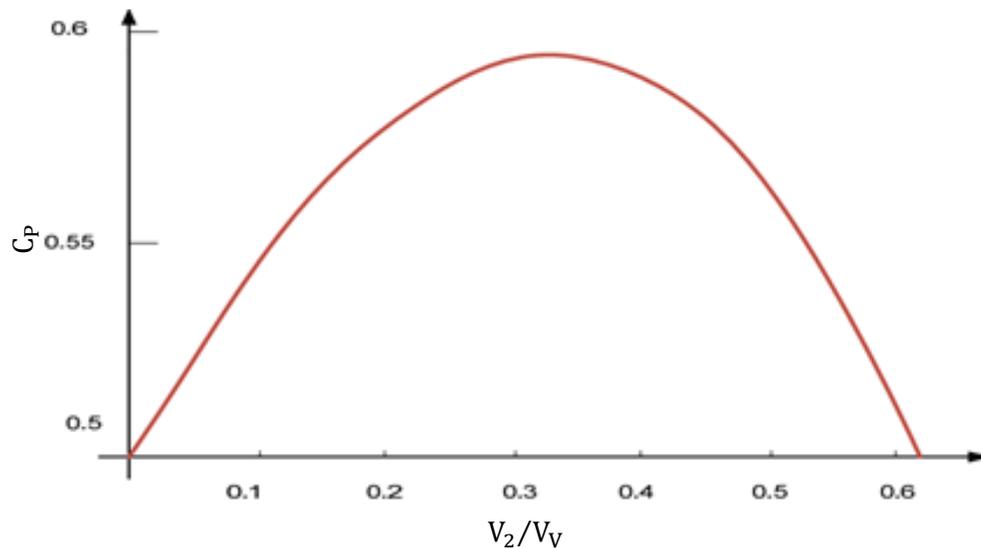


Fig.1.12: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

La figure (1.13) illustre le coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

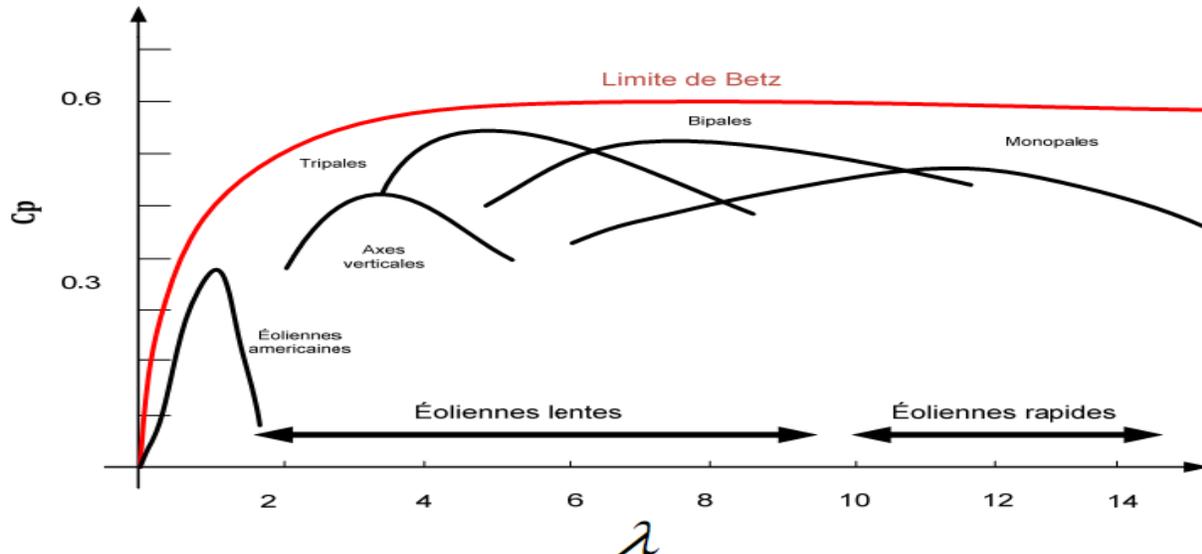


Fig.1.13: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

- **Production d'énergie mécanique.**

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique $P_{aéro}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [10]:

$$P_{aéro} = C_p \cdot p_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S_t V_v^3 \quad (1.6)$$

Avec: $\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v}$ (1.7)

$$S_t = \pi R_t^2 \quad (1.8)$$

1.5.2 Bilan des forces sur une pale

La figure (1.14) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} , Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} ; β est l'angle de calage des pales dans le type à axe horizontal.

L'action du vent sur la pale produit une \vec{F}_{res} force qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [12].

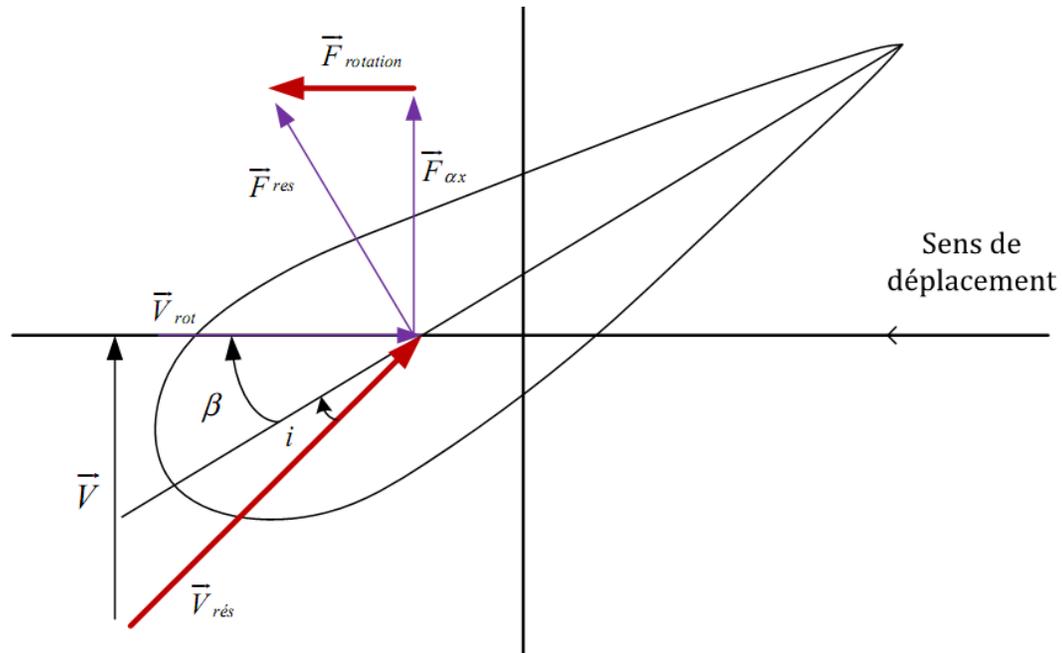


Fig.1.14: Bilan des forces sur une pale [12].

1.5.3 Systèmes de régulation de la puissance de l'éolienne

1.5.3.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall"

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes surtout les connectées au réseau électrique. C'est le système de limitation de vitesse le plus simple, il est basé sur une limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique, la figure (1.15) illustre la différence de la nature de l'écoulement normal et décroché. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_{v-n} , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

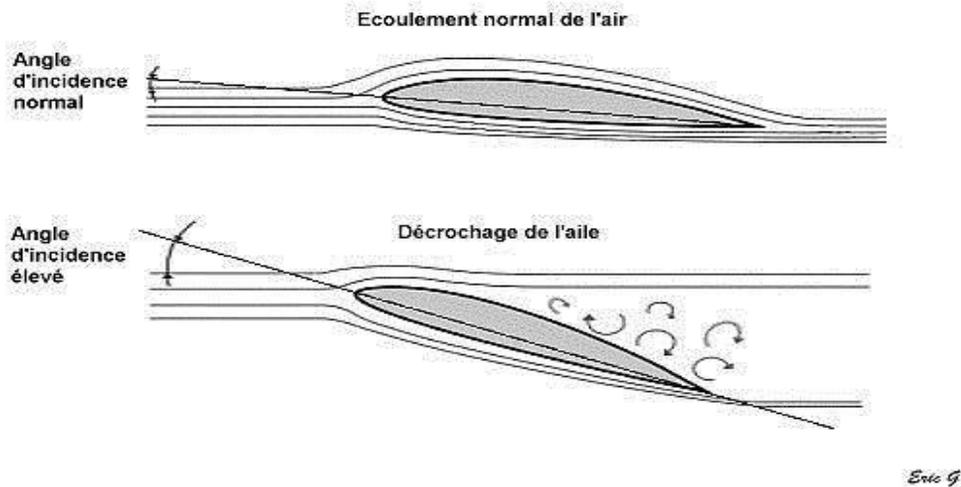


Fig.1.15: Différence de la nature de l'écoulement normal et décroché.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales.

1.5.3.2 Système d'orientation des pales "pitch"

Ce système se base sur le principe de variation de l'angle de calage « β », qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante. En agissant par le Pitch Control, le coefficient de puissance C_p varie plus en fonction de λ comme précédemment mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce système permet aussi de freiner la turbine si nécessaire.

La figure (1.16) illustre variation de l'angle de calage d'une pale.

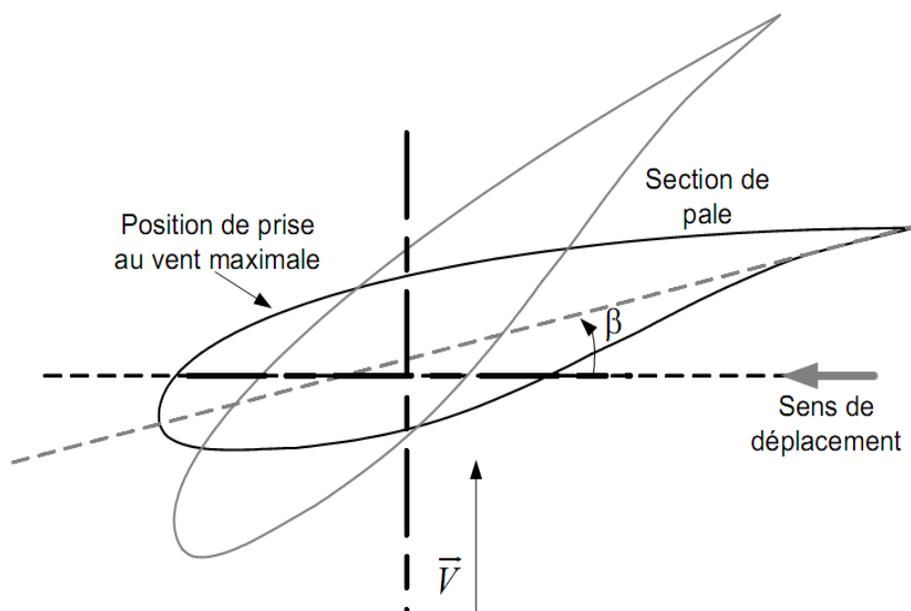


Fig.1.16: Variation de l'angle de calage d'une pale.

Pour faire la modification de l'angle de calage dans un système de régulation automatique on a besoin d'un régulateur électronique avec des servomoteurs, ce qui va permettre de la régulation et l'optimisation et la protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent [13].

1.6 Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères : le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge, l'implantation sur terre ou en mer et principalement la connexion au réseau électrique ou non (mode autonome). Les types de machines électriques les plus utilisées dans les aérogénérateurs sont les machines synchrones et asynchrones [14].

1.6.1 Machine synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que le générateur à induction de la même taille.

Le principe de fonctionnement de la machine est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un électro-aimant ou un aimant permanent.

Pour un fonctionnement à vitesse variable les machines synchrones sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance comme le montre la figure (1.17).

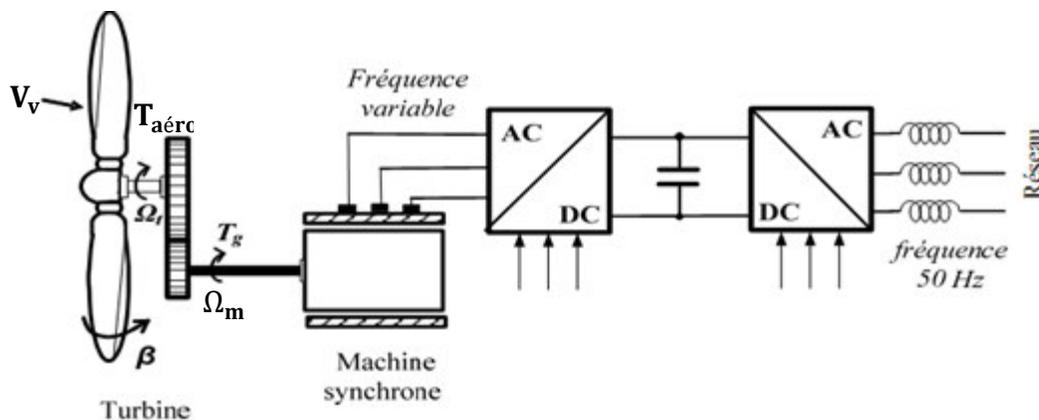


Fig.1.17: Système utilise la machine synchrone à fréquence variable.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

1.6.2 Machine asynchrone

Les machines asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elle présentent de nombreux avantages tels que : la robustesse, la facilité de mise en œuvre.

1.6.2.1 Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse. Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande, la structure générale est montrée sur la figure (1.18).

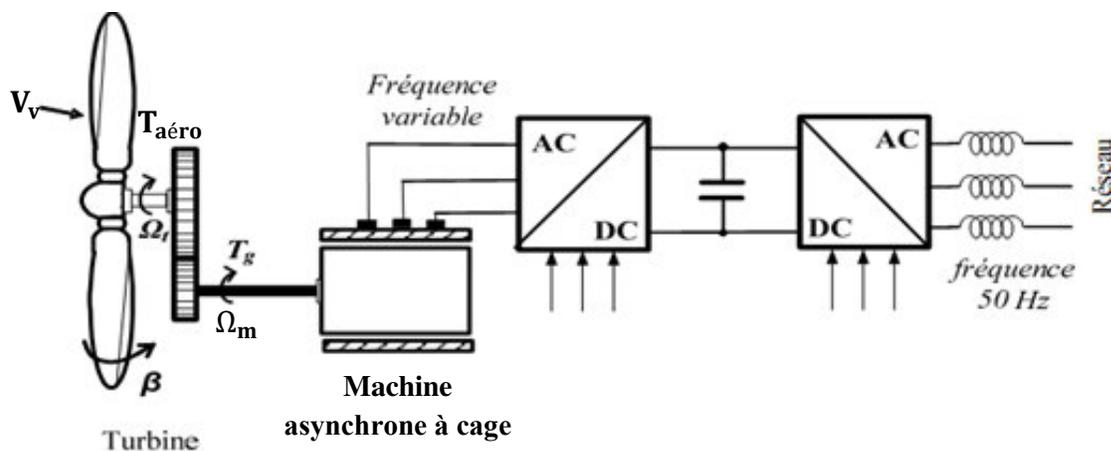


Fig.1.18: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

1.6.2.2 Machine asynchrone à rotor bobiné

Les machines asynchrones à rotor bobiné offrent un potentiel économique très attractif pour la variation de vitesse, malgré que ce soient une machine non standard et sa construction la plus complexe par rapport à une machine à cage. L'avantage principal de cette machine est l'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois, cette machine est la machine à double alimentation MADA qui est le sujet de notre étude.

1.7 Eolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone doublement alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. A travers cette section la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement seront présentés. Pour les éoliennes

utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques.

La figure (1.19) illustre un système éolien à vitesse variable basée sur une MADA.

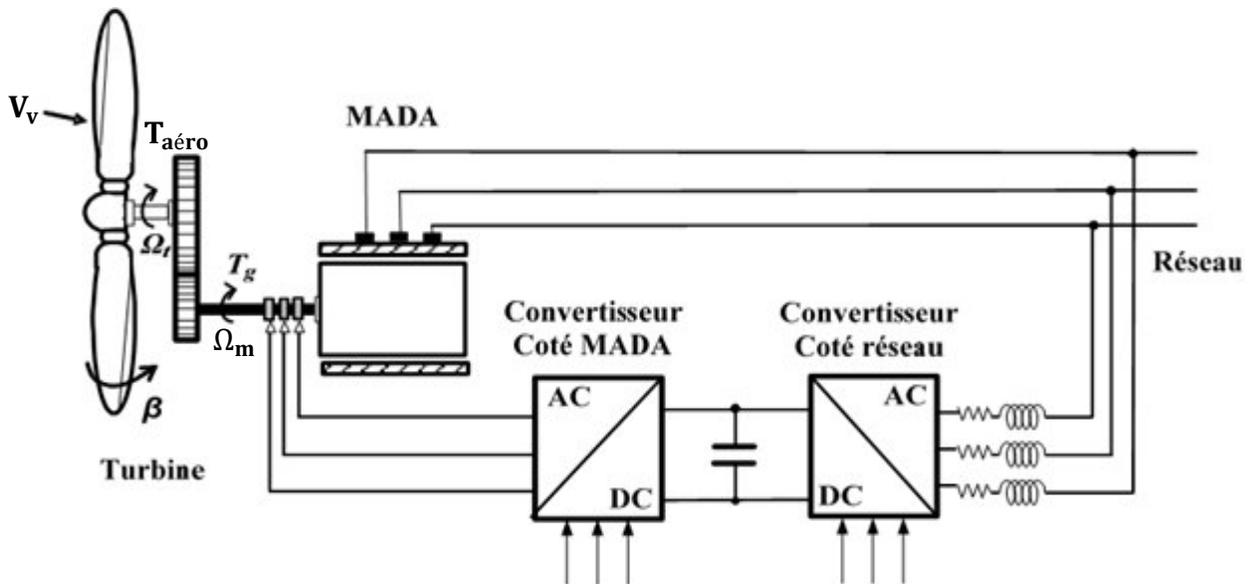


Fig.1.19: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

1.7.1 Structure de la MADA

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone, la différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques [15]. La figure (1.20) illustre la structure du rotor de la MADA.

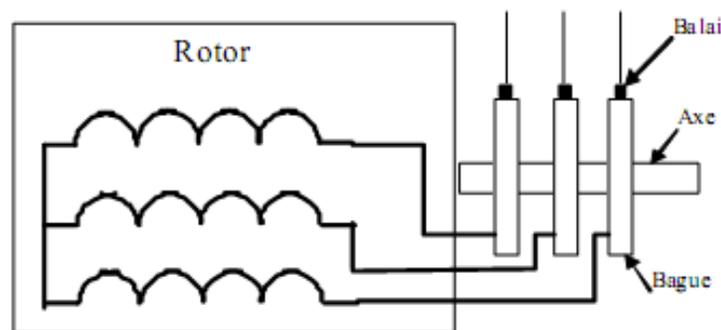


Fig.1.20: Structure du rotor de la MADA [15].

1.7.2 Modes de fonctionnement de la MADA.

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants, c'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière. Durant le mode hypo-synchrone, où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau. Pendant le mode hyper-synchrone, le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA [10].

