



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI DE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

N° de série :

N° d'ordre :

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : Machines Electriques

Présentée par :

SENANI Fawzi

Thème

**La Machine Asynchrone à Double Alimentation :
Stratégies de Commande et Applications**

Soutenu le : --/--/ 2018

Président:	KERDOUN Djallel	Professeur	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur:	BENALLA Hocine	Professeur	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Examineurs:	BAHI Tahar	Professeur	Univ. Badji Mokhtar ANNABA
	LADACI Samir	Professeur	Ecole Nat. Polytechnique Constantine

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC) de l'Université des Frères Mentouri Constantine 1 Algérie.

Ce manuscrit n'aurait pas été réalisé sans l'aide de Dieu, avec beaucoup de patience et la volonté nécessaire durant toutes ces longues années d'études pour enfin aboutir à l'achèvement de ce modeste travail.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Hocine BENALLA, Professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1 et Chef de l'équipe 1 (Électronique de puissance et Qualité de l'énergie électrique au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC)) pour m'avoir encadré tout au long de cette thèse, pour m'avoir fait bénéficier de son savoir, pour sa gentillesse, son expérience, son soutien moral, ses conseils, ses critiques, sa disponibilité permanente qui m'a été d'un grand apport pour l'aboutissement de cette thèse et je suis très ravi d'avoir travaillé en sa compagnie.

Je tiens à remercier Monsieur Djallel KERDOUN, Professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Tahar BAHI, Professeur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, d'avoir bien voulu accepté de juger cette thèse. C'est un grand honneur pour moi d'avoir accepté cette tâche.

Je tiens à remercier également Monsieur Samir LADACI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de Constantine (ENPC), d'avoir accepté de juger et d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

Je tiens à remercier infiniment mon encadrant de l'ingénierat Monsieur NEMMOUR Ahmed Lokmane, Maitre de conférence A à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, qui m'a été d'un grand apport pour ses qualités humaines et connaissances scientifiques, je souhaite pour lui que des réussites dans ses recherches, je souhaite pour lui que des réussites dans ses recherches.

Enfin, mes remerciements à mes amis Abederrezak RAHAB, Fares BOUROUROU et Fateh LOUAR qui m'ont beaucoup aidé grâce aux différentes échanges et idées partagées entre nous, mes sincères souhaits leur réussite dans la vie professionnelle et personnelle.

Dédicaces

*À la mémoire de Mohamed Islam décédé le 13 Juin 2014,
À ma mère qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu la protège,
À mon père pour son soutien et son encouragement,
À mes chers frères et chères sœurs,
À mes chers neveux et chères nièces
À toute ma famille,
À tous mes amis.*

الملخص

نظام تحويل طاقة الرياح الذي يعتمد على الآلة الاتزامنية ثنائية التغذية بسرعة متغيرة, شهدت نموا مذهلا في السنوات الأخيرة خاصة في مجال الاستطاعة ذات الميغواط بسبب العديد من المزايا مقارنة بأنظمة تحويل طاقة الرياح المنافسة الأخرى.

هذا المخطوط يعالج النمذجة, التحكم و المحاكاة الكاملة لسلسلة تحويل طاقة الرياح التي تعتمد على الآلة الاتزامنية ثنائية التغذية ذو 1.5 ميغواط. التوربين بواسطة مضاعف السرعة تقوم بتدوير الآلة الاتزامنية ثنائية التغذية و التي تتصل مباشرة بالشبكة عن طريق الجزء الساكن, و لكن أيضا عن طريق مومج يعمل في الاتجاهين موضوع بين الجزء الدوار و الشبكة. قمنا بنمذجة جميع مكونات سلسلة تحويل طاقة الرياح. وحدة التحكم MPPT لضبط سرعة التربين بالنسبة ل سرعة الريح للحصول على الاستطاعة القصوى.

يتألف التحكم في تربينات الرياح التي تعتمد على الآلة الاتزامنية ثنائية التغذية على التحكم في المومج من جانب الآلة (CCM) و من جهة في المومج من جانب الشبكة (CCR) . التحكم الشعاعي (CV) الذي يعتمد على توجيه تدفق الجزء الساكن و التحكم المباشر في الاستطاعة (DPC) الذي يستند على أساس اختيار أشعة الجهد الدوار المناسب و أخطاء الاستطاعة الناشطة و التفاعلية, و اقتراح تطوير الجمع بين التحكمان السابقان (CV-DPC) و تطبيقهم للتحكم في CCM و هذا للحصول على تحكم منفصل للاستطاعة الناشطة و التفاعلية المتبادلة بين الجزء الساكن و الشبكة. ال CCR و الذي دوره الأساسي الحفاظ على جهد الناقل المستمر ثابتا, يضمن تيار الشبكة جيبي و ضبط الاستطاعة التفاعلية على الصفر للحصول على معامل استطاعة وحدوي من جانب الشبكة, ضبط سرعة دوران الآلة يتم بواسطة نوعين من المصححات PI و IP . يتم عرض و مناقشة نتائج المحاكاة الكاملة لسلسلة تحويل طاقة الرياح الذي تعتمد على الآلة الاتزامنية ذو 1.5 ميغواط مع مختلف الاستراتيجيات المستعلة في نمط تحت أو فوق السرعة التزامنية بواسطة متلاب / سيميلينك و بيان فعالية الإستراتيجية المقترحة في تغيرات سرعة الرياح, الاستطاعة الناشطة و التفاعلية, تغيرات إعدادات الآلة, الاستجابة الديناميكية و تموج الاستطاعة.

كلمات مفتاحية :

طاقة الرياح, MPPT, الآلة الاتزامنية ثنائية التغذية, مومج ثنائي الاتجاه, التحكم الشعاعي, التحكم المباشر في الاستطاعة, دمج التحكم الشعاعي و التحكم المباشر في الاستطاعة, مصحح نسبي-متكامل, مصحح متكامل-نسبي.

Abstract

During the last few years the wind energy conversion system based on Doubly Fed Induction Generator (DFIG) know an impressive growth especially in plants in the MW range because of the several advantages compared to other competing wind energy conversion systems.

This manuscript treats the modeling, the control and the simulation of a wind energy conversion system driven DFIG on a 1.5MW. The turbine through a gear box drive the DFIG connected directly to the grid by its stator, but also by back-to-back converter placed between the rotor and the grid. The different components of the conversion chain are modeled. The Power Extraction Technique (MPPT) adjusts the speed of the turbine to the wind speed to maximize power. The wind turbine based DFIG control comprises both the rotor side converter (MSC) and grid side converter (GSC) controllers. The vector control (VC) based on flux stator oriented control, the direct power control (DPC) based on selecting the appropriate rotor voltage vectors and the errors of the active and reactive power, and the combined (VC-DPC) proposed between the VC and DPC for the control of MSC to decoupled active and reactive stator power control exchanged between the machine stator and the grid. The GSC whose main role is to keep the DC link voltage constant, guarantee sinusoidal grid current and the reactive power is set to 0, in order to have a unit power factor in the grid side, the GSC is controlled by the DPC, the control of the generator speed is assured by PI and IP controllers. Simulation results of the complete wind energy conversion chain based on 1.5 MW DFIG with the various strategies used in hypo and hyper synchronous mode using Matlab/Simulink are presented, discussed and demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy during variations of wind speed, active and reactive power, robustness, against the machine parameter variations, the dynamic response and power ripple.

Key words:

Wind turbine, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Doubly Fed Induction Generator (DFIG), Back-to-Back, Vector Control (VC), Direct Power Control (DPC), Combined (VC-DPC), Proportional-Integral (PI) Controller, Integral-Proportional (IP) Controller.

Résumé

Le système de conversion éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années, surtout dans le domaine de grande puissance de l'ordre du MW à cause de plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes de conversion éolien concurrents.

Ce manuscrit traite la modélisation, la commande et la simulation complète d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA de puissance 1.5 MW. La turbine par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse entraîne, la MADA reliée directement au réseau par le stator, mais aussi par un convertisseur bidirectionnel placé entre le rotor et le réseau. Les différentes composantes de la chaîne de conversion sont modélisées. La technique d'extraction de puissance (MPPT) ajustant la vitesse de la turbine par rapport à la vitesse du vent est étudiée. La commande de l'éolienne à base d'une MADA comprend deux parties, d'une part la commande du convertisseur côté machine (CCM) et d'autre part la commande du convertisseur côté réseau (CCR). La commande vectorielle (CV) basée sur l'orientation du flux statorique, la commande directe de puissance (DPC) basée sur la sélection des vecteurs de la tension rotorique appropriés et les erreurs des puissances active et réactive, et la proposition d'une combinaison entre ces deux techniques dite (CV-DPC) est développée et appliquée pour la commande du CCM pour avoir une commande séparée des puissances statoriques active et réactive échangées entre le stator de la MADA et le réseau. Le CCR dont le rôle principal est de maintenir la tension du bus continu constante, garantir un courant du réseau sinusoïdal et la puissance réactive est fixée nulle afin d'avoir un facteur de puissance unitaire côté réseau, le CCR est commandé par la DPC, le réglage de la vitesse de rotation de la MADA est assuré par deux types du régulateur Proportionnel-Intégral (PI) et Intégral-Proportionnel (IP). Les résultats de simulation complète de la chaîne de conversion basée sur la MADA d'une puissance de 1.5MW avec les différentes stratégies utilisées en mode hypo et hyper synchrone à l'aide du logiciel Matlab /Simulink sont présentés, discutés et ont démontré l'efficacité de la stratégie de commande proposée avec les variations de la vitesse du vent, des puissances active et réactive, des paramètres de la MADA. Cette stratégie a donné aussi une bonne réponse dynamique et des ondulations de la puissance raisonnable.