La figure (1.21) illustre Modes de fonctionnement de la MADA.

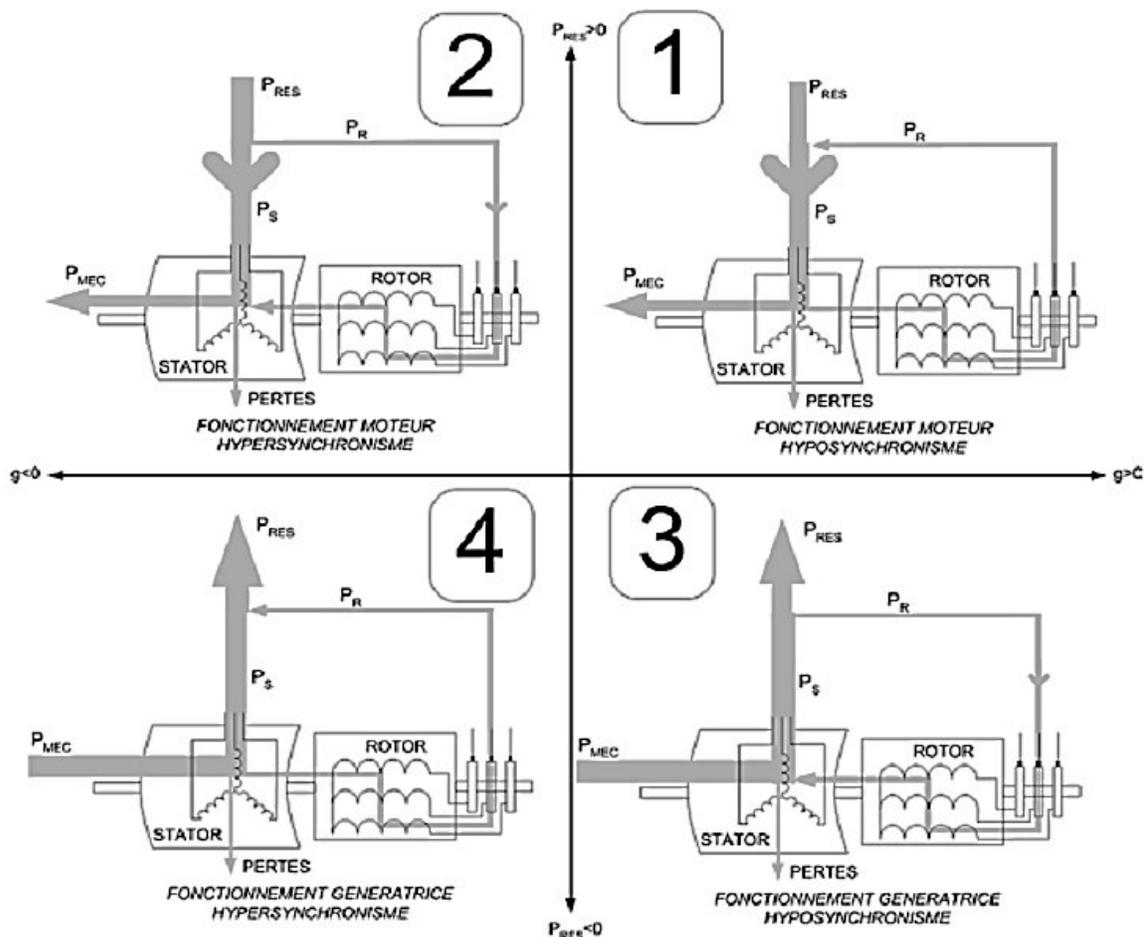


Fig.1.21: Modes de fonctionnement de la MADA [10].

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique $P_{méc}$ à la machine. En mode hypo-synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. Par contre, en mode hyper-synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $\frac{g}{1-g} P_{méc}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

1.7.3 Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable, le système de la MADA permet d'élargir la plage de la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [16].

1.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les systèmes éoliens, les différents types et composants et leur principe de fonctionnement. Après une étude théorique de la conversion de l'énergie cinétique du vent, la production d'énergie mécanique et les stratégies de la régulation de fonctionnement d'éolienne, on a présenté les types des machines électriques utilisés dans les systèmes éoliens surtout la machine asynchrone à double alimentation.

2.1 Introduction.

Actuellement, la majorité des projets éoliens de puissance supérieur à 1MW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est très utilisée pour la production électrique en forte puissance. Le système de conversion éolien à base de la MADA considéré dans cette thèse est montré sur la figure (2.1): Il est constitué d'une turbine éolienne tripale à axe horizontal, d'une génératrice asynchrone à double alimentation de 7.5 kW, d'un bus continu, de deux convertisseurs statiques.

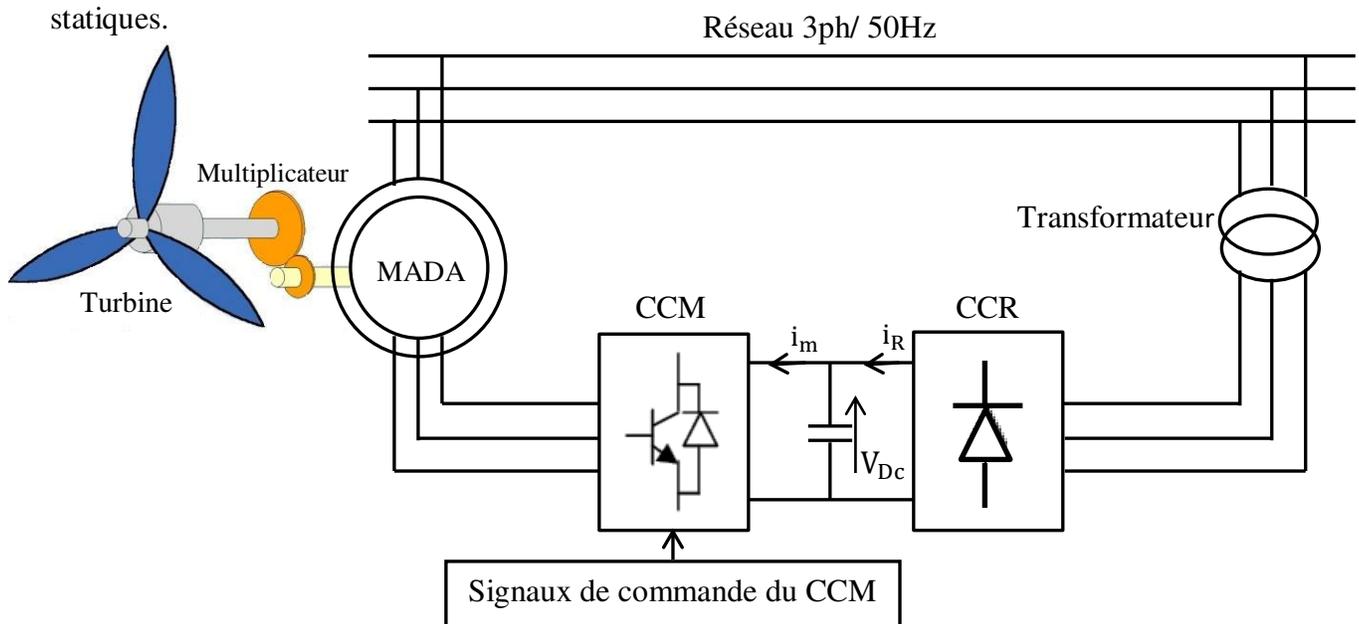


Fig. 2.1: Système de conversion éolienne à base de la MADA.

2.2 Modèle de la turbine.

On considère une turbine éolienne munie de trois pales non orientables de longueur R_t , entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G_t . La turbine éolienne transforme l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement de densité ρ , traversant la surface S_t balayée par les pales en une seconde. La puissance cinétique de la masse d'air qui traverse cette surface est donnée par [17]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S_t V_v^3 \quad (2.1)$$

L'expression de la puissance aérodynamique captée par l'éolienne s'écrit comme suit :

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \rho S_t C_p(\lambda) V_v^3 \quad (2.2)$$

Dans l'équation (2.2) apparaissent deux paramètres caractéristiques de la voilure :

- La vitesse réduite spécifique (ratio) λ , comme la vitesse linéaire au bout des pales ramenée à la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (2.3)$$

- Le coefficient de puissance C_p , caractérisant le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des caractéristiques de la turbine. Le coefficient C_p ne peut théoriquement dépasser la limite théorique dite de Betz $C_{p_lim} = 0.597$. Le coefficient de puissance est généralement lié à la vitesse spécifique par des modèles ampériques, issus d'une interpolation. Pour notre application, l'équation (2.4) décrit le modèle de la voilure utilisée [18]:

$$C_p(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 + a_5\lambda^5 \quad (2.4)$$

Les constantes a_i ($i=0\dots5$), sont donnés en annexe.

La figure (2.2) représente le tracé de la caractéristique $C_p=f(\lambda)$ ou apparait un maximum $C_{p_max}=0.5497$, pour une valeur optimale de $\lambda_{opt}=6.41$.

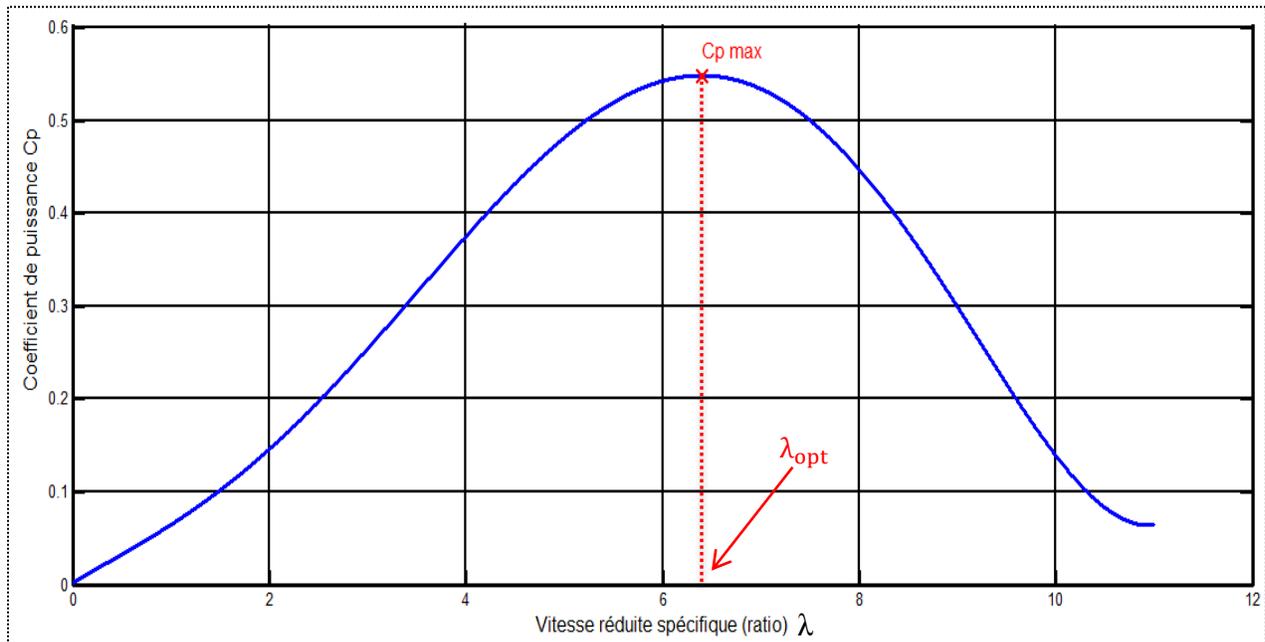


Fig.2.2 : Évolution du coefficient de puissance de la turbine utilisée.

De l'équation (2. 2) et (2.3), on déduit l'expression du couple aérodynamique [19]:

$$T_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_t} = \frac{0.5\rho S_t C_p(\lambda) V_v^3}{\Omega_t}$$

$$T_{aéro} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 C_T(\lambda) V_v^2 \quad (2. 5)$$

De l'équation (2. 5), est déduit le coefficient du couple :

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (2. 6)$$

2.3 Modèle de l'arbre mécanique.

Sur la figure (2.3) est illustré le couplage mécanique de la chaîne éolienne, basé sur le modèle à deux masses, où apparaissent [20]:

- Le couple moteur développé par la turbine $T_{aéro}$.
- Le couple électromagnétique de la MADA T_{em} , opposant le couple de la turbine.
- L'inertie des deux parties (J_t, J_g), simulant les deux masses.

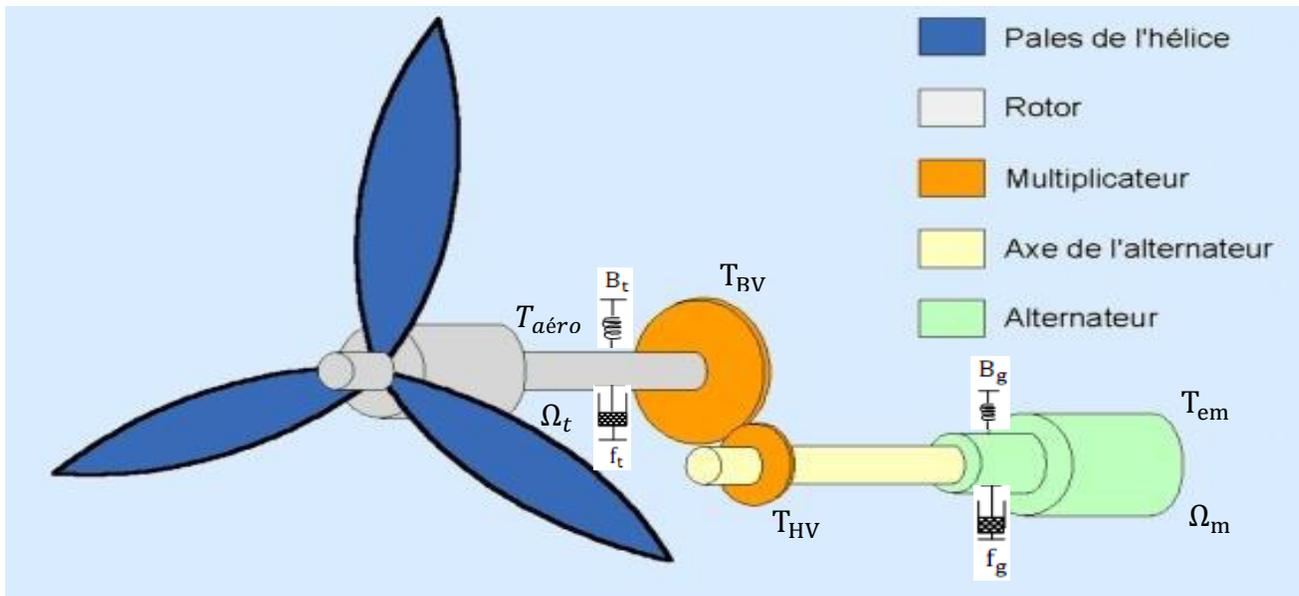


Fig. 2.3 : Couplage mécanique.

En prenant en compte les coefficients de rigidité et d'amortissement des deux masses, les équations (2. 7) décrivent le comportement dynamique de l'arbre mécanique :

$$\begin{cases} J_t \dot{\Omega}_t = T_{aéro} - f_t \Omega_t - B_t \theta_t - T_{BV} \\ J_g \dot{\Omega}_m = T_{HV} - f_g \Omega_m - B_g \theta_g - T_{em} \end{cases} \quad (2. 7)$$

En utilisant les équations (2. 7) et en négligeant la rigidité du system l'expression de la dynamique de l'arbre devient alors :

$$J\dot{\Omega}_m = T_g - f\Omega_m - T_{em} \quad (2. 8)$$

$$G_t = \frac{\Omega_m}{\Omega_t} = \frac{T_{BV}}{T_{HV}} \quad (2. 9)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} J = \frac{J_t}{G_t^2} + J_g \\ f = \frac{f_t}{G_t^2} + f_g \\ T_g = \frac{T_{aéro}}{G_t} \end{cases} \quad (2. 10)$$

Où le multiplicateur de vitesse, disposé entre la turbine et la génératrice a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω_m .

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la figure (2.4).

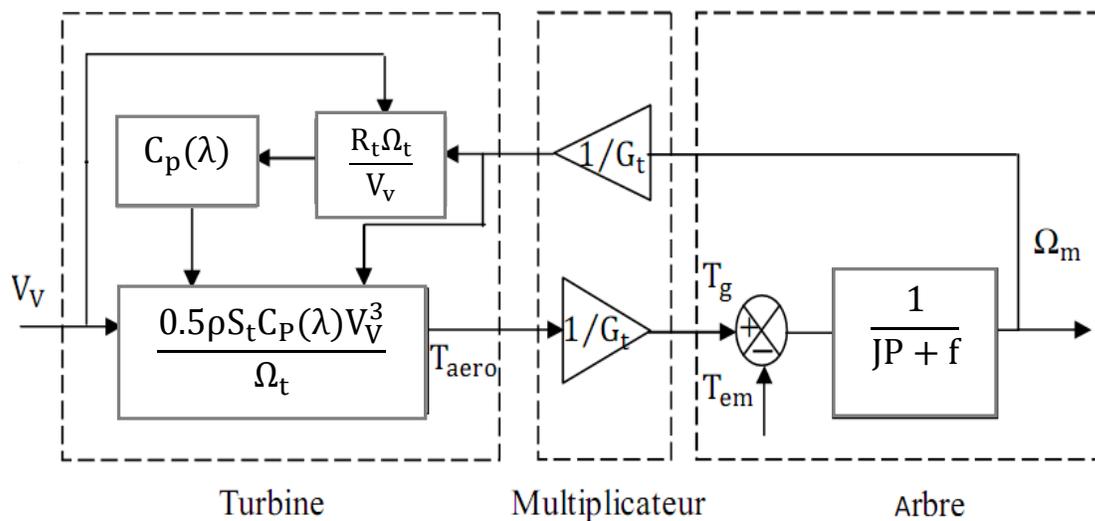


Fig.2.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine [20].

2.4 Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA).

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

2.4.1 Hypothèses.

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [21].

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Entrefer constant.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.

2.4.2 Modèle mathématique de la MADA

- Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par le système (2. 11) [21]:

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{I}_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2. 11)$$

- Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2. 12)$$

$$\text{Avec : } [\mathbf{V}_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [\mathbf{V}_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [\mathbf{I}_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [\mathbf{I}_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \text{ et } [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

- Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [\mathbf{L}_s] \cdot [\mathbf{I}_s] + [\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{I}_r] \quad (2. 13)$$

$$[\Phi_r] = [\mathbf{L}_r] \cdot [\mathbf{I}_r] + [\mathbf{M}_{rs}] \cdot [\mathbf{I}_s] \quad (2. 14)$$

$$\text{Tel que : } [\mathbf{L}_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [\mathbf{L}_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Et } [\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (2. 13) et (2. 14) dans, respectivement les relations (2. 11) et (2. 12) nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{I}_s] + [\mathbf{L}_s] \frac{d}{dt} [\mathbf{I}_s] + \frac{d}{dt} \{ [\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{I}_r] \} \quad (2. 15)$$

$$[\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_r] + [\mathbf{L}_r] \frac{d}{dt} [\mathbf{I}_r] + \frac{d}{dt} \{ [\mathbf{M}_{rs}] \cdot [\mathbf{I}_s] \} \quad (2. 16)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((2. 15) et (2. 16)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. 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 utilisées, on cite celle de Park.