Mots clés

Energie éolienne, Technique d'extraction de Puissance Maximale (MPPT), Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), Convertisseur Bidirectionnel, commande vectorielle (CV), Commande directe de puissance (DPC), Combiner (CV-DPC), régulateur proportionnel-intégral (PI), régulateur intégral proportionnel (IP).

Liste des Tableaux

Tableaux du Chapitre I

Tableau I.1 Puissances des éoliennes.....	9
Tableau I.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	9
Tableau I.3 Les meilleurs fabricants et gammes de produits éoliens en 2015.....	22
Tableau I.4 Synthèse des quatre types des machines utilisant les systèmes d'éoliennes.....	23

Tableaux du Chapitre II

Tableau II.1 Ecoulement de la puissance de la MADA.....	41
---	----

Tableaux du Chapitre III

Tableau III.1 Table de commutation de la DPC pour CCR.....	75
--	----

Tableaux du Chapitre IV

Tableau IV.1 Table de commutation optimale de la DPC pour CCM.....	93
--	----

Liste des Figures

Figures du Chapitre I

Figure I.1 Capacité annuelle cumulée d'énergie éolienne installée de 2001 à 2016.....	7
Figure I.2 Capacité globale installée annuelle de 2001-2016.....	7
Figure I.3 Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol.....	8
Figure I.4 Évolution taille-puissance des éoliennes (D : Diamètre de rotor).....	9
Figure I.5 Principe de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	10
Figure I.6 Éolienne à axe verticale type Darrieus.....	11
Figure I.7 Éolienne à axe verticale type Savonius.....	12
Figure I.8 Éolienne à axe horizontal deux, trois pales et multi-pales.....	13
Figure I.9 Type de configuration d'éolienne à axe horizontal.....	13
Figure I.10 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales pour différents types d'éoliennes.....	14
Figure I.11 Principaux éléments constituant une éolienne.....	15
Figure I.12 Eoliennes à vitesse fixe avec générateur asynchrone à cage d'écurueil.....	17
Figure I.13 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	18
Figure I.14 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	19
Figure I.15 Eoliennes à vitesse variable partielle avec générateur asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par variation de la résistance du rotor.....	20
Figure I.16 Eolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à pleine échelle.....	21
Figure I.17 Eolienne à vitesse variable avec générateur asynchrone à double alimentation.....	22
Figure I.18 Rotor de la MADA.....	24
Figure I.19 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable d'une MADA.....	25
Figure I.20 Topologie du convertisseur de source de tension à deux niveaux pour l'application de l'énergie éolienne.....	27
Figure I.21 Schéma général d'un convertisseur Bidirectionnelle à 2 niveaux.....	28
Figure I.22 Le schéma de contrôle des systèmes éoliens à base de la MADA avec le convertisseur Bidirectionnel à 2 niveaux.....	29
Figure I.23 Classification des méthodes de contrôle pour les systèmes de conversion éolienne à base de la MADA.....	30

Figures du Chapitre II

Figure II.1 Schéma synoptique du système éolien basé sur une MADA.....	34
Figure II.2 Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ de la turbine de la puissance 1.5 MW.....	37
Figure II.3 Modèle dynamique simplifié de la turbine éolienne.....	38
Figure II.4 Schéma synoptique du modèle de la turbine éolienne.....	39
Figure II.5 Différentes modes de fonctionnement de la MADA.....	40
Figure II.6 Schéma représentation de la MADA dans le repère triphasé.....	42
Figure II.7 Schéma de la transformation de Park tournant.....	44
Figure II.8 Schéma bloc de simulation de la MADA dans le repère dq.....	46
Figure II.9 La vitesse de rotation de la MADA.....	47
Figure II.10 Couple électromagnétique de la MADA.....	48
Figure II.11 La puissance statorique active de la MADA.....	48
Figure II.12 Courant rotorique de la MADA.....	49
Figure II.13 Tension statorique et courant rotorique de la MADA.....	50
Figure II.14 Schéma de connexion du convertisseur de puissance au réseau électrique.....	51
Figure II.15 Schéma du convertisseur de puissance à interrupteurs idéaux.....	52

Figures du Chapitre III

Figure III.1 Schéma synoptique de commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	56
Figure III.2 Stratégies de contrôle de la turbine étudiée.....	58
Figure III.3 Stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	59
Figure III.4 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$	60
Figure III.5 Schéma fonctionnel de contrôle de la vitesse utilisant un régulateur PI.....	61
Figure III.6 Principe de la commande vectorielle avec orientation du flux statorique.....	63
Figure III.7 Synoptique du système interne de la MADA.....	67
Figure III.8 Commande vectorielle indirecte des puissances active et réactive pour CCM...69	69
Figure III.9 Contrôle direct de puissance (DPC) pour CCR.....	70
Figure III.10 Calcul de la puissance active instantanée de référence.....	71
Figure III.11 Réglage de la tension du bus continu avec régulateur PI.....	72
Figure III.12 Compérateurs à hystérésis à deux niveaux.....	72

Figure III.13 Vecteurs de la tension dans le référentiel (α, β) avec 12 secteurs.....	74
Figure III.14 Puissance active statorique.....	76
Figure III.15 Puissance réactive statorique.....	76
Figure III.16 Courant rotorique quadrature.....	77
Figure III.17 Courant rotorique direct.....	77
Figure III.18 Tension du bus continu.....	78
Figure III.19 Puissance active côté réseau.....	78
Figure III.20 Puissance réactive côté réseau.....	79
Figure III.21 Profil du vent.....	79
Figure III.22 Vitesse de rotation de la MADA.....	79
Figure III.23 Puissance statorique active.....	80
Figure III.24 Puissance statorique réactive.....	80
Figure III.25 Courant rotorique quadrature.....	80
Figure III.26 Courant rotorique direct.....	80
Figure III.27 Courant statorique.....	81
Figure III.28 Courant rotorique.....	81
Figure III.29 Tension du bus continu.....	82
Figure III.30 Puissance active côté réseau.....	82
Figure III.31 Puissance réactive côté réseau.....	82

Figures du Chapitre IV

Figure IV.1 Schéma synoptique de commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	85
Figure IV.2 Stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	86
Figure IV.3 Schéma fonctionnel de contrôle de la vitesse utilisant un régulateur IP.....	86
Figure IV.4 Schéma synoptique de la commande directe de puissance (DPC) pour le CCM.....	88
Figure IV.5 Vecteurs du flux statorique et rotorique dans (α - β) et le repère lié au rotor.....	90
Figure IV.6 Vecteurs de la tension du convertisseur côté machine avec 6 secteurs.....	91
Figure IV.7 Comparateurs à hystérésis: a) Trois niveaux; b) Deux niveaux.....	92
Figure IV.8 Profil du vent.....	94
Figure VI.9 Vitesse de rotation de la MADA.....	94
Figure IV.10 Puissance statorique active.....	95

Figure IV.11 Puissance statorique réactive.....	95
Figure IV.12 Courant statorique.....	95
Figure IV.13 Courant rotorique.....	96
Figure IV.14 Tension du bus continu.....	96
Figure IV.15 Puissance active côté réseau	97
Figure IV.16 Puissance réactive côté réseau.....	97
Figure IV.17 Tension du réseau et courant du filtre.....	98
Figure IV.18 Zoom de la tension du réseau et le courant du filtre pour les deux modes hypo synchrone et hyper synchrone.....	98
Figure IV.19 Schéma synoptique de la commande proposé (CV-DPC) pour le CCM.....	101
Figure IV.20 Profil de la vitesse de vent.....	101
Figure IV.21 Vitesse de rotation de la MADA.....	102
Figure IV.22 Puissance statorique active.....	102
Figure IV.23 Zoom de la puissance statorique active.....	103
Figure IV.24 Courant statorique.....	103
Figure IV.25 Profil du vent.....	104
Figure IV.26 Vitesse de rotation de la MADA.....	104
Figure IV.27 Puissance statorique active.....	104
Figure IV.28 Puissance statorique active.....	105
Figure IV.29 Zoom de la puissance statorique active.....	105

Liste des Symboles et Notations

Symboles

v_0	Composante moyenne de la vitesse du vent	m/s
A_i	Amplitude des composantes spectrale du vent	m/s
ω_i	Pulsation des composantes spectrale du vent	rad/s
φ_i	Phase initiale des composantes spectrale du vent	rad
E_c	Energie cinétique	J
m	Masse d'air	kg
v	Vitesse du vent	m/s
S	Surface balayée par les pales de la turbine éolienne, $S = \pi R^2$	m ²
P_v	Puissance cinétique du vent	W
P_t	Puissance aérodynamique captée par l'éolienne	W
λ	Vitesse relative de la turbine	-
ρ	Masse volumique de l'air.	kg/m ³
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine.	rad/s
R	Rayon de l'aérogénérateur ou longueur d'une pale.	m
C_p	Coefficient de puissance	-
β	Angle de calage des pales.	°
C_t	Couple aérodynamique.	N.m
C_c	Coefficient du couple.	-
G	Multiplicateur de vitesse.	-
J_t	Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.	kg.m ²
J_m	Moment d'inertie de la MADA.	kg.m ²
f	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.	Nm.s/rad
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la MADA.	N.m
Ω_m	Vitesse de rotation de la MADA.	rad/s
J	Moment d'inertie totale.	kg.m ²
C_{em}	Couple électromagnétique de la MADA.	N.m
E_s, E_r	Valeurs efficaces des fems rotoriques et statoriques.	V
N_r, N_s	Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique,	-
p	Nombre de paires de pôles,	-
ω_s, ω_r	Pulsations statorique et rotorique.	rad/s
ω_m	Vitesse électrique angulaire de rotation de la MADA.	rad/s
g	Glissement.	-
f_s, f_r	Fréquences statorique et rotorique.	Hz
f_m	Fréquence de rotation du rotor.	Hz
P_s, P_r	Puissance active statorique et rotorique.	W
Q_s, Q_r	Puissance réactive statorique et rotorique.	VAR
P_m	Puissance mécanique.	W
θ	Angle électrique entre le stator et le rotor.	°
V_{sabc}, V_{rabc}	Tensions statoriques et rotoriques dans le repère (abc).	V
I_{sabc}, I_{rabc}	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (abc).	A