2.4.3 Transformation de Park

La transformation de R.H.Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires indice 0, d'axe directe (indice d), d'axe quadrature (indice q). La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de passer d'un système triphasé à un système diphasé exprimé dans le repère (d-q) ou les éléments sont continus, ce qui simplifie la résolution des équations. La figure (2.5) illustre le passage du système triphasé au biphasé [22].

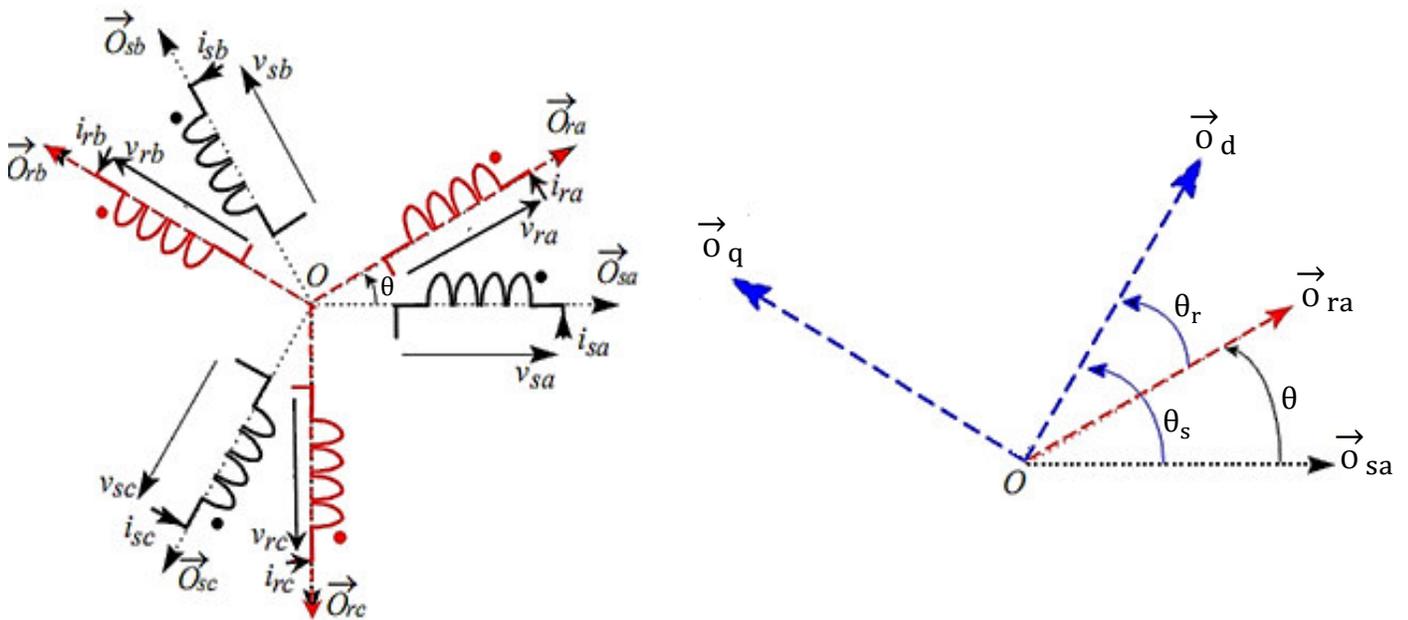


Fig.2.5: Passage du système triphasé au biphasé.

La transformation de Park est définie par la matrice de rotation suivante.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (2.18)$$

θ : est l'angle entre l'axe rotorique \vec{o}_{ra} et l'axe statorique \vec{o}_{sa} .

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique \vec{o}_{ra} et l'axe direct \vec{o}_d .

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique \vec{o}_{sa} et l'axe direct \vec{o}_d .

2.4.3.1 Le choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié [22].

Il existe trois choix importants on peut fixer le référentiel (d-q) :

- Au stator.
- Au rotor.
- Au champ tournant.
- **Référentiel lié au champ tournant**

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 [23].

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_s \quad (2.19)$$

En appliquant la transformée de Park lié au champ tournant, chaque vecteur est défini comme suit :

- Les expressions des tensions dans le système d'axes d-q est présenté par le système (2. 20):

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (2.20)$$

La figure (2.6) illustre le modèle de PARK de la MADA.

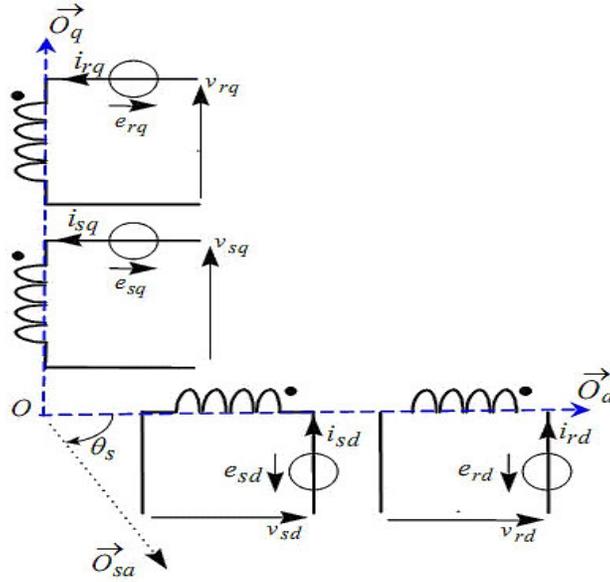


Fig.2.6: Modèle de PARK de la MADA.

➤ Les expressions des flux sont présentées par le système (2. 21):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M_{sr} I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M_{sr} I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{rs} I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M_{rs} I_{sq} \end{array} \right. \quad (2. 21)$$

On considère que $M_{sr} = M_{rs} = M$

En remplaçant les flux dans les expressions des tensions, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s I_{sq} + M I_{rq}) \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s (L_s I_{sd} + M I_{rd}) \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{array} \right. \quad (2. 22)$$

On peut écrire les expressions précédentes sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega_r) M & R_r & -(\omega_s - \omega_r) L_r \\ (\omega_s - \omega_r) M & 0 & (\omega_s - \omega_r) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (2. 23)$$

Le système d'équations peut être écrit sous la forme :

$$[U] = [A] * [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (2. 24)$$

La matrice [A] peut s'écrire sous forme de trois sous matrice comme suit :

$$[A] = [C] + \omega_r [E] + \omega_s [B] ; \quad (2. 25)$$

Avec :

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

Le système d'équations devient :

$$[U] = \{ [C] + \omega_r [E] + \omega_s [B] \} * [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (2. 26)$$

- Les expressions de couple électromagnétique et du mouvement sont de la forme :

$$T_{em} = p(\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd}) \quad \text{ou} \quad T_{em} = \frac{3}{2} pM(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) \quad (2. 27)$$

$$T_{em} = T_r = J\dot{\Omega}_m + f\Omega_m \quad (2. 28)$$

- Puissances électriques échangées avec le réseau.

Les puissances actives et réactives statoriques échangées avec le réseau sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (2. 29)$$

De même les équations (2. 30) décrivent les puissances rotoriques échangées en mode sous et Sur-synchronisme.

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (2. 30)$$

Du moment que la génératrice à induction est directement liée au réseau, la fréquence de la tension statorique étant imposée et la pulsation des courants rotoriques est alors déduite ainsi :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega_m \quad (2. 31)$$

2.5 Modélisation des convertisseurs statiques

Nous proposons dans cette thèse la configuration de deux convertisseurs dos à dos, l'un est lié au rotor de la machine (CCM) à commande MLI, et l'autre est lié au réseau électrique (CCR). Supposons qu'on travaille en régime hypo-synchrone de la génératrice, cela veut dire que le CCM fonctionne en onduleur et le CCR prend la fonction d'un redresseur.

2.5.1 Modélisation de l'onduleur côté rotor de la MADA (CCM)

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tension possédant six cellules de commutation constitué chacune d'un IGBT et une diode antiparallèle est montré sur la figure (2.7) [20].

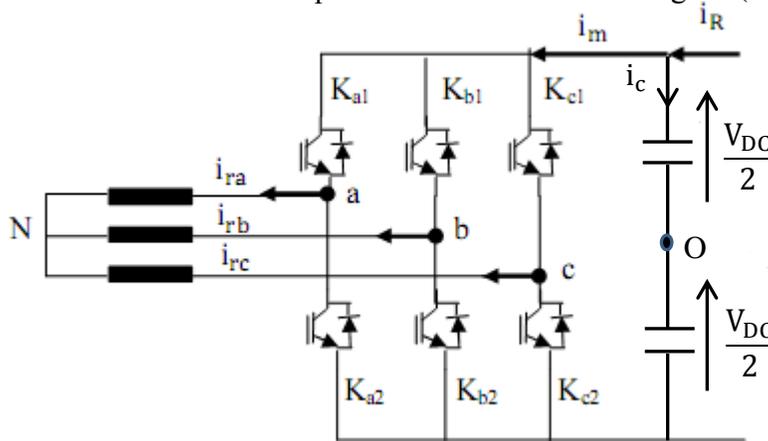


Fig.2.7: Configuration du convertisseur côté rotor (CCM) [20].

On considère que la source continue (V_{DC}) est parfaite et les tensions simples alimentant, le bobinage rotorique couplé en étoile, présentent un système triphasé équilibré.

$$V_{raN} + V_{rbN} + V_{rcN} = 0 \quad (2.32)$$

Les tensions composées obtenues à partir des tensions d'entrée de l'onduleur, référencées au point milieu fictif de la source continu, sont définis par:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{rab} = v_{ao} - v_{bo} \\ u_{rbc} = v_{bo} - v_{co} \\ u_{rca} = v_{co} - v_{ao} \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Le système d'équations (2.34) permet de déduire les tensions simples du rotor:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ao} = V_{raN} + V_{No} \\ V_{bo} = V_{rbN} + V_{No} \\ V_{co} = V_{rcN} + V_{No} \\ V_{No} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Une manipulation adéquate du système (2.35) permet de déduire l'écriture matricielle des tensions simples :

$$\begin{bmatrix} V_{raN} \\ V_{rbN} \\ V_{rcN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Les ordres de commande ON/OFF notés S_i sont définis par :

$$S_i = \begin{cases} 1 & ; K_{i1} = \text{ON et } K_{i2} = \text{OFF} \\ 0 & ; K_{i1} = \text{OFF et } K_{i2} = \text{ON} \end{cases} ; i = a, b, c. \quad (2.36)$$

A tout instant, la tension modulée est liée aux fonctions de conversion S_i du bras i par [24]:

$$v_{io} = \frac{V_{DC}}{2} (2 S_i - 1) \quad (2.37)$$

En remplaçant (2.37) dans (2.35), le système (2.38) élabore le modèle matriciel de l'onduleur en modulation MLI:

$$\begin{bmatrix} V_{raN} \\ V_{rbN} \\ V_{rcN} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

2.5.1.1 La commande MLI d'onduleur

La modulation triangulosinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire à haute fréquence, porteuse à un signal sinusoïdal de référence à basse fréquence.

La commande MLI présente l'avantage d'une fréquence constante de commutation qui est fixée par la fréquence de l'onde porteuse. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [25]:

- L'indice de modulation « m' » est le rapport entre la fréquence de porteuse f_p sur la fréquence de référence $f_{réf}$.

$$m' = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (2.39)$$

- Le coefficient de réglage en tension « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence $V_{réf}$ et celle de la porteuse V_p .

$$r = \frac{V_{réf}}{V_p} \quad (2.40)$$

2.5.2 Modélisation du redresseur côté réseau (CCR)

La tension d'alimentation V_{DC} de l'onduleur associé à la MADA est générée par une cascade composée par un étage redresseur à diodes ; est montré sur la figure (2.8).

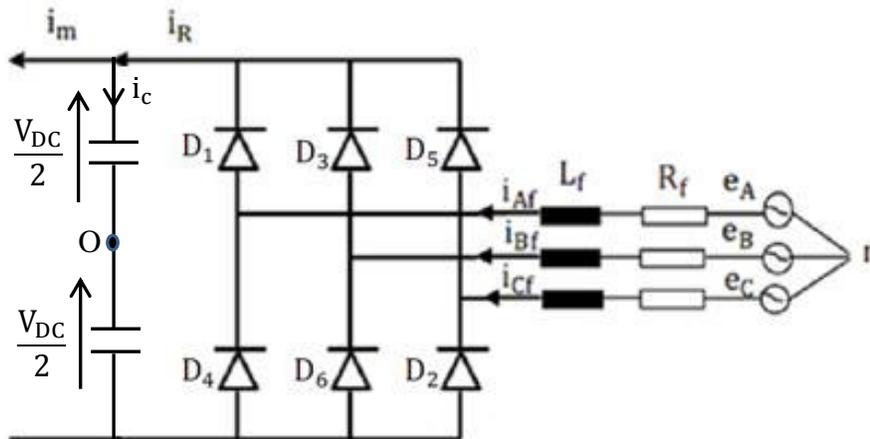


Fig.2.8: Configuration du convertisseur côté cote réseau (CCR).

Les interrupteurs de ce redresseur sont des diodes, qui commutent le courant naturellement entre elles. En effet, le courant dans chaque semi-conducteur s'annule de lui-même à la fin de l'intervalle de conduction, ou bien s'annule automatiquement du fait de l'entrée en conduction du semi-conducteur suivant [26].

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1, D_3, D_5) à cathode commun assurant l'aller du courant de redresseur i_R , et trois diodes (D_2, D_4, D_6) à anode commun assurant le retour du courant de redresseur i_R .

Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A(t) = V_m \sin(2\pi ft). \\ e_B(t) = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right). \\ e_C(t) = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{4\pi}{3}\right). \end{array} \right. \quad (2.41)$$

Et si on néglige d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit [26]:

$$V_{DC} = \max(e_A, e_B, e_C) - \min(e_A, e_B, e_C). \quad (2.42)$$

2.6 Conclusion

Ce chapitre traite la modélisation et l'analyse d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, basé sur la machine asynchrone doublement alimentée (MADA). La modélisation des différents organes a été élaborée afin de mettre en évidence toutes les interactions entre les modèles du système. On a présenté la mise en équation de la partie mécanique, à savoir la turbine tripale à axe horizontale et le multiplicateur à deux masses intercalé entre cette dernière et la génératrice, pour adapter les deux vitesses (lente et rapide). La modélisation de la MADA dans le plan triphasé et biphasé est mise en œuvre. On termine par la modélisation des convertisseurs coté machine (CCM) et le convertisseur coté réseau (CCR).

3.1 Introduction

Le dispositif de commande du système de conversion éolien, à base de la MADA, connecté au réseau est présenté sur la figure (3.1).

Il est constitué principalement de deux blocs de contrôle :

- bloc de contrôle de la turbine.
- bloc de contrôle du convertisseur coté rotor de la MADA.

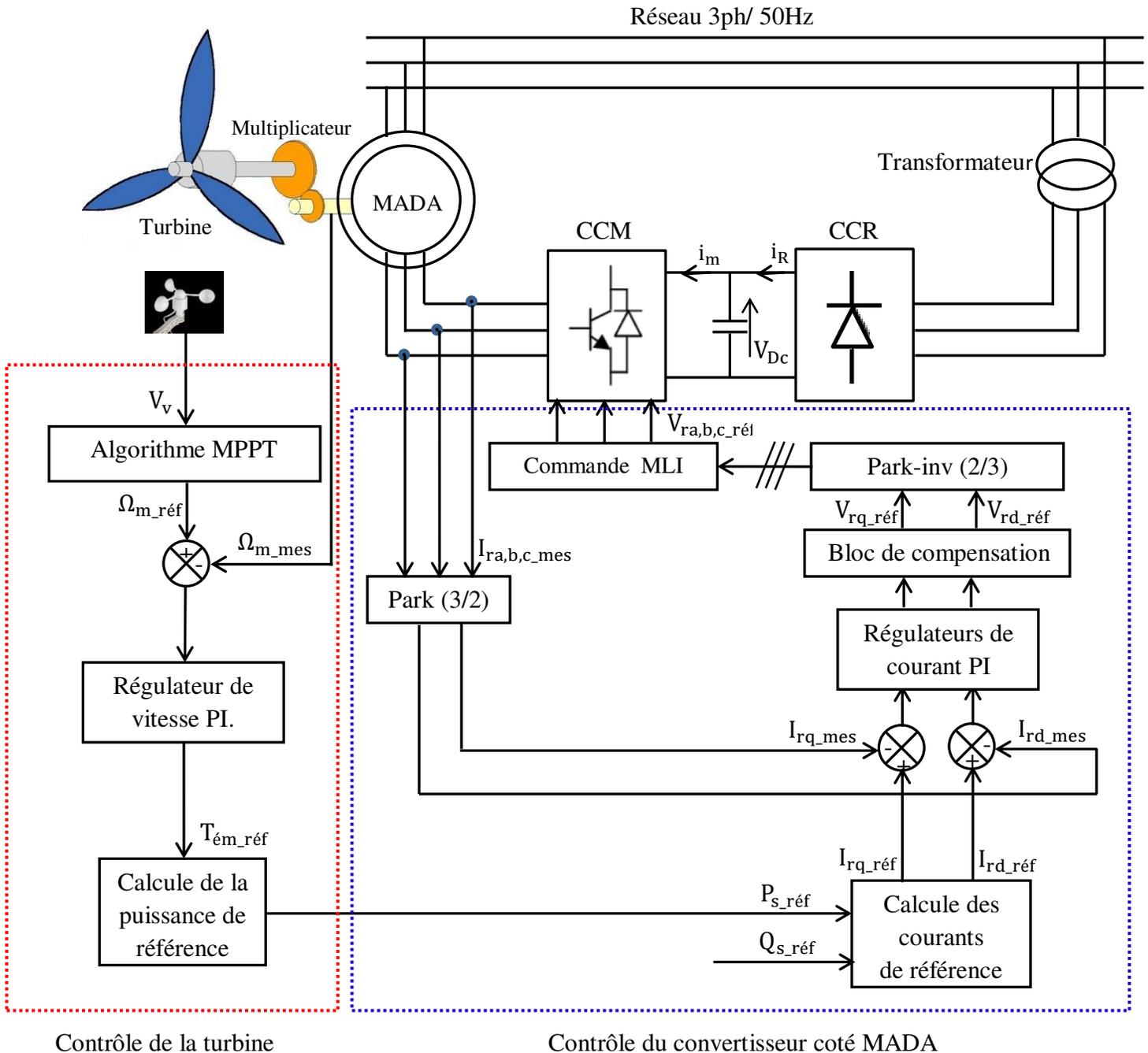


Fig.3.1: Synoptique de contrôle du system de conversion éolien.

Le but envisagé via la conception des lois de commandes proposées dans ce chapitre vise :

- La maximisation du rendement aérodynamique par application d'algorithme MPPT.
- Contrôle découplé des puissances active et réactive coté stator de la machine double alimentée (MADA) en commandant le convertisseur coté rotor.

3.2 Caractéristiques puissance-vitesse de l'éolienne

Sur la figure (3.2) est illustrée une courbe typique de la variation de la puissance aérodynamique comme fonction de la vitesse du vent, où on distingue trois zones principales de fonctionnement [20]:

- Zone A : l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement.

Le démarrage de l'aérogénérateur s'effectue au-delà d'une vitesse minimale du vent $V_{V-cutin}$.

- Zone B: correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut optimiser le rendement énergétique. Ainsi la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir sur le point de fonctionnement qui correspond au coefficient C_{p_max} .

- Zone C : arrivée à la puissance nominale pour des grandes valeurs de vitesses, une limitation de la puissance générée est alors effectuée. Au-delà d'une vitesse du vent $V_{V-cutoff}$, un dispositif d'urgence est activé pour arrêter le fonctionnement du système de manière à éviter une rupture mécanique.

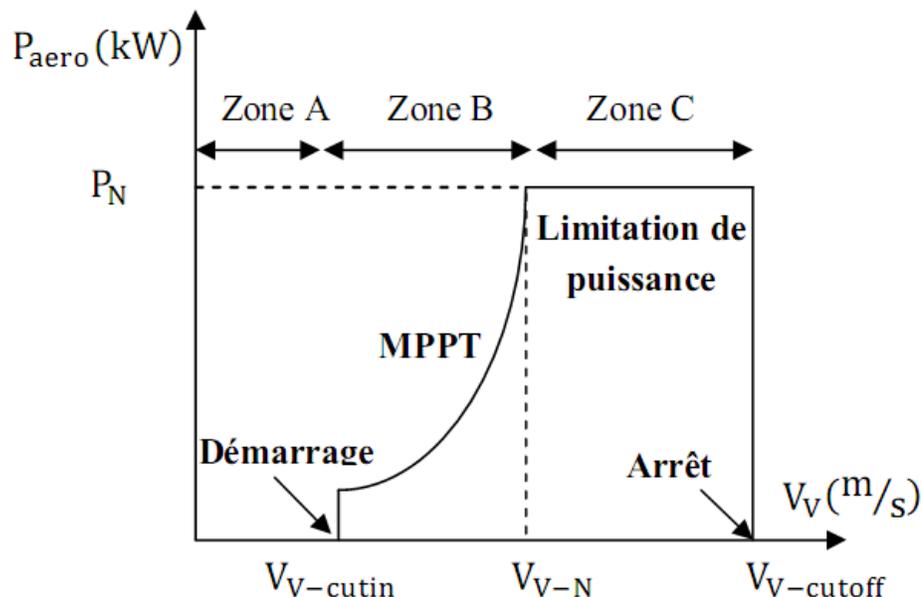


Fig.3.2: Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur [20].

3.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

L'ensemble des caractéristiques, donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent, est illustré sur la figure (3.3). A partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe, les maximums théoriques des courbes de puissance ne seront pas exploités. Afin d'assurer un fonctionnement optimal de la génératrice éolienne en zone B, il est nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant la poursuite des points de puissance maximale, dite MPPT (en anglais) basées sur un fonctionnement à vitesse variable. Ces algorithmes de poursuite sont élaborés avec une caractéristique de la voilure identifiée ou non.

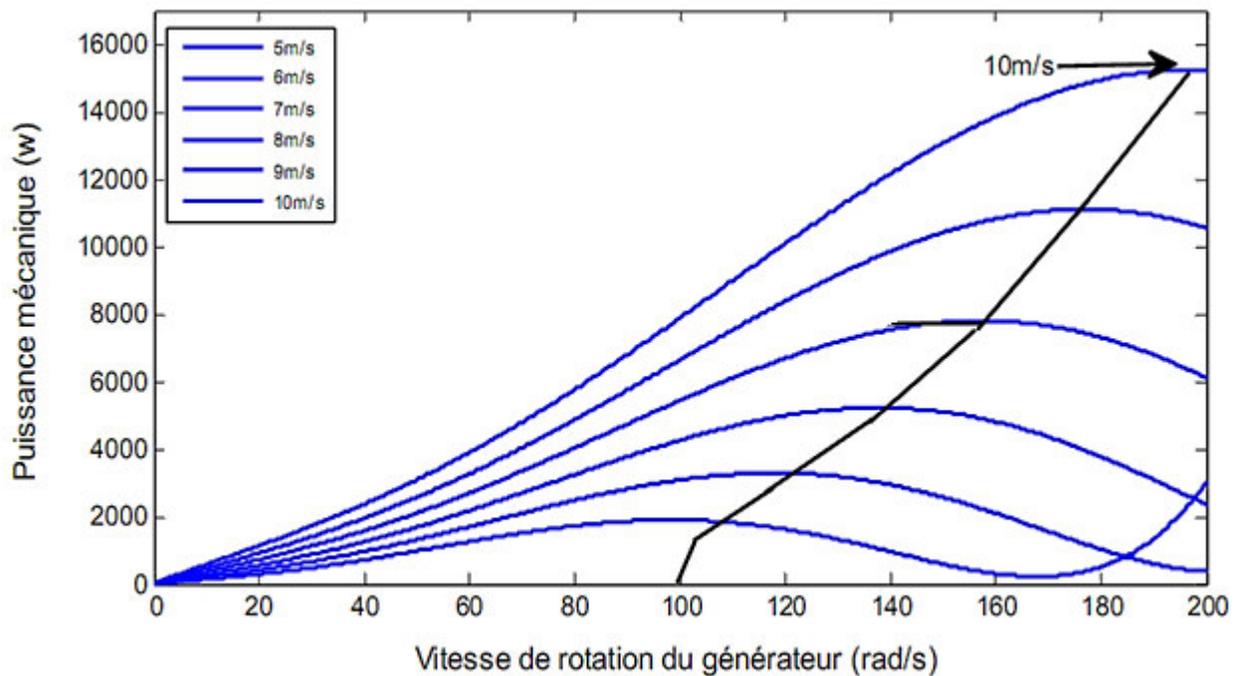


Fig.3.3: Caractéristiques puissance-vitesse d'un aérogénérateur à vitesse variable [20].

3.3.1 Algorithmes MPPT classiques

Pour ce type d'optimisation, deux familles de structures de commande sont distinguées :

- Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle par asservissement du couple électromagnétique.

On a choisi la première méthode.

3.3.1.1 MPPT avec commande en vitesse

Pour cette technique, un régulateur de vitesse est incorporé, comme montré sur la figure (3.4).

L'objectif est de faire varier la vitesse de la turbine de manière à réguler la vitesse spécifique λ à sa valeur optimale λ_{opt} , permettant ainsi de fixer le coefficient de puissance à sa valeur maximale.

On déduit des équations (2.2) et (2.3), la vitesse de la turbine de référence à imposer et la puissance maximale extraite en remplaçant les valeurs optimales du ratio de vitesse λ_{opt} et du coefficient de puissance C_{P_max} :

$$\Omega_{t_réf} = \frac{\lambda_{opt} V_V}{R_t} \quad (3.1)$$

La vitesse de référence (coté machine) est alors déduite comme suit :

$$\Omega_{m_réf} = G_t \Omega_{t_réf} \quad (3.2)$$

La puissance aérodynamique maximale extractible du vent peut s'écrire sous la forme :

$$P_{aéro_max} = 0.5 \rho \pi R_t^2 V_V^3 C_{p_max} \quad (3.3)$$

Il est à signaler que ce type de contrôle est généralement implémenté du coté machine, et le régulateur de vitesse fournit le couple électromagnétique nécessaire pour maintenir la vitesse de référence. La figure (3.4) montre la structure de la commande en vitesse réalisé dans la zone B.

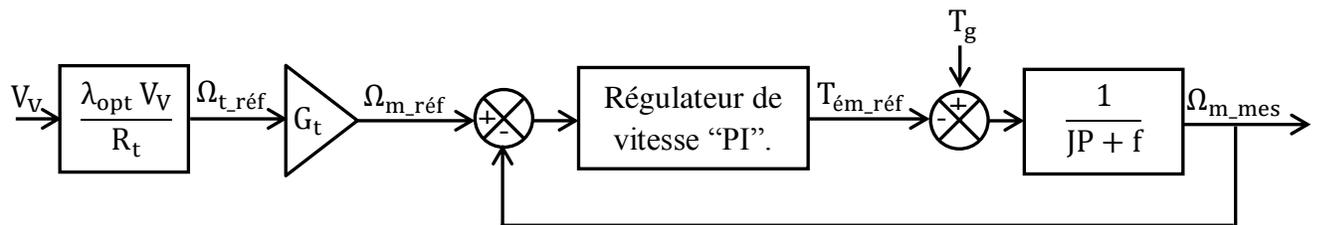


Fig.3.4: Schéma bloc de la commande en vitesse dans la zone B.

Différents correcteurs peuvent être considérés pour ce type de commande [27]. Dans ce manuscrit on propose un correcteur proportionnel-intégral.

Bien que cette méthode soit simple à implémenter, l'inconvénient majeur réside d'une mesure erronée de la vitesse du vent par l'anémomètre du fait qu'il est placé derrière le rotor de la turbine, ce qui conduit à une dégradation de la puissance captée [28].

- **Le calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI**

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit [20]:

$$FTBO = \left(K_p + \frac{K_i}{P} \right) \left(\frac{1}{JP+f} \right) = \frac{K_p}{P} \left(P + \frac{K_i}{K_p} \right) \left(\frac{1}{P + \frac{f}{J}} \right) \quad (3.4)$$

Par la méthode de compensation des pôles:

On pose $P + \frac{K_i}{K_p} = \frac{f}{J} + P$

Alors la $FTBO = \frac{K_p}{P} \left(\frac{1}{J} \right)$

En déduit la fonction de transfert en boucle fermée comme suit:

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} = \frac{\frac{K_p}{P} \left(\frac{1}{J} \right)}{1 + \frac{K_p}{P} \left(\frac{1}{J} \right)} \quad (3.5)$$

Alors $FTBF = \frac{\frac{K_p}{J}}{P + \frac{K_p}{J}} = \frac{1}{1 + \frac{K_p P}{J}} = \frac{1}{1 + \tau_r P}$

De ce qui précède on a: $\frac{K_i}{K_p} = \frac{f}{J}$, $\frac{J}{K_p} = \tau_r$

D'où : $K_p = J/\tau_r$, $K_i = f/\tau_r$ (3.6)

Avec: τ_r une constante de temps choisie.

3.4 La commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs couple et flux. En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit, pour un flux constant [29].

3.4.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle des machines électriques à courant alternatif est une technique qui vise à retrouver le découplage qui caractérise la machine à courant continu à excitation séparée pour laquelle le courant inducteur contrôle le flux et celui de l'induit contrôle le couple, de la même manière, l'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux de telle sorte que le flux soit régulé par la

composante directe du courant statorique ou rotorique (selon l'orientation choisie) et le couple par la composante en quadrature. Ainsi, la commande de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée [30].

De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

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

3.4.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Avec un flux statorique constant et orienté à l'axe d, $\Phi_s = \Phi_{sd}$ et $\Phi_{sq} = 0$, les équations (2.22) peuvent se simplifier sous la forme suivante [31]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques R_s , hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [32]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} = 0 \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$T_{em} = p \frac{V_s}{\omega_s} I_{sq} \quad (3.10)$$

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

- **Expressions des puissances actives et réactives statoriques**

Les puissances active et réactive statorique, s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonctions des courants statoriques en quadrature I_{sq} et directe I_{sd} , nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions (3.9) des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{array} \right. \quad (3.13)$$

En remplaçant les deux composantes du courant statorique par leurs expressions dans les équations (3.12) des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.14)$$

Il ressort de l'expression (3.14) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau [15].

- **Expressions des tensions rotoriques**

Exprimant d'abord les flux rotoriques d'après les équations (3.9), en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (3.13)

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \end{cases} \quad (3.15)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système d'équations (3.8), on trouve.

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + p \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + p \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.16)$$

A partir des systèmes d'équations (3.14) et (3.16), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc sur la figure (3.5).

L'expression $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre [15].

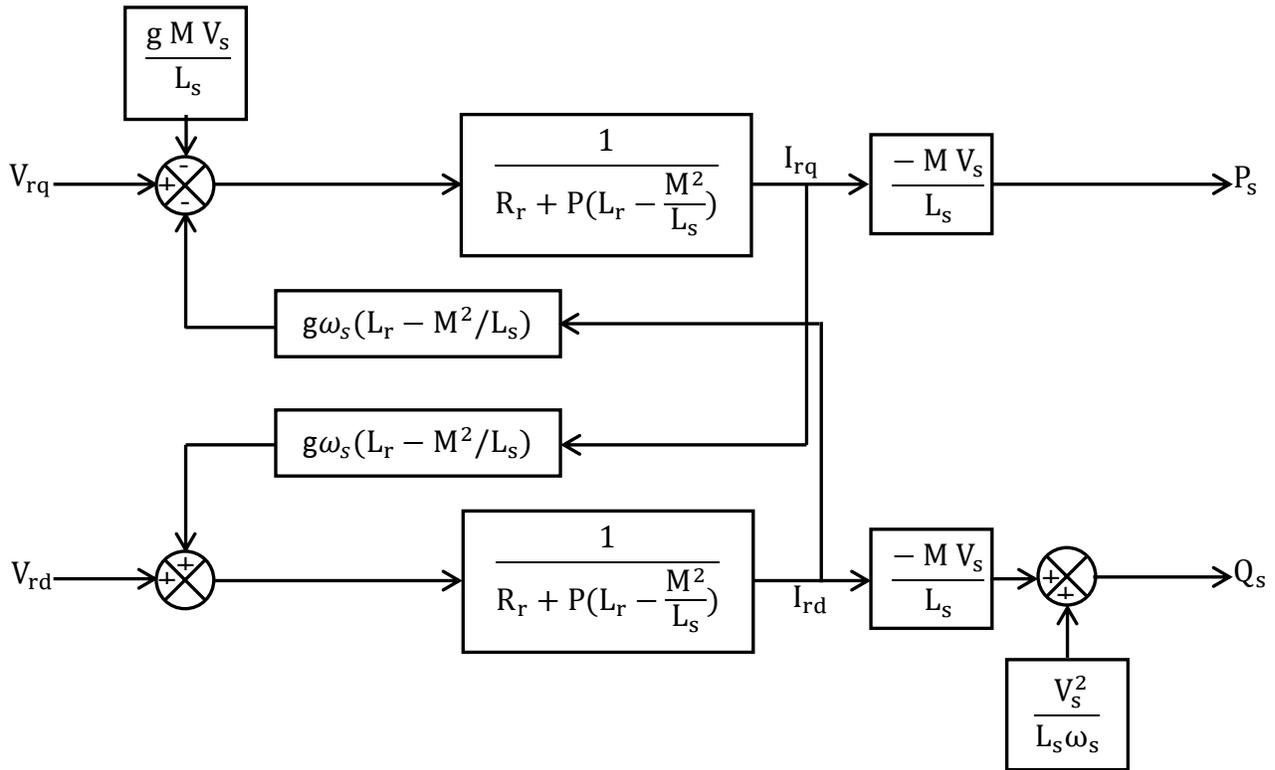


Fig.3.5: Modèle de la MADA pour le contrôle découplage des puissances.

3.4.3 Contrôle indépendant des puissances actives et réactives

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances actives et réactives de référence [15].

3.4.3.1 Commande indirecte

- **Commande sans régulateur de puissance**

La commande sans régulateur de puissance est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances, mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statorique du système d'équations (3.14) on déduit les références des courants rotoriques direct et en quadrature suivant les relations suivante.

$$\begin{cases} I_{rq_réf} = -\frac{L_s}{M V_s} P_{s_réf} \\ I_{rd_réf} = -\frac{L_s}{M V_s} Q_{s_réf} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (3.17)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances actives et réactives, la figure (3.6) schéma bloc de la commande indirecte son régulateur de puissances.

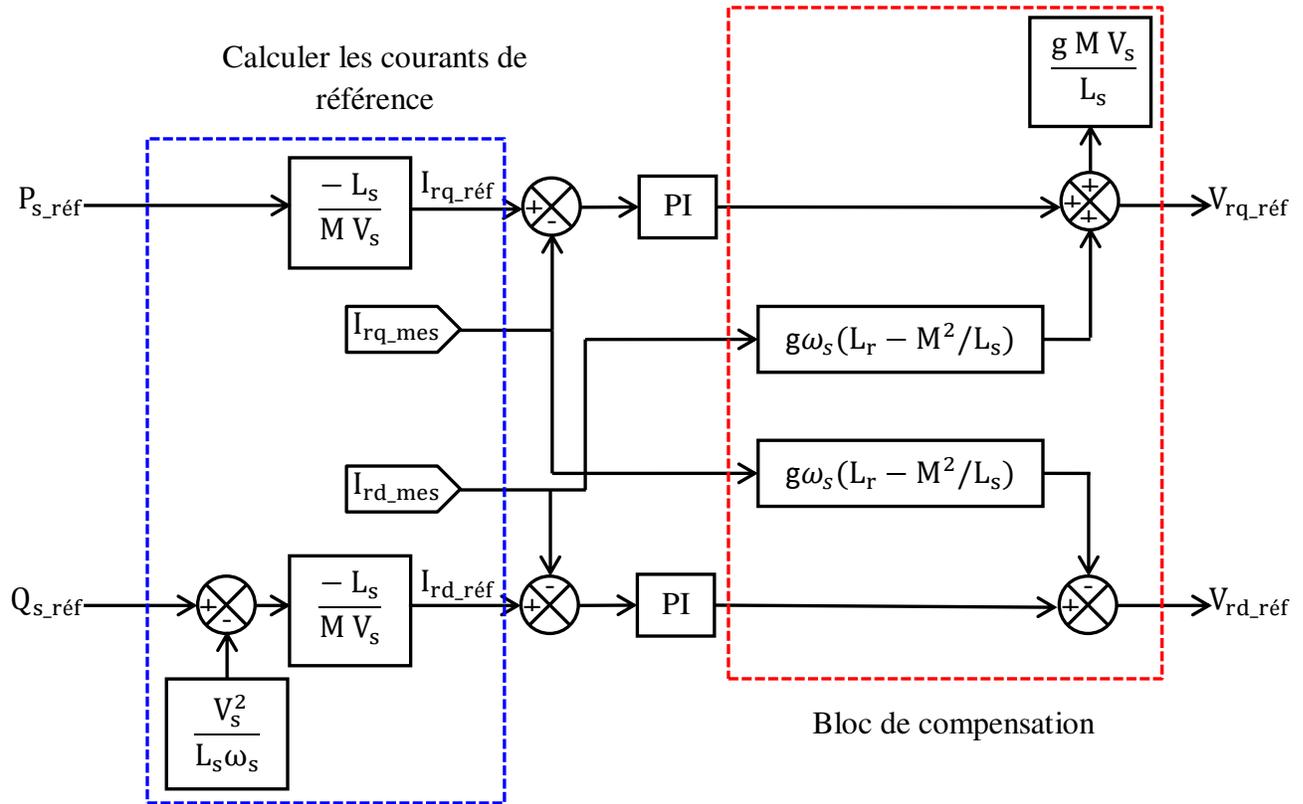


Fig.3.6: Schéma bloc de la commande indirecte sans régulateur de puissances.