$\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}$	Flux statoriques et rotoriques dans le repère (abc).	Wb
R_s, R_r	Résistances statorique et rotorique par phase.	Ω
l_s, l_r	Inductances propres statorique et rotorique.	H
M_s, M_r	Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.	H
M_{sr}	Valeur maximale de la mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.	H
L_s, L_r	Inductances cycliques statorique et rotorique.	H
M	Mutuelle entre le stator et le rotor.	H
θ_s, θ_r	Angles de Park des grandeurs statoriques et des grandeurs rotoriques.	$^\circ$
V_{sd}, V_{sq}	Tensions statoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq	V
V_{rd}, V_{rq}	Tensions rotoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq.	V
I_{sd}, I_{sq}	Courants statoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq.	A
I_{rd}, I_{rq}	Courants rotoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq.	A
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq.	Wb
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotoriques direct et quadrature dans le repère de Park dq.	Wb
C_r	Couple résistant	N.m
I_{mr}, I_{mg}	Courants modulés par le CCM et le CCR.	A
I_c	Courant traversant le condensateur.	A
V_{dc}	Tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur).	V
T_{ij}, D_{ij}	Transistor IGBT et diode en antiparallèle, avec $i \in \{a, b, c\}, j \in \{1, 2\}$.	-
R_f, L_f	Résistance et l'inductance du filtre RfLf.	Ω, H
V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}	Tensions simples modulées par le CCR.	V
V_{ga}, V_{gb}, V_{gc}	Tensions simples du réseau électrique.	V
I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}	Courants circulant à travers le filtre RfLf.	A
C	Capacité du bus continu.	F
C_{emref}	Couple électromagnétique de référence.	N.m
Ω_{mref}	Vitesse de rotation de référence.	rad/s
Ω_{tref}	Vitesse de la turbine de référence.	rad/s
C_{pmax}	Coefficient de puissance maximal.	-
λ_{opt}	Vitesse relative de la turbine optimale	-
k_{pw}, k_{iw}	Gains proportionnel et intégral du régulateur PI de la vitesse.	-
k_{pw}, k_{iw}	Gains proportionnel et intégral du régulateur IP de la vitesse.	-
P_{sref}	Puissance active statorique de référence.	W
Q_{sref}	Puissance réactive statorique de référence.	VAR
k_{pp}, k_{ip}	Gains proportionnel et intégral du régulateur PI des puissances active et réactive	-
k_{pir}, k_{iir}	Gains proportionnel et intégral du régulateur PI des courants rotoriques direct et quadrature.	-
P_g, P_{gref}	Puissances active et sa référence côté réseau.	W
Q_g, Q_{gref}	Puissances réactive et sa référence côté réseau.	VAR
$V_{ga}, V_{g\beta}$	Composantes du vecteur de la tension du réseau dans le repère α, β .	V
$I_{fa}, I_{f\beta}$	Composantes du vecteur du courant circulant à travers le filtre dans le repère α, β .	A
V_{dcref}	Tension du bus continu de référence.	
dp, dq	Signaux de sortie des régulateurs à hystérésis pour le contrôle du CCM.	-

S_p, S_q	Signaux de sortie des régulateurs à hystérésis pour le contrôle du CCR.	-
H_p, H_q	Bandes d'hystérésis des régulateurs pour le contrôle du CCR.	-
$\varepsilon_p, \varepsilon_q$	Bandes d'hystérésis des régulateurs pour le contrôle du CCM	-
S_a, S_b, S_c	Etats de commutation des CCM et CCR.	-
θ_φ	Angle entre les vecteurs du flux statorique et flux rotorique.	°
α, β	repère stationnaire.	-
a, b, c	repère triphasé.	-
d, q	repère biphasé de Park.	-
ξ	Coefficient d'amortissement.	-
ω_n	Pulsation propre	rad/s

Notations

MAS	Machine asynchrone à cage d'écureuil
MASRB	Machine asynchrone à rotor bobiné
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MPPT	Technique d'extraction du maximum de la puissance
IGBT	Transistor bipolaire à porte isolée
2L-PWM-VSC	Convertisseur de puissance à deux niveaux de source de tension
CCM	Convertisseur côté machine
CCR	Convertisseur côté réseau
CV	Commande vectorielle
FOC	Commande vectorielle à flux orienté
VOC	Commande vectorielle avec l'orientation de la tension
PI	Régulateur proportionnel-intégral
IP	Régulateur intégral-proportionnel
PWM	Modulation de largeur d'impulsion
SVM	Modulation vectorielle spatiale
IA	Intelligence artificielle
FLC	Contrôleur à logique floue
ANN	Réseau neuronal artificiel
DTC	Commande directe du couple
DPC	Commande directe de la puissance
DSVM	Modulation vectorielle discrète
PDPC	Commande directe de puissance prédictive
SMC	Contrôle par mode glissant
ISFO	Contrôle par mode glissant
DVC	Contrôle direct de la tension
FEM	Force électromotrice
VC-DPC	Combinaison entre la commande vectorielle et directe de la puissance

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I Etat d'art sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.....	5
I.1 Introduction.....	5
I.2 L'énergie éolienne.....	5
I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	9
I.4 Principe d'une éolienne.....	10
I.5 Différents types d'éoliennes.....	10
I.5.1 Eolienne à axe vertical.....	10
I.5.1.1 Eolienne de type rotor de Darrieus.....	11
I.5.1.2 Eolienne de type rotor de Savonius.....	12
I.5.2 Eolienne à axe horizontal.....	12
I.6 Principaux composants constituants d'une éolienne à axe horizontal.....	15
I.7 Systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	16
I.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	16
I.7.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	17
I.7.2.1 Eolienne à vitesse variable partielle avec machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB)	19
I.7.2.2 Eolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à grande échelle et machines synchrones à aimants permanents (MSAP), MAS ou MASRB.....	20
I.7.2.3 Eolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à échelle partielle et machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	21
I.8 La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).....	23
I.8.1 Fonctionnement pour application moteur.....	24
I.8.2 Fonctionnement pour application génératrice.....	24
I.8.3 Avantage des éoliennes à base de la MADA.....	25
I.9 Convertisseurs de puissances utilisées pour les éoliennes à base de la MADA.....	26
I.10 L'évaluation des stratégies de control pour le système de conversion éolienne à base de la MADA	29
I.10.1 La commande vectorielle classique.....	31
I.10.2 La commande directe couple/puissance.....	31
I.11 Mode autonome des éoliennes à base de la MADA.....	32

I.12 Conclusion.....	33
Chapitre II Modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne.....	34
II.1 Introduction.....	34
II.2 Description et modélisation du système éolien.....	34
II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent.....	35
II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	35
II.2.2.1 Modèle Aérodynamique.....	35
II.2.2.2 Modèle dynamique de la turbine éolienne.....	37
II.2.2.2.1 Modèle de multiplicateur.....	38
II.2.2.2.2 Modèle de l'arbre mécanique.....	38
II.2.3 Fonctionnement et modélisation de la MADA.....	39
II.2.3.1 Principe et mode de fonctionnement de la MADA.....	39
II.2.3.2 Modélisation de la MADA.....	41
II.2.3.2.1 Hypothèses simplificatrices.....	41
II.2.3.2.2 Modèle de la MADA dans le système triphasé abc.....	42
II.2.3.2.3 Modèle de la MADA dans le repère tournant dq.....	43
II.2.3.2.4 L'expression des puissances statoriques et rotoriques.....	45
II.2.3.2.5 L'expression du couple électromagnétique.....	45
II.2.3.2.6 Choix du repère dq.....	46
II.2.4 Résultats de simulation du modèle de la MADA.....	46
II.2.5 Modélisation de la connexion convertisseur coté réseau (CCR).....	50
II.2.5.1 Modélisation du convertisseur de puissance.....	51
II.2.5.2 Modèle du bus continu.....	53
II.2.5.3 Modèle de la liaison au réseau via le filtre.....	53
II.2.5.4 Modèle du nœud de connexion au réseau de la MADA.....	54
II.3 Conclusion.....	54
Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA.....	56
III.1 Introduction.....	56
III.2 Description du dispositif des techniques de commande.....	56
III.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).....	57
III.3.1 Zone d'exploitation de turbine.....	57
III.3.2 Différents types de MPPT.....	57
III.3.3 Technique MPPT avec contrôle de la vitesse.....	58