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 actives et réactives.

3.4.4 Le calcul des paramètres du régulateur PI

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 $K_p + \frac{K_i}{p}$. La figure (3.7) montre le système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité [15].

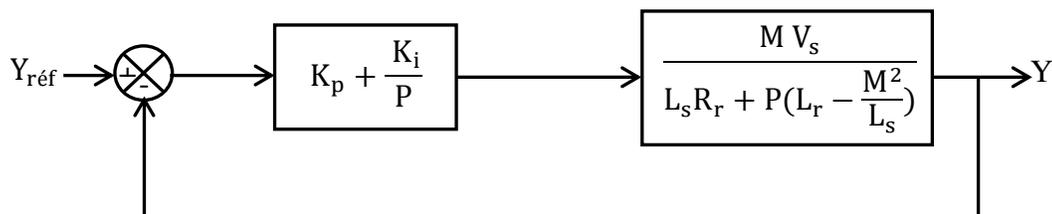


Fig.3.7: Système régulé par un régulateur PI.

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

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (3.18)$$

La méthode de compensation des pôles est choisie pour la synthèse des régulateurs [10]. Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.19)$$

Il est à noter 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 en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (3.20)$$

En déduit la fonction de transfert en boucle fermée:

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} = \frac{1}{1 + \tau_r p} \text{ Avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (3.21)$$

Le temps de réponse τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performance et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables [15].

Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{M V_s} \end{cases} \quad (3.21)$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le contrôle de la chaîne de conversion éolienne est analysé suivant deux volets:

Dans une première partie: une discussion sur la caractéristique de la puissance optimale de l'éolienne qui montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation optimale, correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible, pour ce faire un algorithme MPPT par la commande en vitesse est choisie.

Dans une deuxième partie: une étude et une modélisation de la commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation puissance active et réactive.

4.1 Introduction

Pour compléter l'étude théorique présentée précédemment et valider les algorithmes des commandes, on présente dans cette partie les résultats de simulation numérique illustrant le comportement de la structure de commande découplée des puissances actives et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA), avec un bloc MPPT qui sert à donner la référence de la puissance active en considérant les pertes dans le système comme négligeables.

Ce système a été simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK et les simulations conduites servent à remplir les objectifs suivants:

- L'extraction maximale de la puissance aérodynamique par algorithme MPPT.
- Un contrôle vectoriel de la MADA en fonctionnement sous synchronisme.
- Un contrôle découplé des puissances actives et réactive, à travers les courants rotoriques en quadrature et directe.

(Les paramètres de la MADA et de la turbine sont donnés en annexe).

4.2 Simulation de la commande indirecte sans régulateur de puissance.

Les figures suivantes représentent les différentes courbes obtenues par la commande découplée des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la machine asynchrone doublement alimentée (MADA).

La figure (4.1) montre le schéma bloc de la simulation de la commande indirecte sans régulateur de puissances.

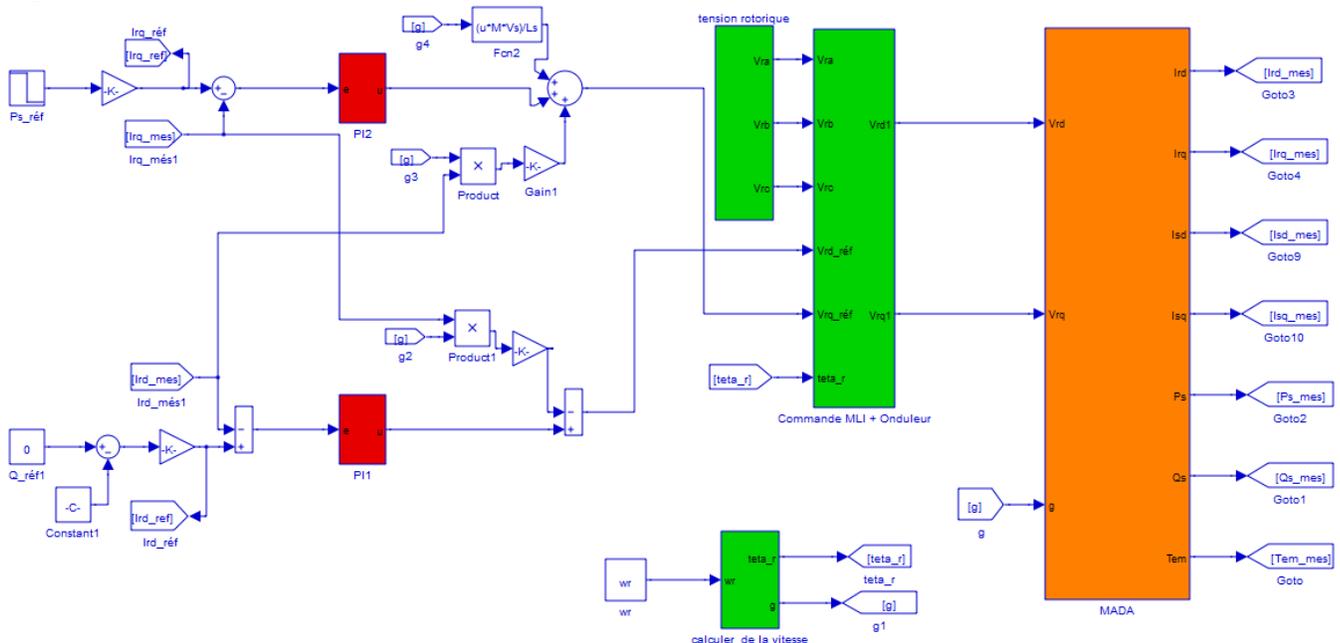


Fig.4.1: Schéma bloc de la simulation de la commande indirecte sans régulateur de puissance.

On a procédé aux essais suivant pendant une durée de 2s dans l'application d'une commande indirect. Le rotor de la machine est entraînée a une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min, on utilise les valeurs des puissances active et réactive dans le tableau suivant :

t(s)		$P_{s_réf}$ (W)	$Q_{s_réf}$ (VAR)
de	à		
0	1	-500	0
1	1.5	-1000	0
1.5	2	-1000	-500

4.2.1 Résultats de simulation sans onduleur

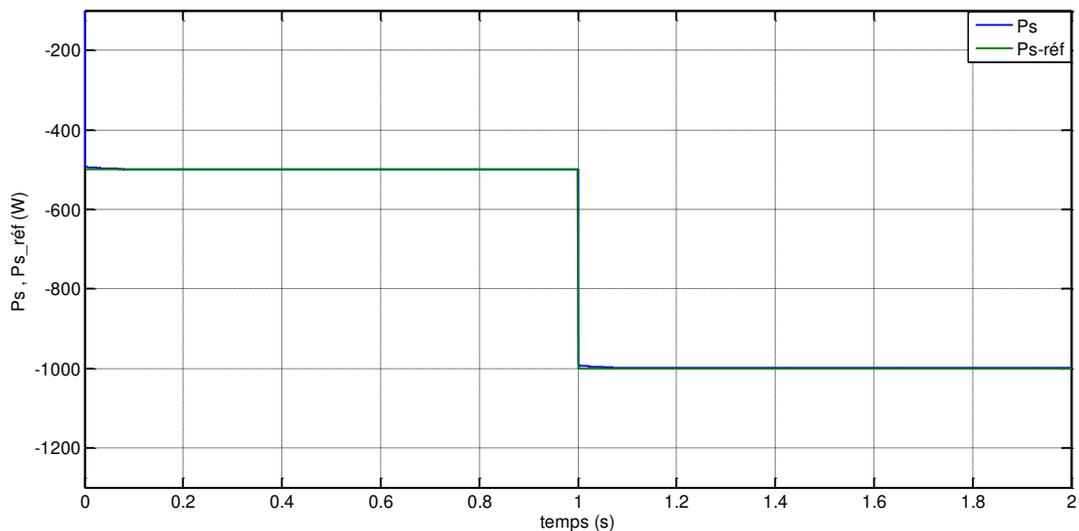


Fig.4.2: Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence.

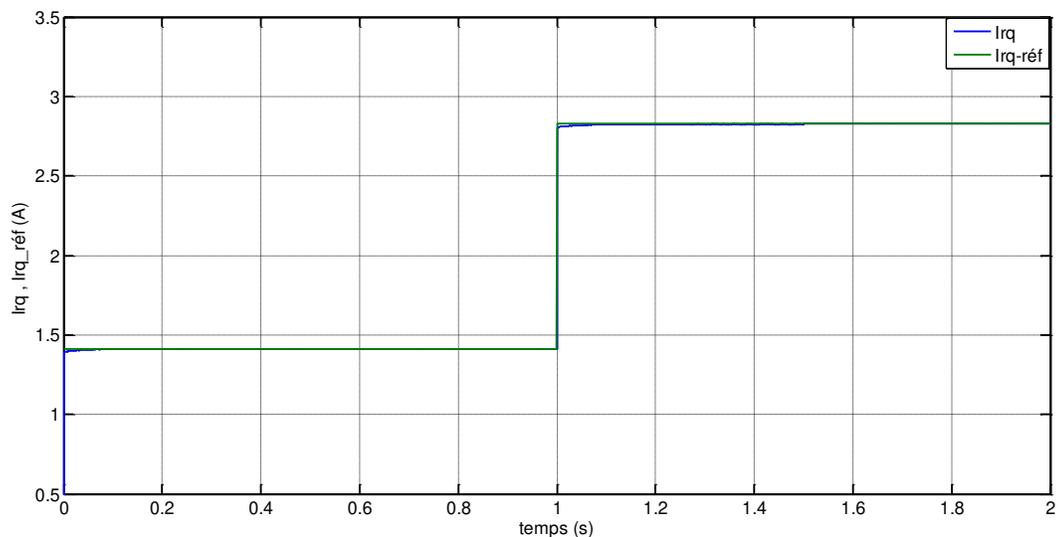


Fig.4.3: Allure du courant rotorique quadrature mesuré et de référence.

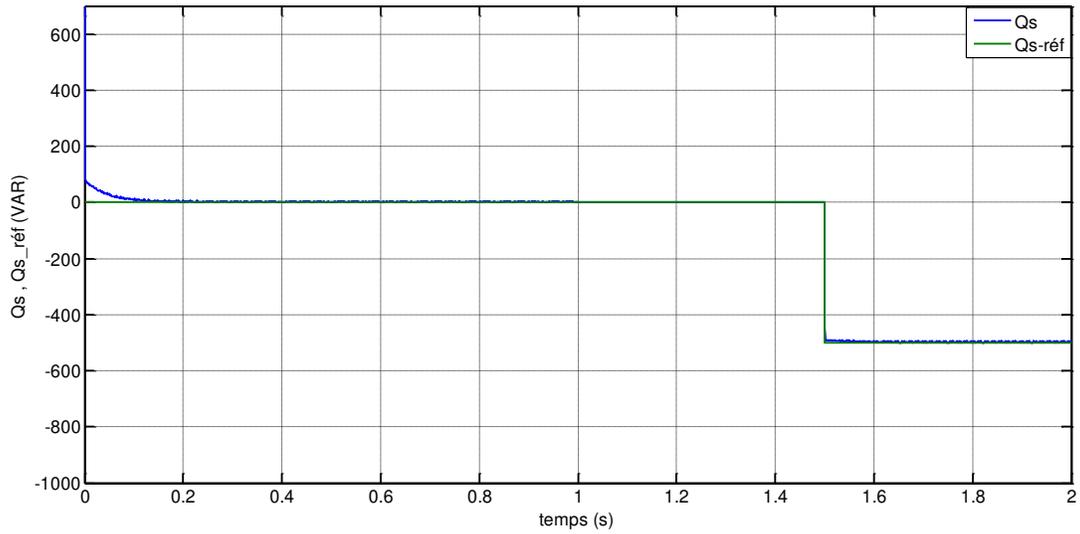


Fig.4.4: Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence.

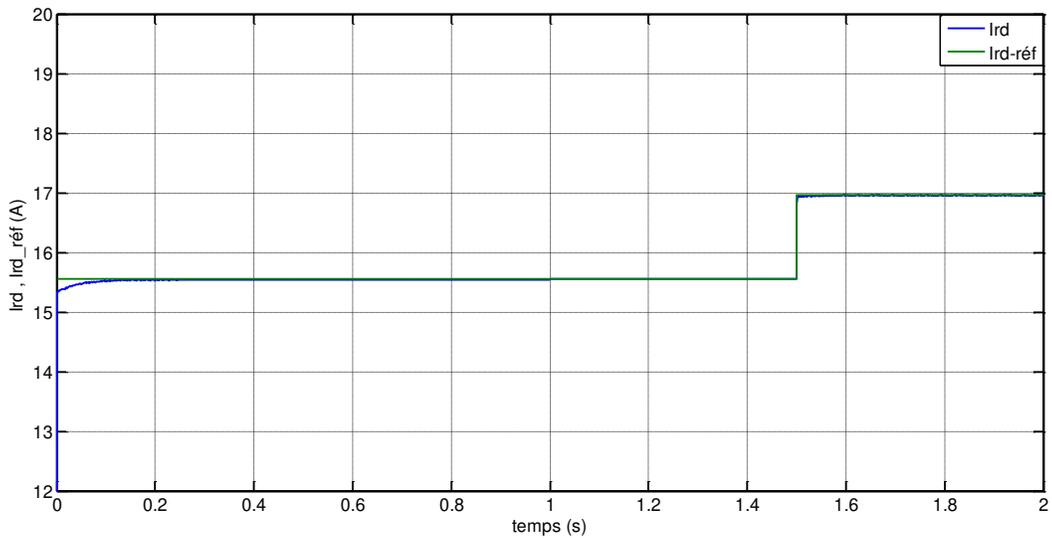


Fig.4. 5: Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence.

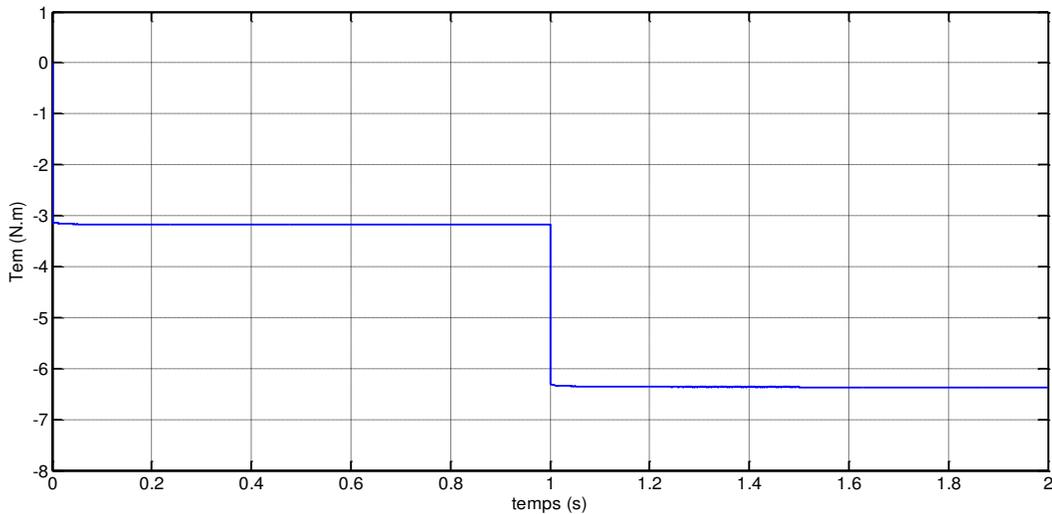


Fig.4.6: Allure du couple électromagnétique.

4.2.2 Résultats de simulation avec onduleur

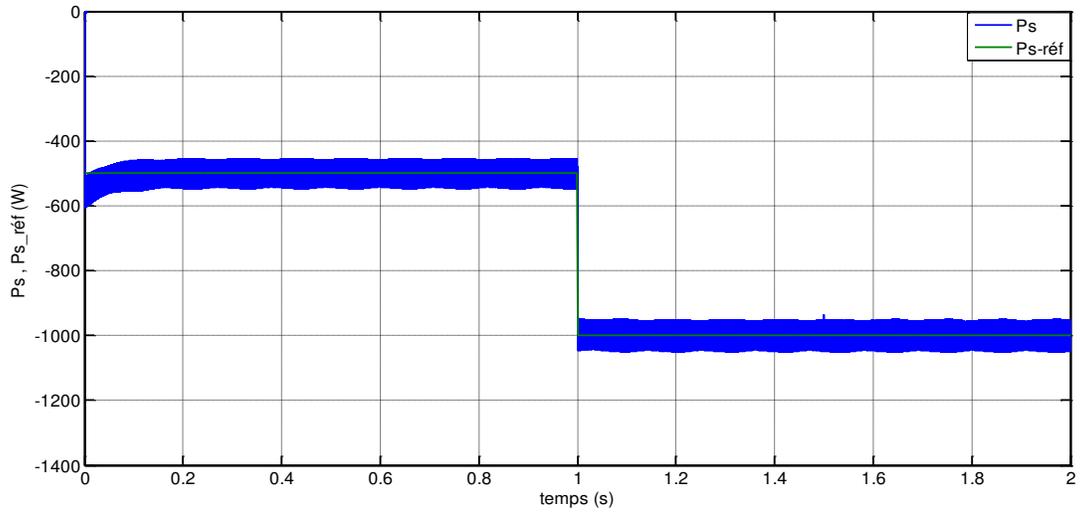


Fig.4.7: Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence.

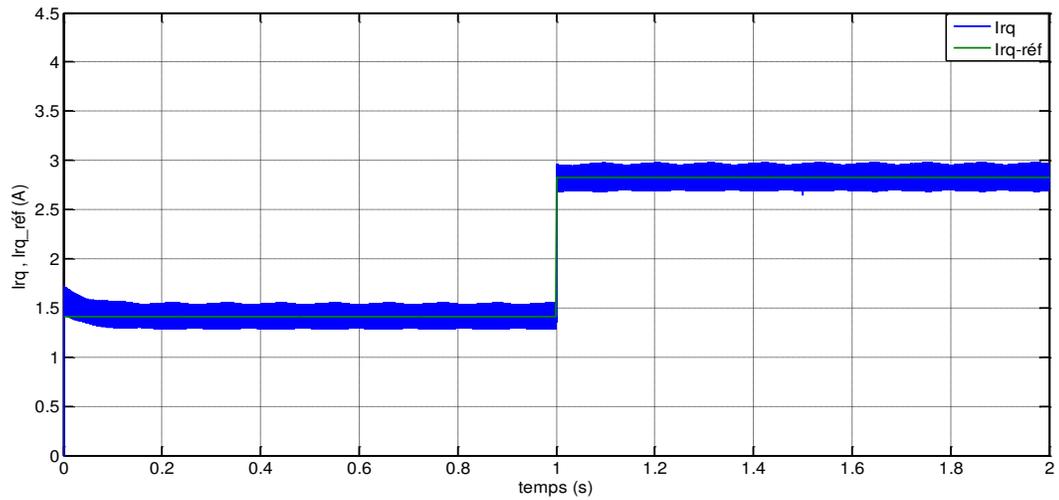


Fig.4.8: Allure du courant rotorique quadrature mesuré et de référence.