III.3.4	Calcul des paramètres de régulateur PI.....	61
III.4	Commande vectorielle de la puissance (CV) pour le CCM.....	62
III.4.1	Principe.....	62
III.4.2	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	63
III.4.3	Commande vectorielle indirecte des puissances active et réactive de la MADA.....	68
III.5	Contrôle direct de puissance (DPC) pour le CCR.....	69
III.5.1	Principe.....	69
III.5.2	Calcul des puissances instantanées active et réactive.....	70
III.5.3	Calcul de la puissance instantanée active de référence.....	71
III.5.4	Comparateurs à hystérésis.....	72
III.5.5	Dérivés des Puissances active et réactive en fonction du temps.....	73
III.5.6	Détermination de secteur.....	74
III.5.7	Table de commutation.....	74
III.6	Résultats de simulations et discussions.....	75
III.6.1	Test de suivi de consigne du CCM et CCR.....	75
III.6.1.1	Test de suivi de consigne de la commande vectorielle pour CCM.....	75
III.6.1.2	Test de suivi de consigne de la commande directe de puissance pour CCR.....	78
III.6.2	Simulation de la chaine complète avec l'application d'un profil du vent.....	79
III.7	Conclusion.....	83
Chapitre IV	Commande directe de puissance (DPC) d'une chaine de conversion éolienne à base d'une MADA.....	84
IV.1	Introduction.....	84
IV.2	Description du dispositif des techniques de commande.....	84
IV.3	Technique MPPT avec asservissement de vitesse.....	85
IV.3.1	Calcul des paramètres de régulateur IP.....	86
IV.4	Commande directe de la puissance (DPC) pour le CCM.....	87
IV.4.1	Modèle de la MADA en (d q) dans une référence liée au rotor.....	87
IV.4.2	Principe de la commande directe de puissance (DPC).....	88
IV.4.3	Concept de base de DPC pour la MADA.....	89
IV.4.4	Contrôle direct du flux rotorique.....	90
IV.4.5	Les puissances statoriques instantanées active et réactive.....	91
IV.4.6	Comparateurs à hystérésis.....	91
IV.4.7	Table de commutation.....	93
IV.5	Commande directe de la puissance (DPC) pour le CCR.....	93

IV.6 Résultats de simulations et discussions.....	93
IV.7 Combiné entre la commande vectorielle et la DPC.....	99
IV.7.1 Les analogies mathématiques entre CV et DPC.....	99
IV.7.2 Principe de la méthode proposé (CV-DPC).....	100
IV.8 Résultats de simulations et discussions.....	101
IV.9 Conclusion.....	106
Conclusion générale et perspectives.....	107
Bibliographie.....	109
Annexes	
Publications du doctorat	

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est une énergie indispensable qui joue un rôle important pour le présent et le futur de l'humanité et devient un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des pays. Les demandes en besoin énergétique surtout pour les pays industrialisés, sont toujours croissantes [1].

De nos jours, une grande partie de la production de l'énergie électrique dépend des énergies combustibles fossiles conventionnelles, à savoir le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Ces sources combustibles sont responsables de la pollution environnementale et de l'émission des gaz à effet de serre, et auront une fin relativement proche [1], [2]. Au contraire, l'énergie nucléaire, dont l'utilisation a augmenté à cause des crises successives du pétrole. Elle est propre du point de vue pollution atmosphérique, en revanche, elle produit des déchets radioactifs dont le traitement est très coûteux, et, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. L'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable et la conséquence d'un accident, est très catastrophique [2], (exemple : le cas de la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 et l'accident de Fukushima-Japon 11 mars 2011).

En raison de multiples crises économiques et pétrolières, d'une part, et à cause des contraintes sur l'environnement, de fortes incitations des pouvoirs publics et des associations, poussent les centres de recherche spécialisés à se concentrer sur le développement des énergies renouvelables. La plupart des pays du monde se dirigent vers l'utilisation et l'exploitation des sources d'énergies propres, renouvelables et non polluantes. En fait, il existe plusieurs sources d'énergie renouvelable, l'hydroélectricité, l'énergie géothermique, biomasse, l'énergie solaire, et l'énergie éolienne. Le principal avantage de ces énergies renouvelables est que leur utilisation réduit considérablement la pollution et la production de gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique entraînant un réchauffement global [1].

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et la plus encourageante des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de croissance et connaît un grand essor devenant une candidate concurrente aux sources d'énergie traditionnelles. Grâce à sa propreté en termes d'écologie et économique. Son coût est absolument inférieur par rapport aux autres, la maintenance et l'entretien des stations de production sont très simples à effectuer [3]. La

production d'électricité par l'énergie éolienne est estimée à 29,1% de l'électricité totale du monde d'ici 2023 et devrait être de 34,2% d'ici 2050 [4].

Les éoliennes, sont essentiellement divisées en deux technologies : à vitesse fixe et à vitesse variable. Ce dernier type est le plus utilisé récemment en raison de plusieurs avantages par rapport à la technologie à vitesse fixe. Parmi elles, la maximalisation de la puissance disponible, la diminution des contraintes mécaniques imposées à la turbine, l'amélioration de la qualité de l'énergie et le bruit acoustique réduit [5], [6].

L'éolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très appréciée et largement utilisée actuellement. Elle a des avantages par rapport aux autres types des éoliennes à vitesse variable (machine synchrone à aimants permanents). En effet, les convertisseurs statiques triphasés de puissance dimensionnée pour une partie de la puissance nominale de la MADA impliquent moins de pertes par commutation, et un coût de production du convertisseur moins élevé. La MADA permet aussi un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme pour les deux modes hypo-synchrone et hyper-synchrone, assurant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques de puissance, c'est pour ces raisons que la MADA est particulièrement utilisée pour les applications à haute puissance [5], [6], [7], [8].

La commande de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA comprend d'une part la commande du convertisseur côté machine (CCM) et d'autre part celle du convertisseur côté réseau (CCR), en plus la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) pour maximiser la puissance convertie. La vitesse de la turbine doit donc être ajustée par rapport à la vitesse du vent [9].

Cette thèse s'intéresse à l'étude et à l'exploitation des différentes techniques de commande de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA pour effectuer des commandes séparément de la puissance active et la puissance réactive.

L'objectif principal est de développer une technique de commande qui combine entre la commande vectorielle classique des puissances (CV) et la commande directe de puissance (DPC) pour contrôler la MADA dans une chaîne éolienne dans le but de bénéficier des avantages simultanés des deux techniques, et éviter certaines difficultés rencontrées lors de l'application de l'une ou l'autre des deux méthodes.

La présente thèse décrit les stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans une chaîne de conversion éolienne. Elle est organisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, un état d'art sur l'énergie éolienne et les chaînes de conversion. Un aperçu général sur l'énergie éolienne, avec l'exposition de quelques chiffres sur les statistiques et le développement de l'énergie éolienne, les différents types existants, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, et enfin la stratégie et le principe de fonctionnement. Cet état d'art sera suivi par la présentation des différentes machines électriques utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne à vitesse fixe et variable, puis nous aborderons la MADA dans un système éolien et ses avantages par rapport aux autres machines surtout en grande puissance. L'utilisation des convertisseurs statiques de puissance sera discutée aussi, et dans la dernière partie du chapitre, il sera procédé à une analyse complète sur l'évaluation des stratégies de commande pour le système de conversion éolienne à base de la MADA.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude et à la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à base de la MADA, le modèle du vent, le modèle aérodynamique de la turbine, et le modèle mécanique de l'éolienne, seront abordés. Le mode de fonctionnement de la MADA sera présenté brièvement, la modélisation de la MADA dans le repère de Park lié au champ tournant afin d'établir la commande du CCM et afin de valider le modèle de la MADA des résultats de simulation seront effectués. A la fin du chapitre, on aura la modélisation de la connexion du convertisseur CCR au réseau électrique via le filtre qui sera présenté en vue d'établir la commande du CCR.

Dans le troisième chapitre nous nous intéresserons à la structure et à la commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA avec application des techniques de commande sur les différentes parties de cette chaîne. La technique de maximalisation de la puissance (MPPT) avec asservissement de la vitesse de rotation de la MADA utilisant un régulateur PI, la commande vectorielle indirecte classique des puissances statoriques active et réactive pour commander le CCM et la commande directe de puissance (DPC) pour commander le CCR avec réglage de la tension du bus continu à l'aide d'un régulateur PI. A la fin, des résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne complète, seront présentés et interprétés pour valider ces commandes.

Au quatrième et dernier chapitre, nous entamerons deux stratégies de commande pour la MADA dans une chaîne de conversion éolienne. La première sera la commande directe de puissance (DPC) et pour la deuxième nous combinerons entre les deux commandes proposées (CV-DPC). Dans la première partie la DPC est appliquée pour le CCM et CCR avec la présence de la MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation utilisant un régulateur intégral-proportionnel (IP). Des résultats de simulation de la chaîne complète seront présentés et discutés pour deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone.

Dans la deuxième partie du même chapitre nous proposerons une méthode pour le CCM afin de contrôler la MADA. Cette proposition consiste à combiner entre la commande vectorielle (CV) et la commande directe de puissance (DPC) pour une application éolienne. L'objectif de cette proposition est de profiter des avantages de ces deux techniques. Afin de valider cette proposition des simulations ont été réalisées et les résultats de simulations sont montrés et interprétés.

A la fin, nous concluons par une synthèse globale sur les travaux opérés dans cette thèse et quelques perspectives proposées pour les prochains travaux.

Chapitre I

Etat d'art sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Ces dernières années, la pollution de l'environnement est devenue une préoccupation majeure dans la vie quotidienne des gens et une éventuelle crise énergétique a conduit les gens à développer des nouvelles technologies pour produire de l'énergie à partir des ressources propres et renouvelables et non polluantes.

Les énergies renouvelables citées précédemment (l'hydroélectricité, l'énergie géothermique, biomasse, l'énergie solaire, et l'énergie éolienne) offrent des opportunités considérables pour leur développement en raison des importants avantages qu'ils offrent notamment du point de vue écologique et économique.

L'énergie éolienne devenu la source d'énergie électrique la plus rapide au monde, subit de fortes évolutions techniques. Plusieurs pays du monde ont procédé à des changements radicaux dans le politique gouvernemental au sujet de la pollution de l'environnement.