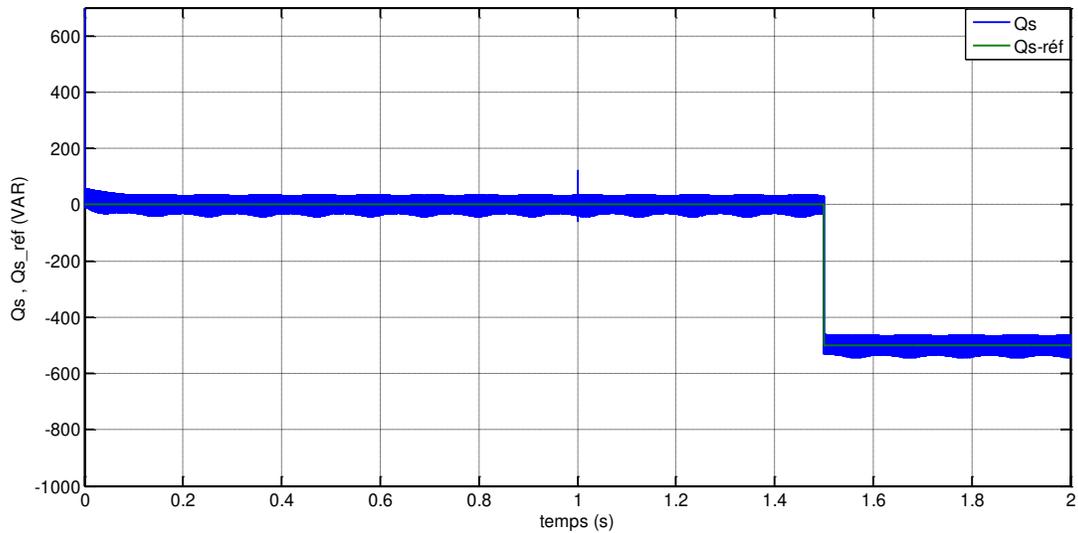


Fig.4.9: Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence.

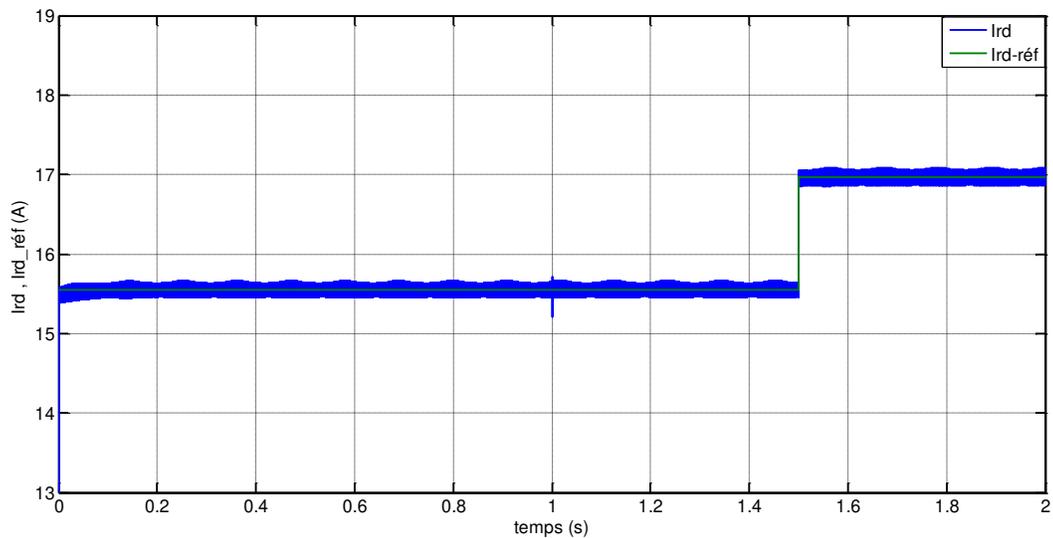


Fig.4.10: Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence.

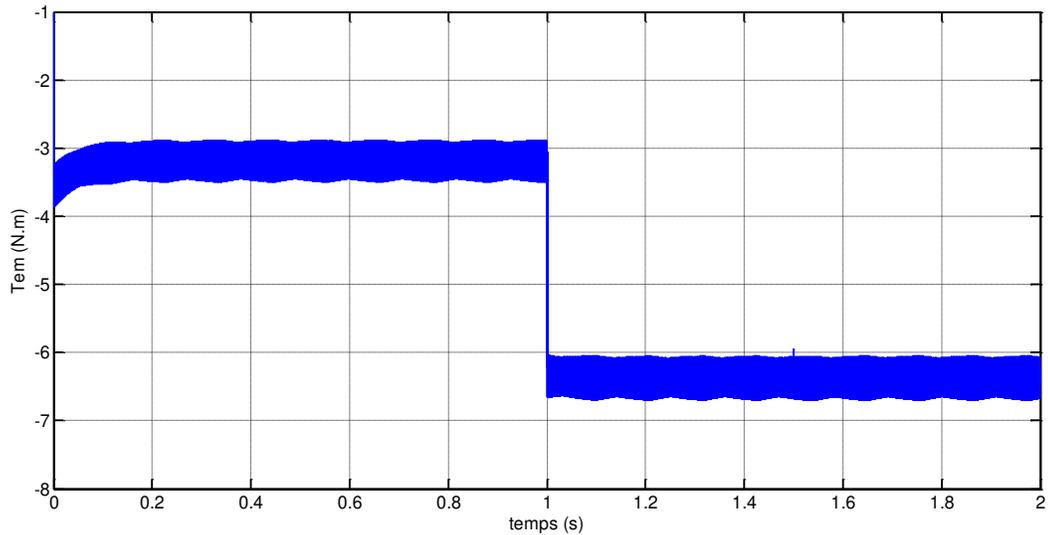


Fig.4.11: Allure du couple électromagnétique.

4.2.3 Interprétation des résultats

Les échelons de références de puissances imposées à la MADA sont bien suivis, on remarque que l'amplitude des courants et les puissances mesurées suivent l'application des valeurs de référence des puissances active et réactive.

Les résultats obtenus sont bien régulés en régime permanent, et les oscillations de forte amplitude en régime transitoire sont réduites, les résultats obtenus montrent bien les grandes performances de réglage par des régulateurs PI, dans les deux cas sans et avec onduleur.

La commande indirecte présente un bon découplage au réglage des puissances active et réactive, ainsi qu'un meilleur suivi des courants rotoriques par rapport à leurs références, dont la puissance

active P_s et réactive Q_s sont proportionnelles à la composante en quadrature et directe du courant rotorique (I_{rq} , I_{rd}) respectivement.

La composante en quadrature du courant rotorique I_{rq} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe I_{rd} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

De plus on remarque les oscillations des différentes grandeurs, en présence de l'onduleur, dues à la fréquence de découpage de la commande MLI.

4.3 Simulation de la chaîne de conversion éolienne

Le schéma bloc de cette simulation est montré sur la figure (4.12).

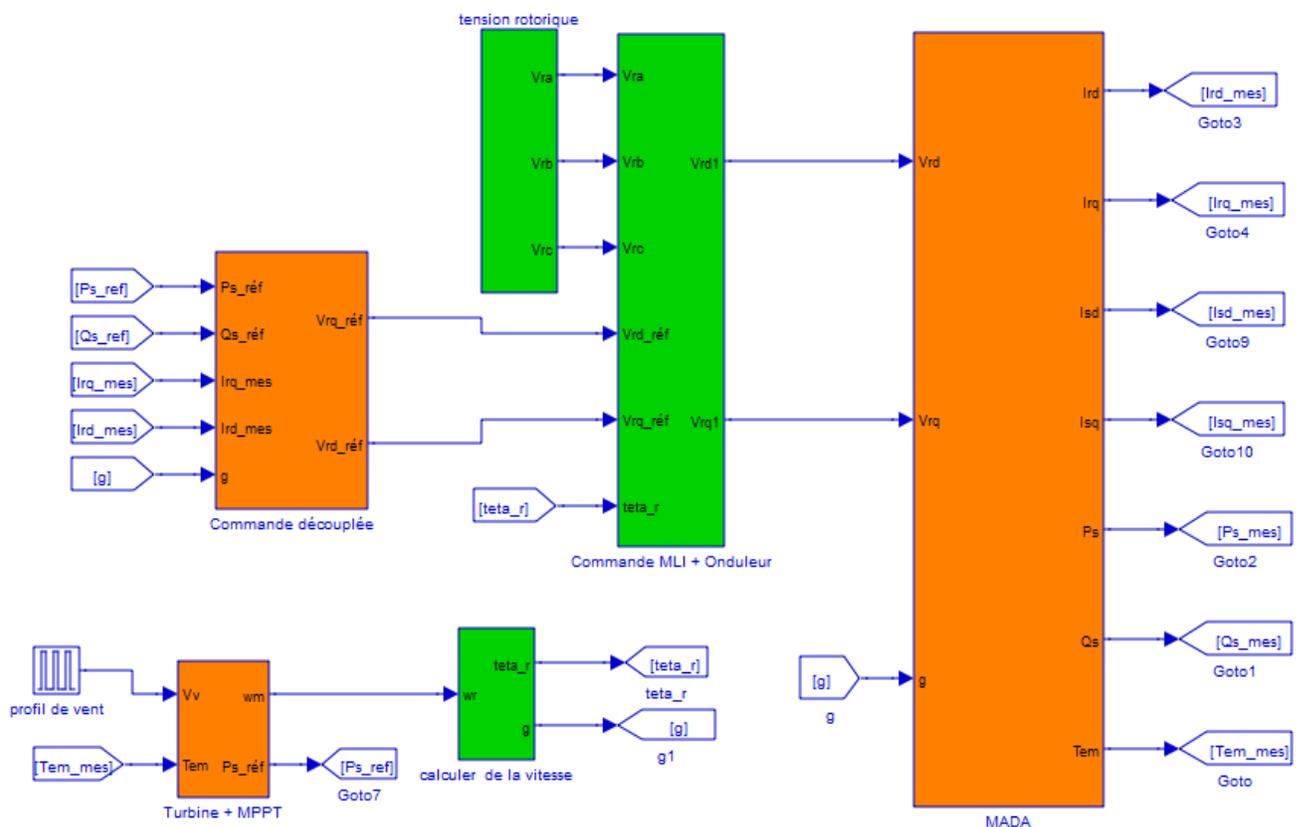


Fig.4.12: Schéma bloc de la simulation de la chaîne de conversion éolienne, à base de la MADA.

4.3.1 Résultats de simulation

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation avec la machine asynchrone doublement alimentée (MADA) de puissance nominale 7.5 kW, et une turbine tri pales à axe horizontale.

4.3.1.1 Résultats de simulation avec vitesse de vent fixe à 7.62 m/s

Dans cette section, on procède à la simulation de la partie mécanique du système éolien en utilisant les modèles mathématiques établis précédemment, englobant le modèle de la turbine, le multiplicateur de vitesse et l'arbre mécanique. La vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la MADA constituent les entrées du système, tandis que la puissance aérodynamique et la vitesse mécanique forment les sorties. Les séries de simulations ont été conduites pour une vitesse du vent de 7.62 (m/s).

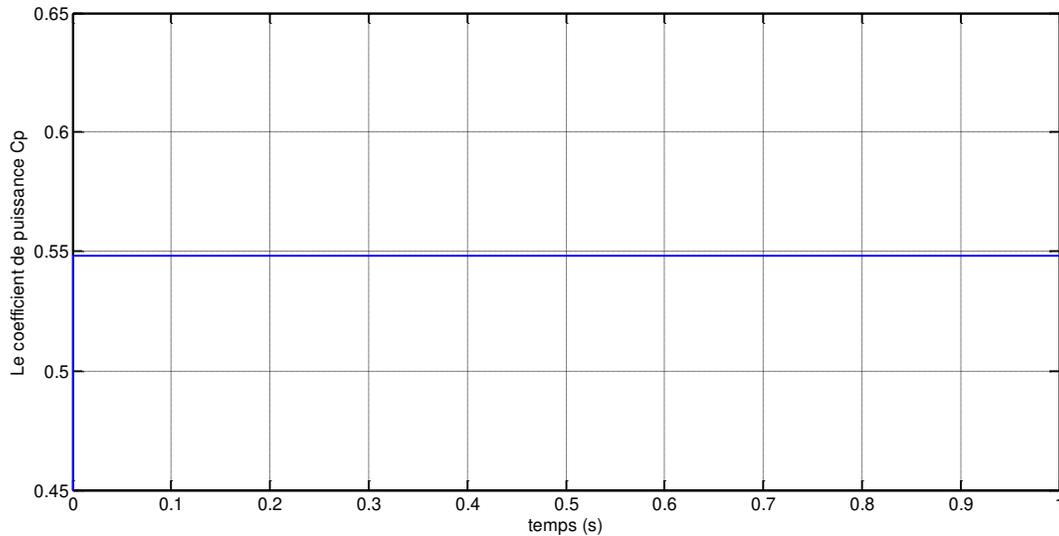


Fig.4.13: Allure du coefficient de puissance de la turbine.

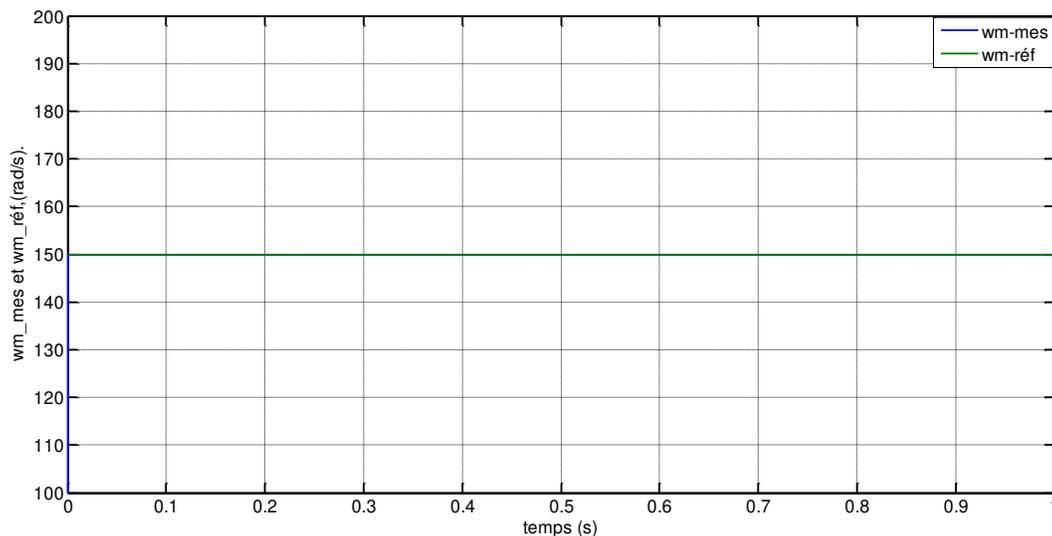


Fig.4.14: Allure de la vitesse mécanique de la machine mesurée et de référence.

Sur la figure (4.13) sont illustrées les performances issues de l'application de l'MPPT classique avec commande en vitesse. Il est à rappeler que pour cette technique, une vitesse de référence est obtenue en connaissance de la caractéristique de la voilure $C_p=f(\lambda)$.

De ces allures, les remarques suivantes sont extraites :

La figure (4.14) montre un très bon suivi de la référence de vitesse, ce qui permet d'extraire le maximum de la puissance aérodynamique de la turbine et par suite, le coefficient de puissance est maintenu à sa valeur optimale ($C_p=0.5479$), comme le montre la figure (4.13).

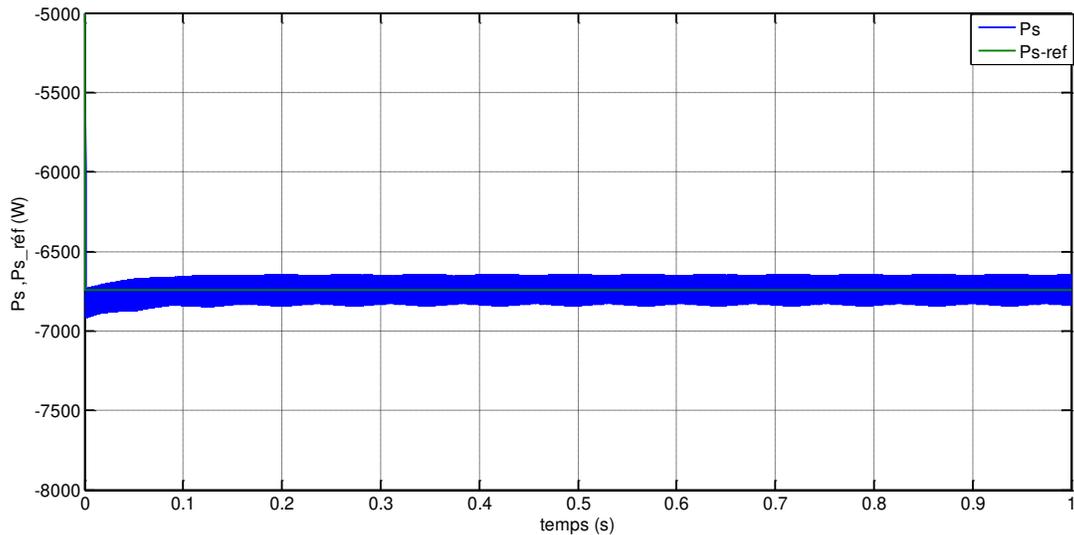


Fig.4.15: Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence.