L'objectif du présent chapitre étant un état d'art sur l'énergie éolienne et les chaînes de conversion. Dans un premier temps, nous donnerons un aperçu général sur l'énergie éolienne, nous parlerons des quelques chiffres de la production d'électricité fournie par les éoliennes dans le monde (capacité annuelle cumulée et globale installée), sur les différents types des éoliennes, et nous nous intéresserons plus particulièrement aux éoliennes à axe horizontal, et les principaux composants constituant cette dernière, sur le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie éolienne, puis nous présenterons la machine asynchrone à double alimentation ainsi que les convertisseurs statiques de puissance et leurs utilisations dans une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA. Enfin nous aborderons un aperçu général sur les différentes stratégies de contrôle de cette chaîne.

I.2 L'énergie éolienne

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'énergie électrique [10]. La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres. Une différence de pression est créée d'où un déplacement perpétuel de masses d'air [11].

L'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde. On distingue les éoliennes offshore « au large » qui sont implantées en mer et les éoliennes terrestres. Ces deux types d'éoliennes fonctionnent de la même manière.

Pour satisfaire de fortes demandes en électricité et réduire les émissions de gaz à effet de serre, les systèmes d'énergie renouvelable et en particulier l'énergie éolienne ont attiré l'intérêt des scientifiques au cours des dernières décennies [12]. Les systèmes d'énergie éolienne respectueux de l'environnement sont devenus la source d'énergie électrique qui a la plus forte croissance au monde. Elle a démarré dans les années 1980 avec quelques dizaines de kW de production d'électricité et entre maintenant dans la gamme de production d'énergie de plusieurs GW.

Selon les dernières statistiques (2017) du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), plus de 54 GW d'énergie éolienne renouvelable propre ont été installés sur le marché mondial en 2016 (contre plus de 60 GW en 2015), qui comprend maintenant plus de 90 pays, dont 9 avec plus de 10 000 MW installés, et 29 qui ont passé la barre des 1 000 MW. La capacité cumulée a augmenté de 12,6% pour atteindre un total de 486,8 GW [13], [14].

En effet, la puissance éolienne mondiale installée a atteint 432 GW en 2015 (148 GW en Europe, en hausse de 6,3% par rapport à l'année précédente dont 44% sur le territoire allemand) fin 2015, l'Union européenne reste également une zone centrale d'implantation des éoliennes. Indiquant que l'éolien a un rôle essentiel dans le système moderne d'approvisionnement énergétique [13], [14]. Les prévisions quinquennales glissantes de GWEC prévoient près de 60 GW de nouvelles installations éoliennes en 2017, pour atteindre un marché annuel d'environ 75 GW d'ici 2021, pour porter la capacité installée cumulée à plus de 800 GW d'ici la fin de 2021 [14]. L'objectif est d'atteindre près de 2000 GW d'ici 2030, en fournissant jusqu'à 19% de l'électricité mondiale [15]. De plus, l'éolienne connectée au réseau joue un rôle important dans le maintien et l'amélioration des performances électriques de l'ensemble du système.

Outre la croissance rapide de la capacité totale installée, la taille et la capacité des éoliennes individuelles augmentent également afin de réduire le prix par kWh et augmenter l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne. Récemment, la plupart des grands fabricants d'éoliennes ont développé de grandes éoliennes dans la gamme de 1,5 à 6 MW [16], [17].

Les Figures I.1 et I.2 montrent respectivement la capacité éolienne cumulée annuelle et la capacité globale installée annuelle de 2001 à 2016 [13], [14].

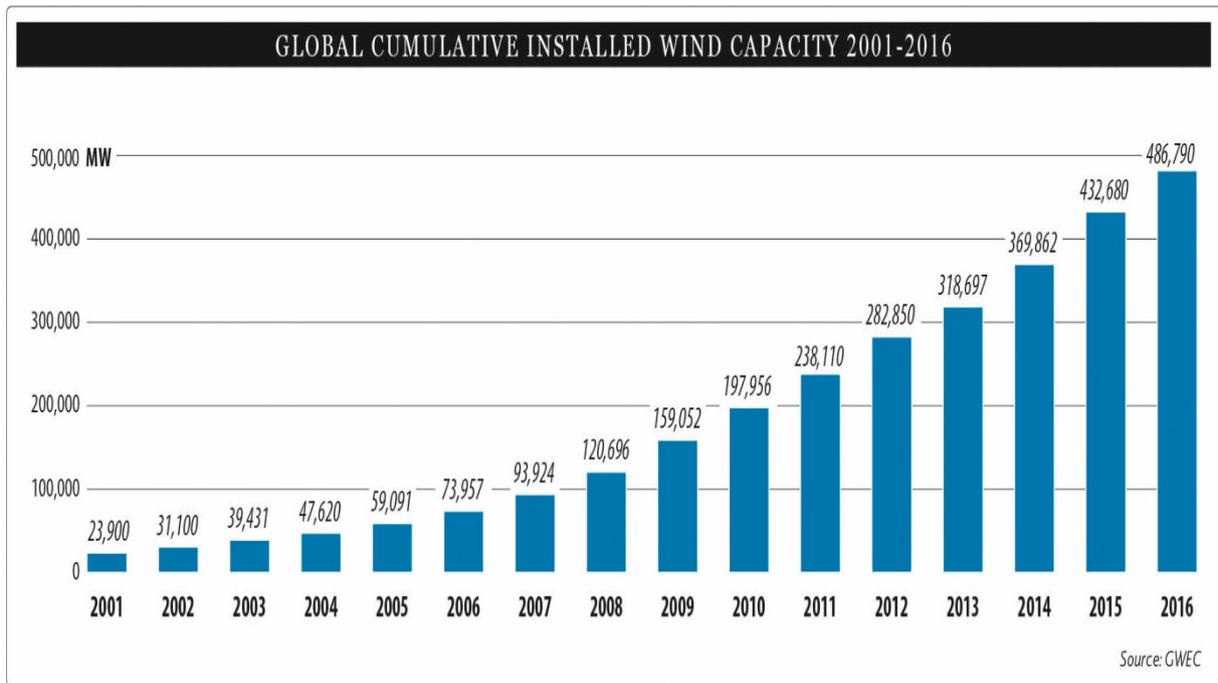


Figure I.1 Capacité annuelle cumulée d'énergie éolienne installée de 2001 à 2016 [14].

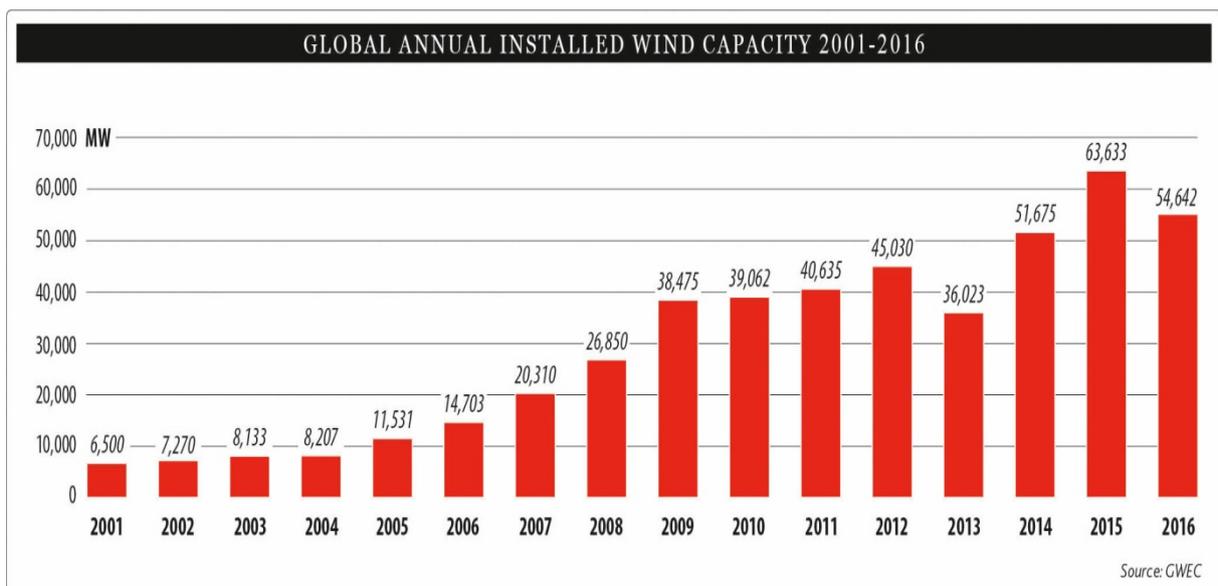


Figure I.2 Capacité globale installée annuelle de 2001-2016 [14].

En ce qui concerne l'Algérie, suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh) qui sont, après ceux de la géothermie, les plus bas du renouvelable [18]. L'énergie éolienne n'a pas encore connue à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement éolien dont dispose l'Algérie [19]. Ceci constitue un

atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique.

L'Algérie investit dans la production de l'énergie éolienne pour espérer atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe Sonelgaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW a été opérationnelle en 2012. Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014 [20].

Cette nouvelle centrale de production d'électricité, dont les travaux ont été entamés en 2011, appartient à la phase pilote du programme national des énergies renouvelables, qui consiste en l'installation d'une puissance globale en énergies renouvelables de 22GW à l'horizon 2030.

Le potentiel éolien en Algérie diffère selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux. Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6 m/s dans la région d'Adrar [20]. La Figure I.3, présente la cartographie des vents en Algérie.

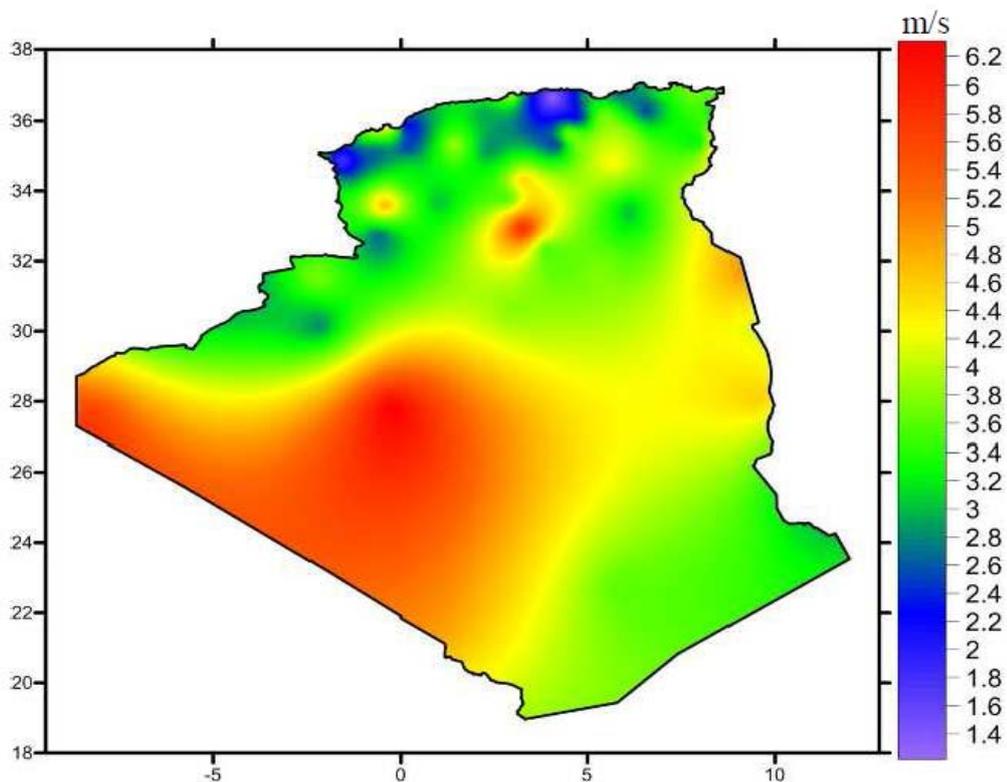


Figure I.3 Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [20].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories Selon leur puissance nominale [19].

Tableau I.1 Puissances des éoliennes

Echelle	Puissance fournie
Petite	Moins de 40kW
Moyenne	Entre 40kW et 1MW
Grande	Plus de 1MW

La Figure I.4 illustre la taille et la puissance nominale des éoliennes entre 1980 et 2020 [21].

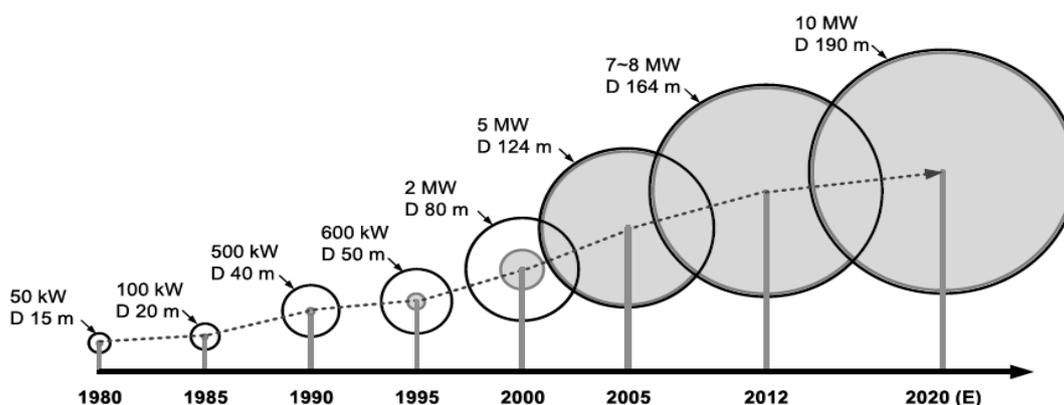


Figure I.4 Évolution taille-puissance des éoliennes (D : Diamètre de rotor).

I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Les principaux avantages et inconvénients des énergies éoliennes sont regroupés sur le tableau ci-dessous [22].

Tableau I.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ni des déchets toxiques. - Lutte contre le changement climatique, maintien la biodiversité des milieux naturels. - Produit d'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux et les sols. - La période de haute productivité, située en hiver où les vents sont les plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus forte. - L'éolienne est absolument démontable et recyclable. 	<ul style="list-style-type: none"> - La production d'énergie a fonction du vent. - Le coût de la construction d'une éolienne reste important. - Des effets sur le paysage, problème de bruit.

I.4 Principe d'une éolienne

Une éolienne est une génératrice d'électricité fonctionnant grâce à l'énergie cinétique du vent. Elle se compose d'un rotor (hélice) qui se met en rotation grâce à la force du vent ; c'est la première conversion qu'effectue l'éolienne : donc transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique laquelle sera transformée à son tour en énergie électrique. Cette énergie est ensuite transmise au réseau électrique ou stockée dans des batteries, le fonctionnement général est illustré par la Figure I.5 [23].

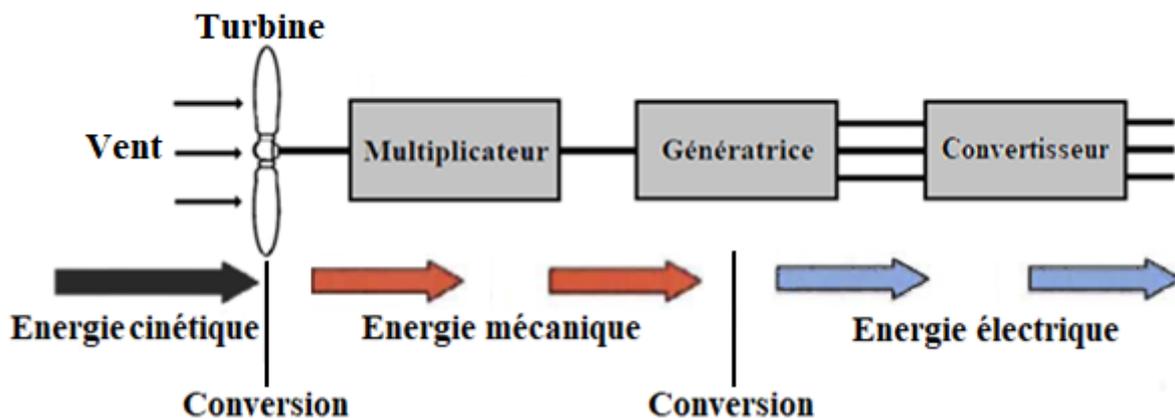


Figure I.5 Principe de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

I.5 Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice : à axe vertical et à axe horizontal [23]. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation [24].

I.5.1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières conçues pour produire de l'électricité. Elles sont peu utilisées actuellement car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydraulique avec une direction de vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la structure au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents à hauteur du sol, donc bénéficiant moins de vitesse de vent. De par son axe vertical, il y'a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer

automatiquement, il faut l'amorcer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production [25]. Il existe principalement deux technologies : les turbines Darrius classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [19], [23].

I.5.1.1 Eolienne de type rotor de Darrius

Le fonctionnement repose sur le fait qu'un profil placé dans un flux d'air généré selon différents angles est sujet à des forces de directions et de valeurs différentes. L'ensemble de ces forces crée le couple moteur qui entraîne ainsi la rotation du système (Figure I.6). La rotation du système ne démarre pas d'elle-même car la résultante des forces est due aux vitesses propres de déplacement et de la vitesse du vent. A l'arrêt, l'éolienne doit ainsi être initiée par un dispositif supplémentaire [26].

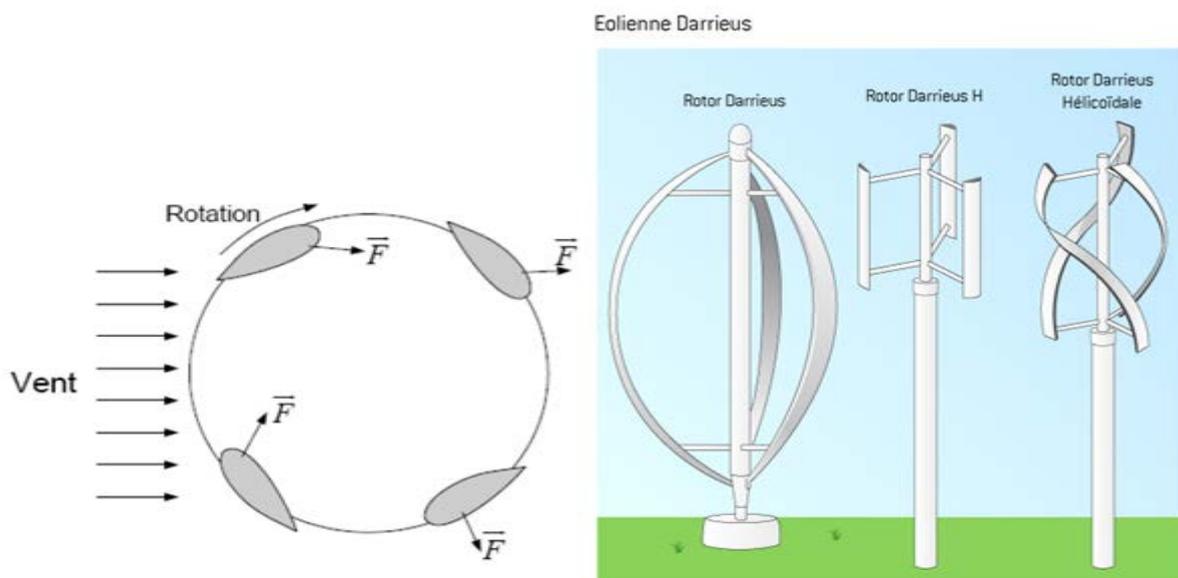


Figure I.6 Éolienne à axe verticale type Darrius [23], [26].