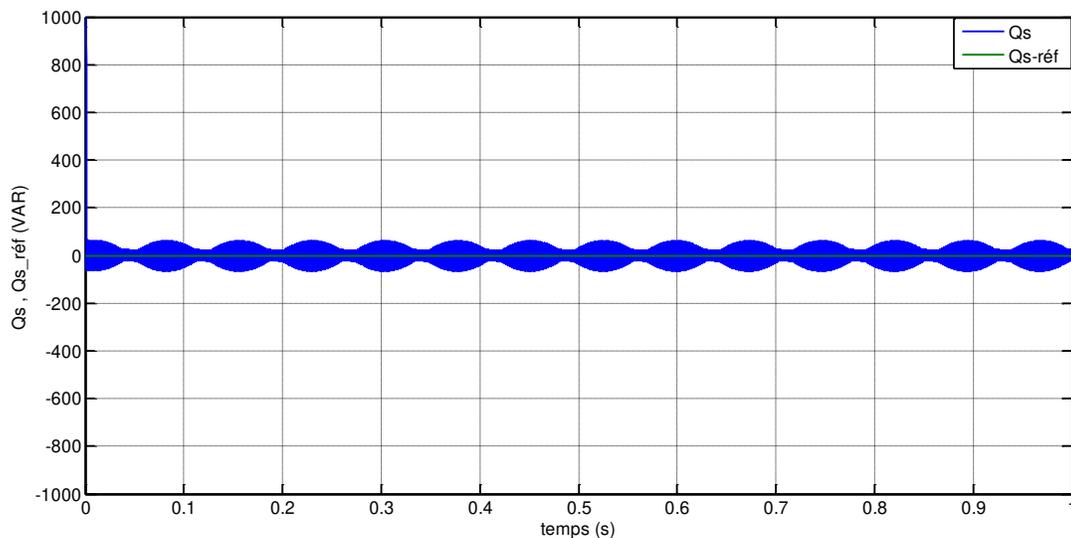


Fig.4.16: Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence.

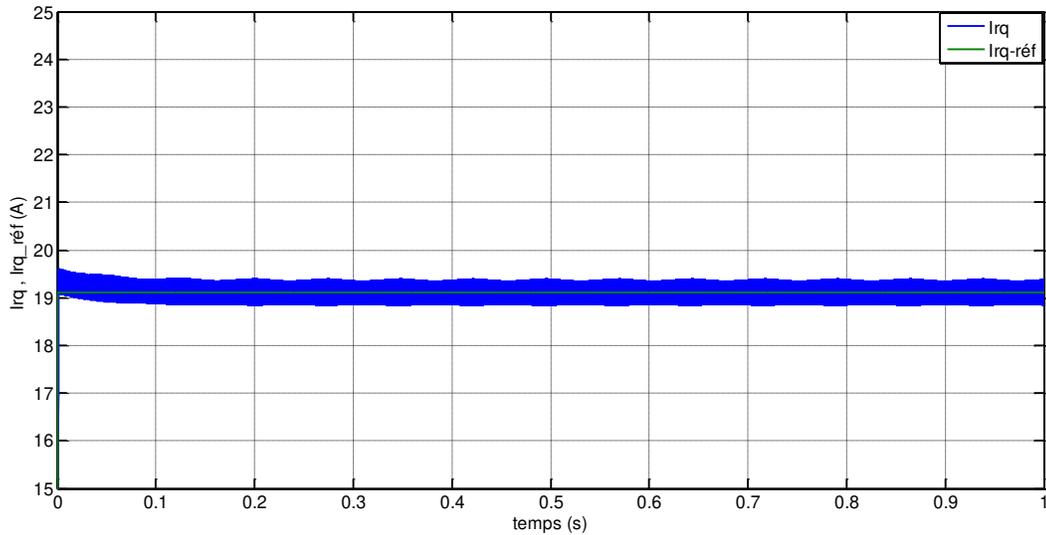


Fig.4.17: Allure du courant rotorique en quadrature mesuré et de référence.

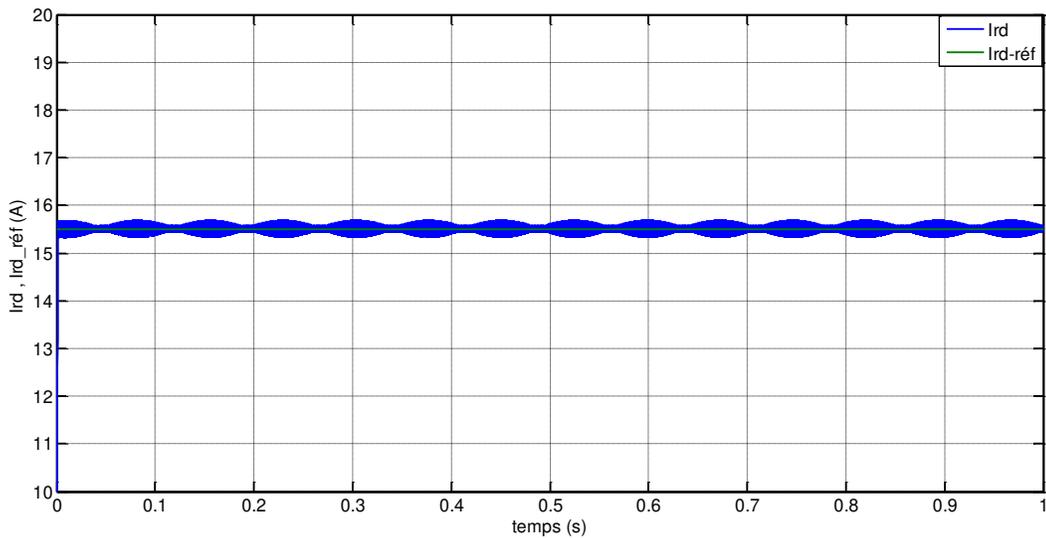


Fig.4.18: Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence.

Sur les figures (4.15) et (4.16) sont illustrés les résultats de la puissance active et réactive en appliquant les régulateurs PI.

De ces résultats, les remarques suivantes sont extraites :

- une robustesse notable vis-à-vis de la poursuite des consignes.
- un découplage parfait entre les deux axes est respecté.

De même, sur les figures (4.17) et (4.18) sont représentées les allures des composantes directe et en quadrature des courants rotoriques avec leurs références.

4.3.1.2 Résultats de simulation avec un profil de vent

Dans cette partie de simulation, nous présentons un ensemble de courbes simulant l'aérogénérateur en appliquant un profil de variation de la vitesse du vent, en appliquant toujours la même commande pour l'optimisation du système.

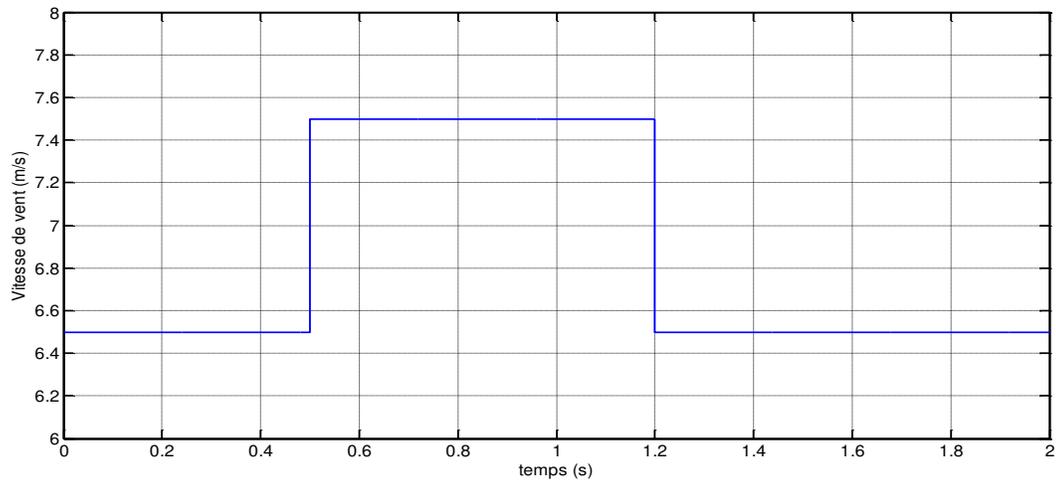


Fig.4.19: Allure du profil de vent.

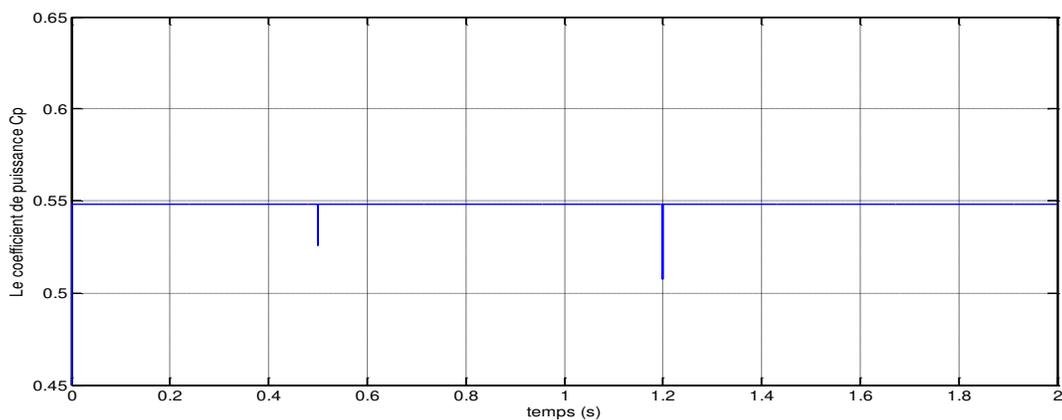


Fig.4.20: Allure du coefficient de puissance de la turbine.

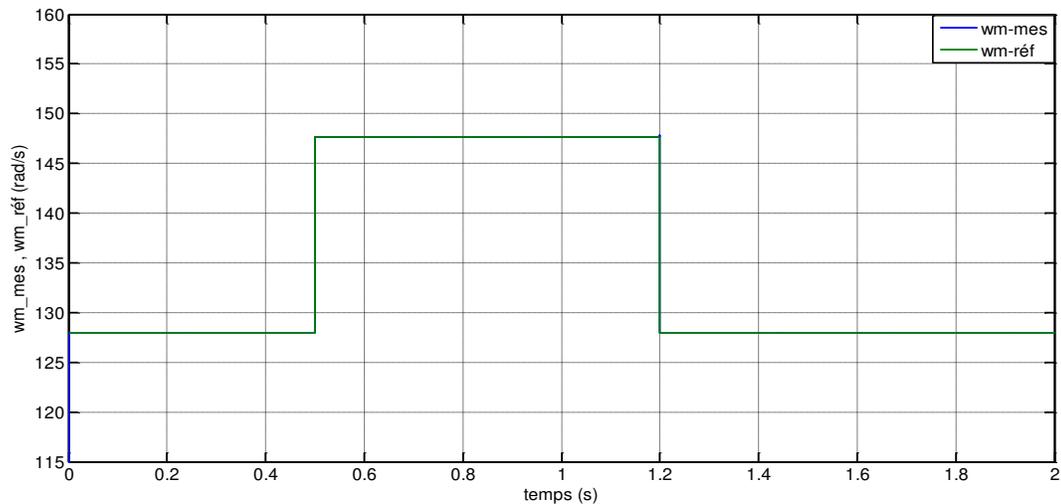


Fig.4.21: Allure de la vitesse mécanique de la machine mesurée et de référence.

Les figures (4.19), (4.20) et (4.21) contiennent respectivement l'allure du profil de vent avec l'allure du coefficient de puissance et les vitesses optimales avec celles mesurées on peut clairement remarquer que le coefficient de puissance est maintenu constant à sa valeur maximale pendant la variation de la vitesse du vent ainsi qu'un bon suivi de la vitesse de rotation avec sa consigne. Ces remarques permettent de dire que le bloc MPPT permet d'extraire la puissance aérodynamique maximale avec l'évolution de la vitesse du vent.

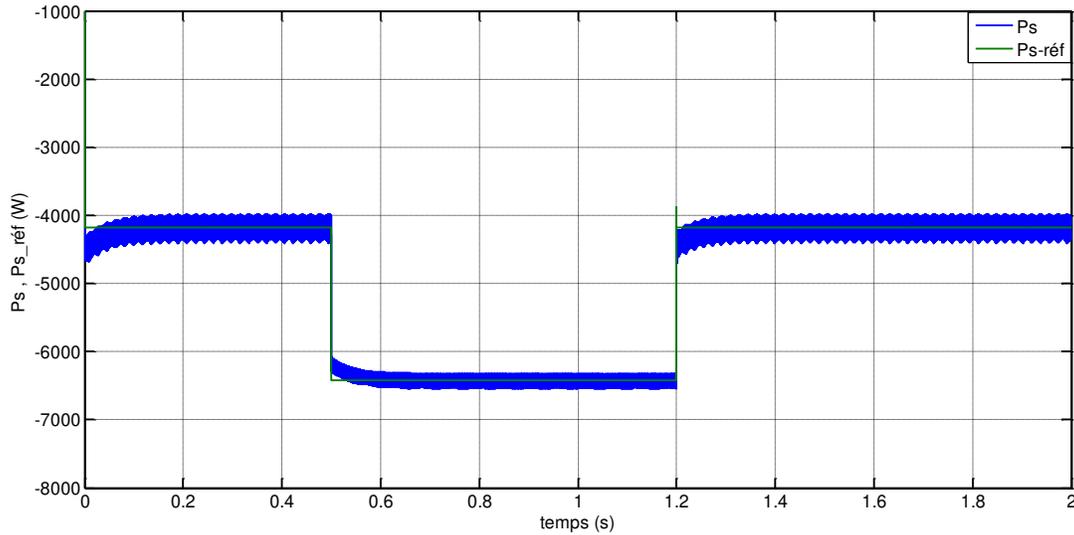


Fig.4.22: Allure de la puissance statorique active mesuré et de référence.

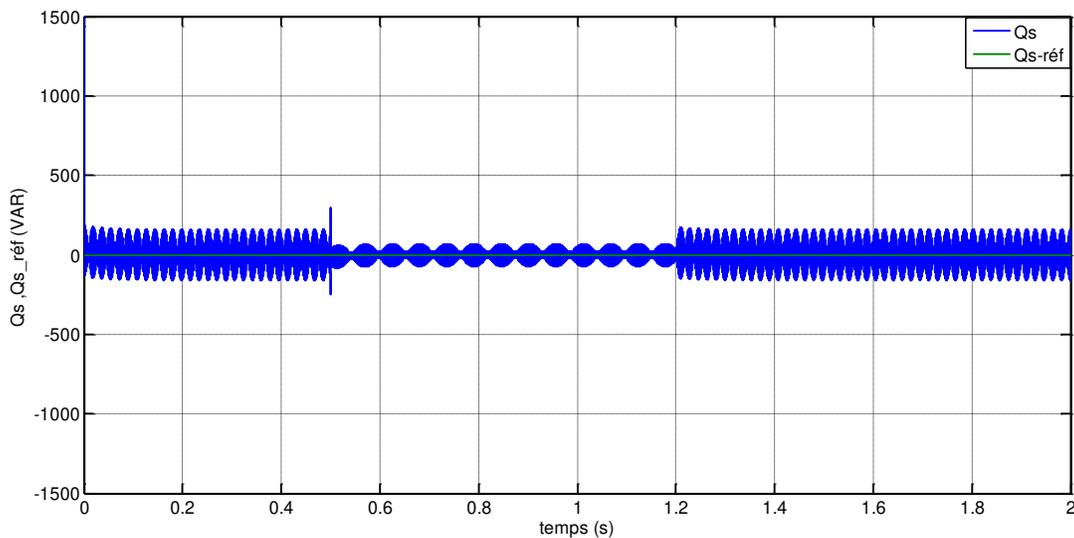


Fig.4.23: Allure de la puissance statorique réactive mesuré et de référence.

Les figures (4.22) et (4.23), montrent un bon suivi des puissances actives et réactives de la génératrice avec ces références imposées. Ainsi la puissance active de référence est déterminée pour chaque vitesse de la turbine pour permettre une conversion optimale de l'énergie, cependant la référence de la puissance réactive est nulle permettant ainsi de fonctionner à facteur de puissance unitaire côté réseau.

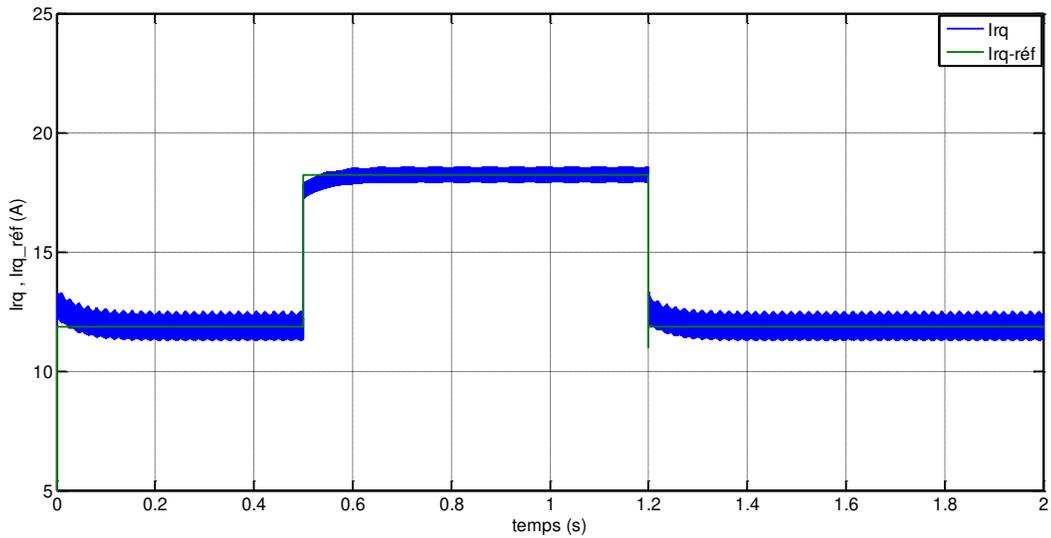


Fig.4.24: Allure du courant rotorique en quadrature mesuré et de référence.

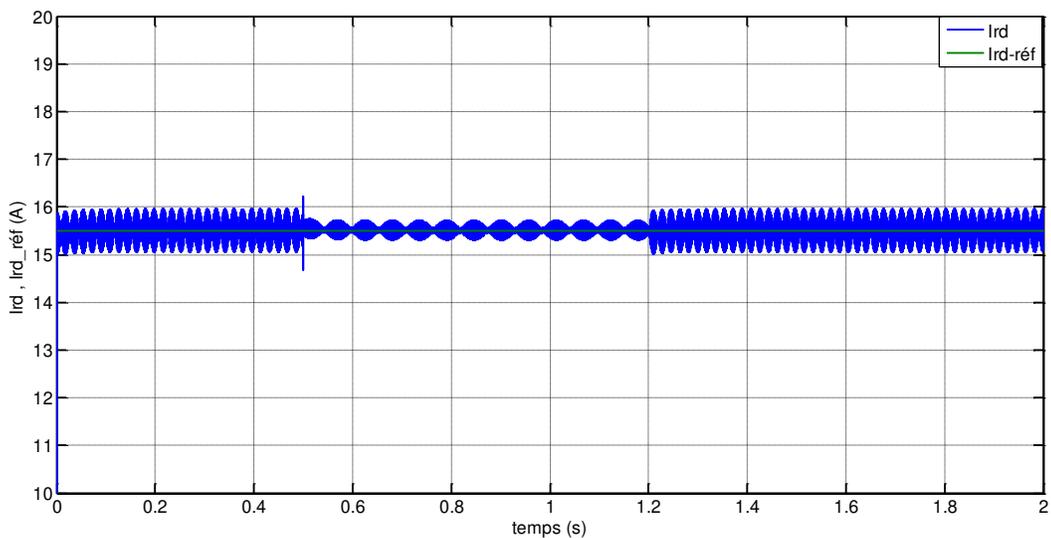


Fig.4. 25: Allure du courant rotorique direct mesuré et de référence.