Avantages [27]

- ✓ Génératrice placée à ras de terre (selon les modèles),
- ✓ Moins encombrante qu'une éolienne "conventionnelle",
- ✓ Intégrable au bâtiment.

Inconvénients [27]

- ✓ Démarrage difficile par rapport à l'éolienne de type Savonius,
- ✓ Faible rendement.

I.5.1.2 Eolienne de type rotor de Savonius

Le rotor de Savonius (1925), dont le fonctionnement est basé sur les forces engendrées par le vent sur les faces d'un objet creux, ce qui induit un couple moteur provoquant la rotation du dispositif global (Figure I.7). La circulation d'air entre ces deux « demi-cylindres » renforce le couple moteur [26].

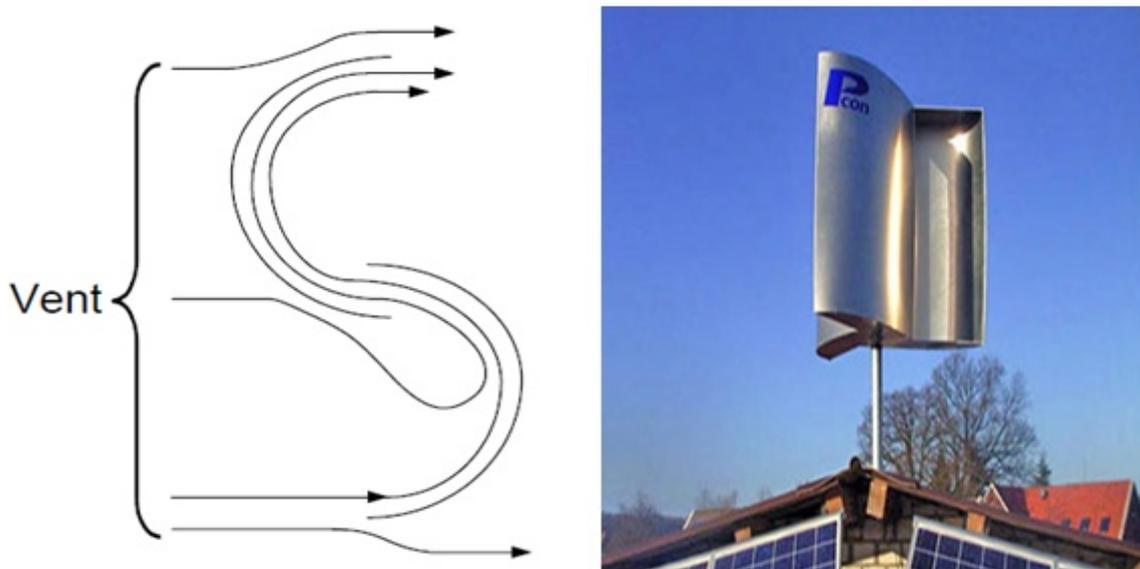


Figure I.7 Éolienne à axe verticale type Savonius [23], [26].

Avantages [27]

- ✓ Faible encombrement,
- ✓ Intégrable au bâtiment, esthétique,
- ✓ Démarre à de faibles vitesses de vent,
- ✓ Système peu bruyant,
- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent.

Inconvénients [27]

- ✓ Faible rendement,
- ✓ Masse non négligeable.

I.5.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (Figure I.8) sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales, profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion, pour générer un couple moteur entraînant la rotation [26]. Le

nombre des pales utilisé deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales [23]. Ce type d'éoliennes est le plus utilisé qu'à axe vertical.



Figure I.8 Éolienne à axe horizontal deux, trois pales et multi-pales [28].

La voilure peut être placée avant la nacelle (Eolienne en amont) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (Eolienne en aval). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mat. La Figure (I.9) montre les deux configurations [23].



Figure I.9 Type de configuration d'éolienne à axe horizontal.

Avantages [26]

- ✓ Coût limité,
- ✓ Peu de contraintes mécaniques,

- ✓ Grande efficacité.

Inconvénients [27]

- ✓ Bruit conséquent,
- ✓ Vibrations non négligeables,
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance C_p en fonction de la vitesse normalisée λ [28], qui représente le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. On peut noter ainsi que :

- ✓ Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...) ;

- ✓ Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (1, 2,3) (voire Figure I.10) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multipales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} [28].

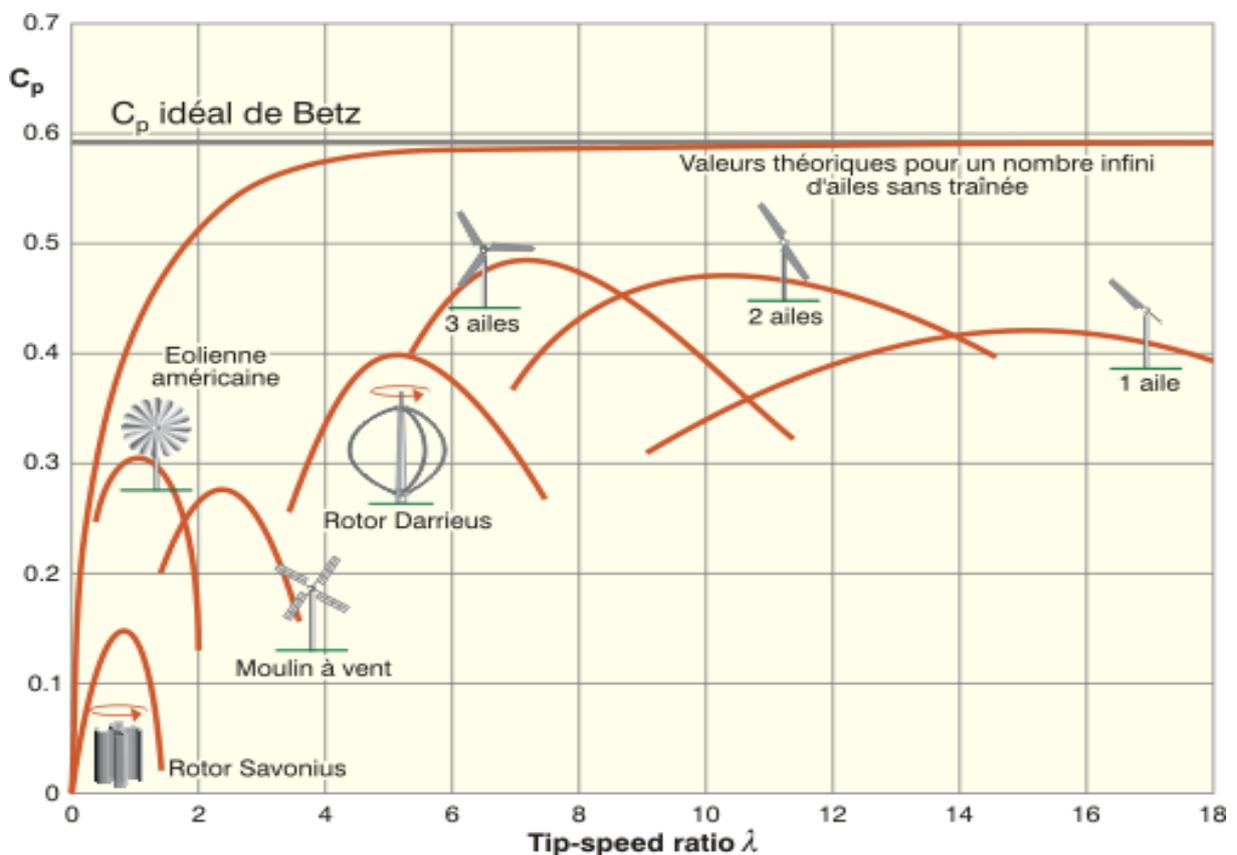


Figure I.10 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales pour différents types d'éoliennes [28].

I.6 Principaux composants constituant d'une éolienne à axe horizontal

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" comporte généralement des éléments mécaniques et électriques constituée de trois éléments principaux qui sont illustrés sur la Figure I.11 [26], [29] :

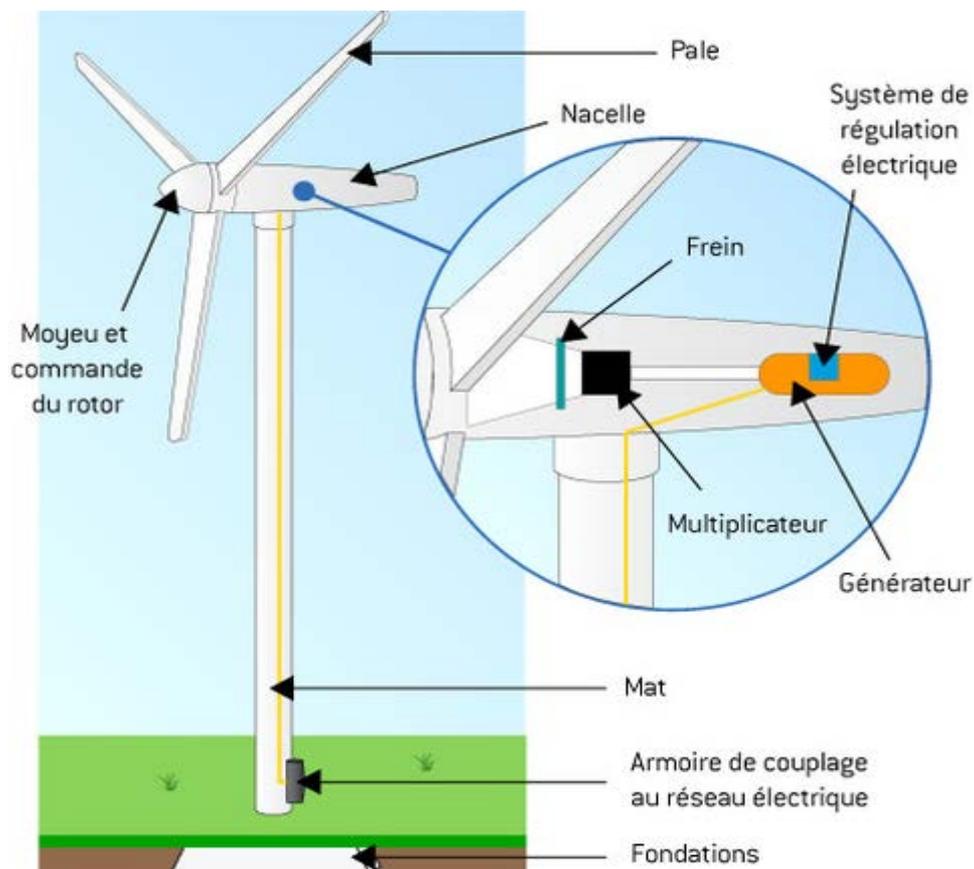


Figure I.11 Principaux éléments constituant une éolienne.