Les allures des courant rotoriques direct et en quadratique montrent un bon suivi de leurs consignes. De plus ces allures mettent en évidence le principe de la commande découplée de la MADA. Le courant rotorique en quadrature I_{rq} suit avec une dynamique rapide l'évolution de la puissance active de référence, alors que le courant rotorique direct I_{rd} est maintenu constant, image de la puissance réactive nulle, ce qui confirme le découplage parfait des deux axes et l'aptitude des deux régulateurs PI à rejeter les termes de couplage.

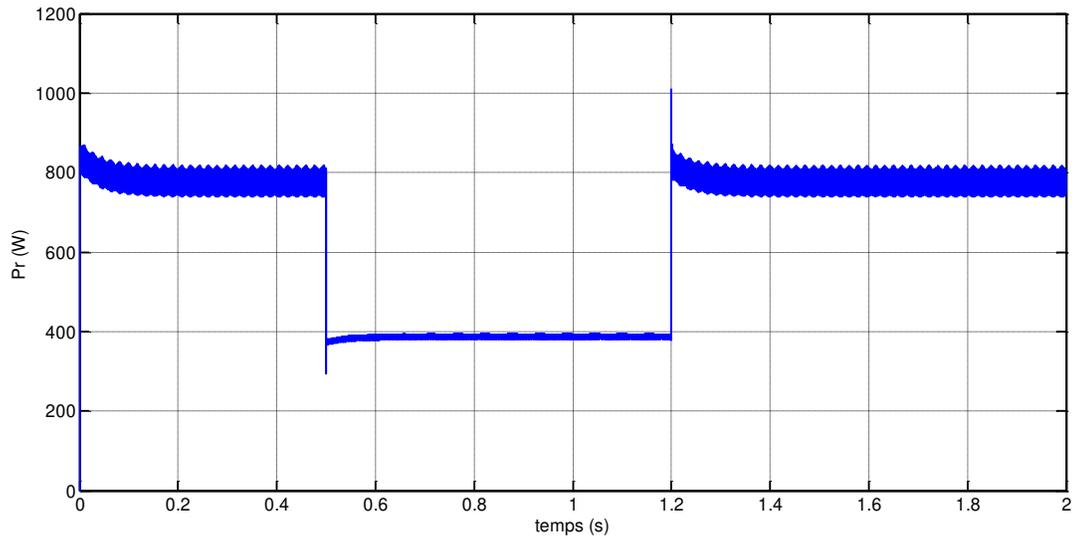


Fig.4.26: Allure de la puissance rotorique active.

La figure (4.26) illustre l'allure de la puissance rotorique active, dont le signe indique que le fonctionnement est sous synchronisme et que le transfert d'énergie dans la chaîne de conversion se fait du réseau vers le rotor, confirmant la relation liant la puissance rotorique avec la puissance statorique, ($P_r = g * |P_s| > 0$).

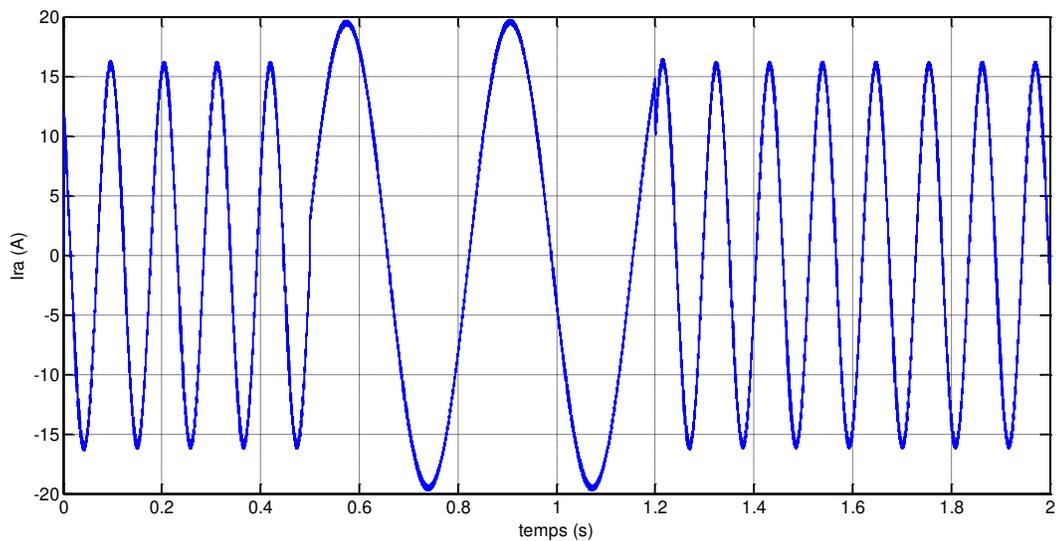


Fig.4.27: Allure du courant rotorique par phase (a).

Sur la figure (4.27) le courant rotorique croît avec la vitesse de rotation de la génératrice, que ce soit en amplitude ou en fréquence dont cette dernière est liée à celle statorique par le biais du glissement, ($f_r = g * f_s$).

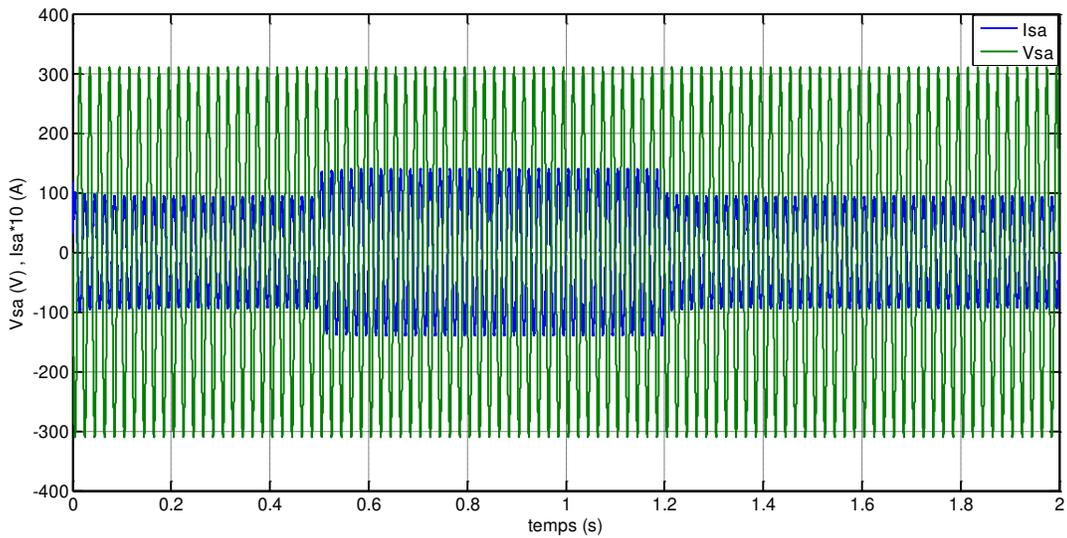


Fig.4.28: Allure du courant et la tension statorique par phase (a).

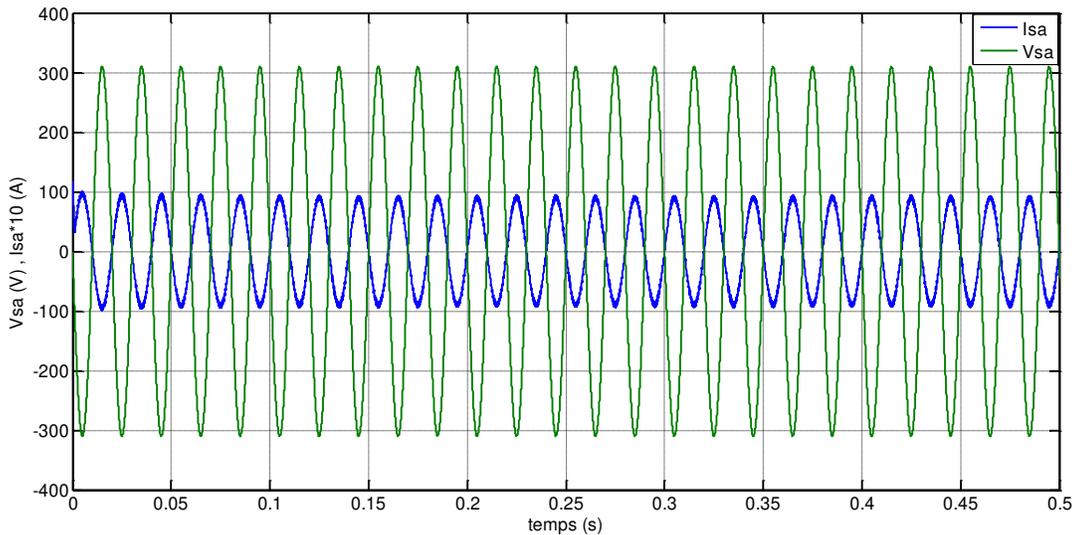


Fig.4.29: Allure du courant et la tension statorique par phase (a) en zoom.

Sur la figure (4.28) on constate que le courant statorique a une fréquence constante qui est celle du réseau ($f=50\text{Hz}$) cependant son amplitude est bien adaptée à la variation de la puissance active de manière proportionnelle .En outre, on voit clairement que le déphasage entre la tension et le courant statorique est de $(-\pi)$, c.à.d. ils sont en opposition de phase ce qui confirme que la composante imaginaire de puissance est nulle ($Q_s = 0$), est un fonctionnement à facteur de puissance unitaire est bien assuré.

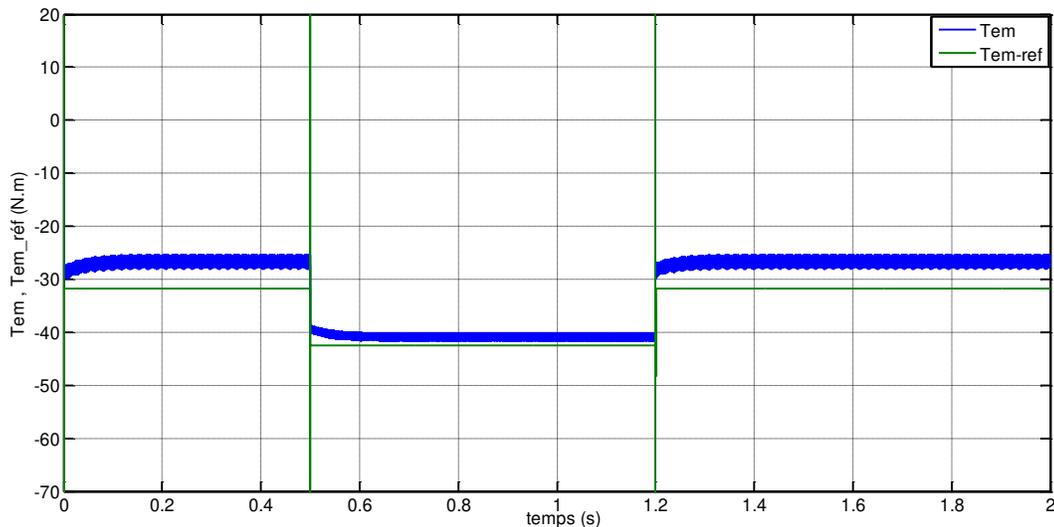


Fig.4.30: Allure du couple électromagnétique mesuré et de référence.

Sur la figure (4.30) l'allure du couple électromagnétique embrasse la forme de la puissance aérodynamique image de la vitesse de vent en fonctionnement optimum. Nous notons également qu'il y a une erreur statique entre l'allure du couple électromagnétique mesuré et de référence. Cette erreur est due à l'hypothèse que les pertes dans notre système sont négligeables.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de l'optimisation de la chaîne de conversion éolienne relié au réseau, basée sur la génératrice double alimentée MADA.

Deux stratégies de commande du système ont été détaillées:

- La première: la stratégie MPPT permet de fournir la totalité de la puissance active produite au réseau.
- La deuxième: la commande découplée des puissances actives et réactives du convertisseur MLI coté rotor de la génératrice (CCM) à travers la régulation des courants rotoriques par deux régulateurs (PI). Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisantes, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la MADA au cours de la variation de la vitesse du vent.

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif de ce travail était l'étude, la commande et la simulation de la chaîne de conversion éolienne de production d'énergie électrique connectée au réseau. Pour une utilisation maximale de l'énergie extraite un algorithme de commande MPPT est utilisé pour l'optimisation de la source d'énergie renouvelable.

Des généralités sur les systèmes éoliens sont présentées dans le premier chapitre. Le chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, il nous a permis de comprendre le principe de la conversion aérodynamique de l'énergie éolienne ainsi que les différentes possibilités de réglage et de limitation de la puissance. La comparaison des différentes structures possible nous a permis de choisir la structure retenue pour notre étude à savoir la structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Une modélisation détaillée de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne est présentée dans le chapitre 2, la modélisation des différents organes a été élaborée afin de mettre en évidence toutes les interactions entre les modèles du système. On a présenté la mise en équation de la partie mécanique, à savoir la turbine tripale à axe horizontale et le multiplicateur à deux masses intercalé entre cette dernière et la génératrice, pour adapter les deux vitesses (lente et rapide).

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

La commande et la simulation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne était l'objectif du troisième chapitre et du dernier chapitre. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques. Les avantages qu'offre la machine à double alimentation, couvre l'inconvénient de la présence des balais frottant sur les bagues.

La commande vectorielle est utilisée afin de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre le stator et le rotor de la machine et le réseau, Le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives statoriques avec les puissances réelles débitées par le stator de la

machine a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue.

Pour assurer un fonctionnement optimal de la génératrice éolienne, on a utilisé un algorithme MPPT avec la commande en vitesse, cette technique permet le fonctionnement à puissance maximale. Des résultats de simulation obtenus pour l'algorithme MPPT et la commande découplé des puissances actives et réactive ont donné des bonnes performances, permettant le fonctionnement du système de conversion dans les conditions optimales.

Finalement, il va sans dire que la MADA a un pouvoir d'application très vaste dans les applications de production de l'énergie électrique, notamment dans les systèmes éoliens.

Références Bibliographiques

- [1]: O. Gergaud "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau". Thèse de doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [2]: Wikimedia commons « <http://commons.wikimedia.org/> ».
- [3]: Info éolien « <http://www.info-eolien.com/historique.html> ».
- [4]: The world wind energy association, 2013 half-year report « www.wwindea.org ».
- [5]: Rapport mondial 2012 sur les énergies renouvelables, « www.ren21.net ».
- [6]: Eco info énergies renouvelables «<http://www.les-energies-renouvelables.eu/avantages-et-inconvenients-de-lenergie-eolienne.html>».
- [7]: B. Multon "Energie électrique les enjeux". Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [8]: Saki Ali, Belaidi Mourad "Étude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne". PFE d'Ingénieur d'état école nationale polytechnique 2006.
- [9]: O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine". Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [10]: Frédéric Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne". Thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [11]: Redjem Radia, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne". Thèse de magister université Mentouri de Constantine 2009.
- [12]: P. Berlu, "Calcul des efforts subis par les éoliennes de moyenne et forte puissance". Thèse de doctorat, université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [13]: KHETTACHE LAID, "Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée". Thèse de magister université de Batna 2007.
- [14]: TOUAL Belkacem, "Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable". Thèse de magister université de Batna, soutenu le 17/10/2010.

- [15]: A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne." Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, 2006.
- [16]: Chatlin, "Machine Electrique". Presses Polytechnique normandes 1990.
- [17]: A. Rahim, M.A. Alam, M.F. Kandlawala, "Dynamic performance improvement if an isolated wind turbine induction generator". Computers and electrical engineering, Vol. 35, pp. 594-607, 2009.
- [18]: Y.Y. Hong, S.D. Lu, C.S. Chiou, "MPPT for PM wind generator using gradient Approximation". Energy conversion and management, Vol. 50, pp. 82-89, 2009.
- [19]: S. Heier, "Grid Integration of Wind energy conversion systems". Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [20]: Abdeddaim Sabrina, "Optimisation d'un système de génération renouvelable (Photovoltaïque et éolienne) connecté au réseau ". Mémoire de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra ; 2013
- [21]: H.TAMRABET, "Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone". Mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [22]: L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone". Notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [23]: Rachid Abdessemed, "Modélisation et simulation de machines électriques". Ellipses édition 2011.
- [24]: A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA, contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service". Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, 2010.
- [25]: H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "Onduleurs de tension, structures, principes et applications". Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [26]: M.L.Mennai, "Contribution à la modélisation d'un aérogénérateur à aimants permanents". Thèse de master de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option commande électrique, 2011.
- [27]: R.D. Shukla, Dr.R.K. Tripathi, "Maximum power extraction schemes & power control in wind energy conversion system". International journal of scientific & engineering research, Vol. 3, Issue. 6, pp.116-122, June 2012.
- [28]: S. El.aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension". Thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2004.

- [29]: R.Achouri, M.Hidouche, "Commande vectorielle de la machine asynchrone". Projet de fin d'étude, ENP, Juin 2007.
- [30]: R. Krishnan. "Electric motor drives modeling, analysis and control". Prentice Hall, 2001.
- [31]: D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, "Network power flux control of a wind generator". Renewable energy, volume 34, Issue 3, pp 615- 622, Elsevier 2009.
- [32]: K. Ghedamsia, D. Aouzellaga, E.M. Berkouk. « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system ». Renewable Energy, Volume 33, Issue 9, pp 2145-2156, Elsevier 2008.

Annexe

- Coefficients de la caractéristique du rendement C_p de la turbine

$$a_0 = 0.001, a_1 = 6.38 \cdot 10^{-2}, a_2 = -9.4 \cdot 10^{-3}, a_3 = 9.86 \cdot 10^{-3}, a_4 = -17.375 \cdot 10^{-4}$$

$$a_5 = 7.9563 \cdot 10^{-5}$$

- Les caractéristiques de la machine asynchrone doublement alimentée (MADA)

Constructeur	Leroy-Somer
Puissance nominale	7.5 kW
Vitesse nominale	1500 tr/min / 50Hz

- Paramètres de la machine asynchrone doublement alimentée (MADA)

Résistance statorique R_s	0.455 Ω
Résistance rotorique R_r	0.62 Ω
Inductance statorique L_s	0.084 H
Inductance rotorique L_r	0.081 H
Mutuelle inductance M	0.078 H
Nombre de paires de pôles P	2
Coefficient de frottement f_g	$6.73 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s}^{-1}$
Moment d'inertie J_g	0.3125 kg. m ²

- Les caractéristiques des turbines tripales à axe horizontale

Puissance nominale $P_{aéro N}$	7.8 kW
Rayon de la pale R_t	3.8 m
Vitesse du vent nominale V_{VN}	8 m/s
Gain du multiplicateur G	11.65