✓ Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m / 100 m / 105 m de hauteur) [26].

✓ La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes

hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [26].

✓ Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [26].

I.7 Systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone ou d'une machine synchrone [23], [26], [29].

I.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe utilisant une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice directement couplée au réseau électrique sans l'utilisation des convertisseurs de puissance (Figure I.12), le banc de condensateur fournit le courant magnétisant pour le générateur. La machine fonctionne sur une plage de vitesse très limitée à cause du nombre de paires de pôles qui est fixe. La fréquence étant imposée par le réseau [29], [30], [31]. La première éolienne pratique a été inventée au Danemark, appelée «Danish Concept» [31]. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système d'orientation des pales (pitch contrôle). La machine fonctionne alors en hyper-synchrone à une vitesse $\Omega_s(1-g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme (souvent $N_s=1500$ tr/min) et g le glissement [30]. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de forts vents, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta=90^\circ$) [30]. Les avantages de cette structure sont : la simplicité de construction, la haute fiabilité et le faible coût de maintenance [12], [31]. Cependant, elle présente des inconvénients : le système ne délivre la puissance nominale au réseau qu'à une vitesse de vent donnée, ce qui entraîne une faible efficacité de conversion d'énergie [17]. La compensation de la puissance réactive avec un banc de condensateur est nécessaire pour compenser la demande de puissance réactive par le générateur asynchrone, ce qui entraîne une augmentation du coût [12].

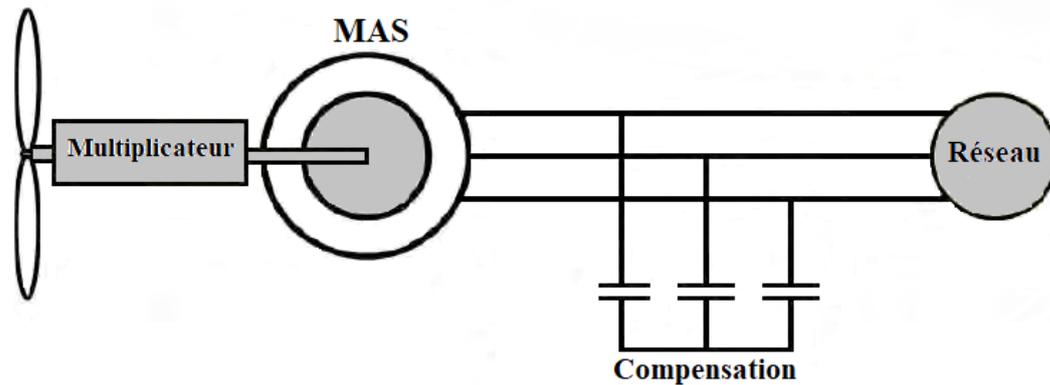


Figure I.12 Eolienne à vitesse fixe avec générateur asynchrone à cage d'écurieil.

I.7.2 Les éoliennes à vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}) [28]. La Figure I.13 montre que la position du maximum de la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Nous verrons dans ce qui suit différents ensembles convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie [28].

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants [19] :

- ✓ Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti,
- ✓ Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n ,
- ✓ Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie,
- ✓ Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

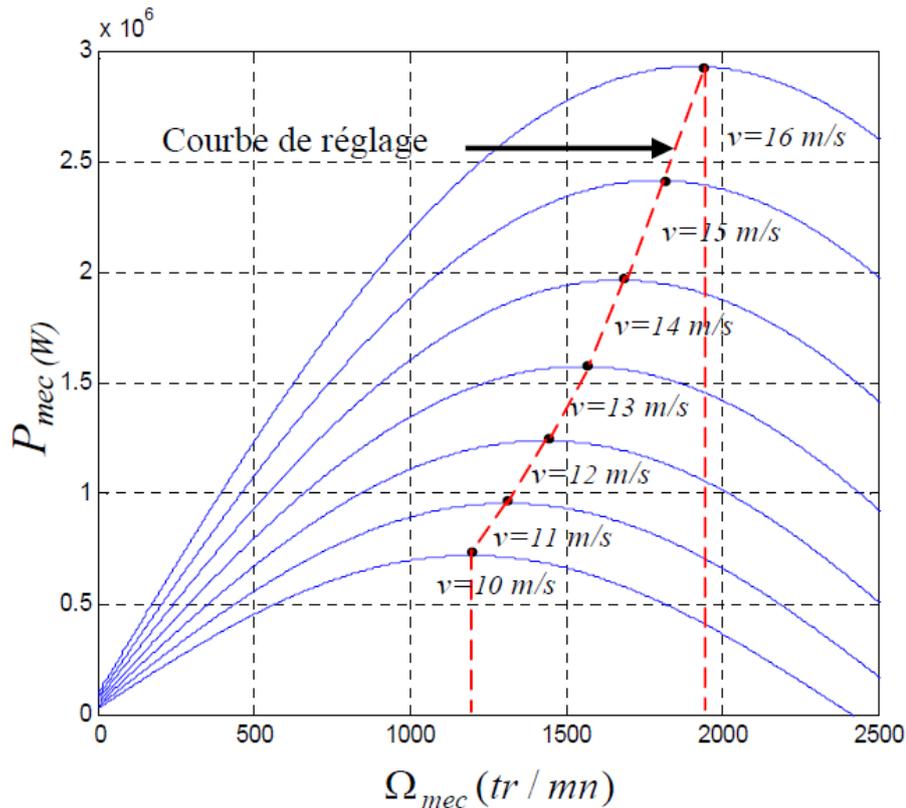


Figure I.13 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [19].

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent pour le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être définie selon trois zones, comme l'illustre la Figure I.14 [23], [24], [26], [28] :

- Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro,
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale v_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeur nominale afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par quatre principales techniques de contrôle (pitch, Stall, rotation horizontale de l'axe de rotation, vitesse de rotation continûment variable). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

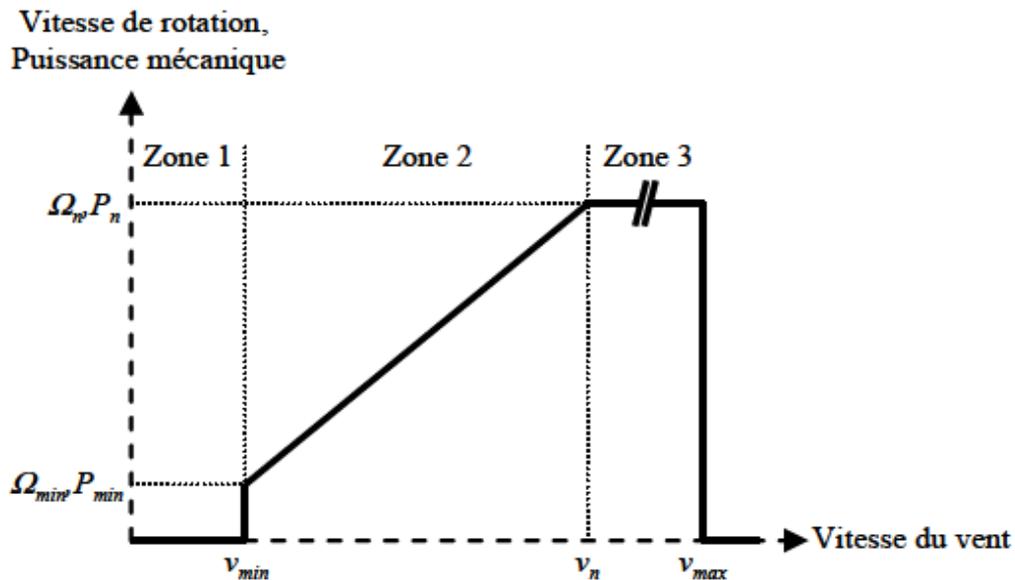


Figure I.14 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [24]

Les éoliennes à vitesse variable peuvent être classées selon la topologie des générateurs et l'interface d'électronique de puissance [12] :

I.7.2.1 Eolienne à vitesse variable partielle avec machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB) [12], [23], [26]

L'éolienne à vitesse variable partielle se compose d'une génératrice à rotor bobiné (MASRB) à la place du rotor à cage d'écureuil, et un mécanisme de variation de la résistance rotorique. Le stator de la MASRB est directement connecté au réseau, alors que l'enroulement rotorique est relié à une résistance externe du rotor, à travers le convertisseur dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotorique permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotorique. L'amélioration par rapport à la configuration précédente est que la vitesse de rotation de l'éolienne peut être ajustée d'environ 10% de la vitesse synchrone du générateur, ce qui conduit à une efficacité accrue dans la conversion d'énergie. Cependant, outre la plage de variation de vitesse limitée, la perte de puissance dissipée dans les résistances rotoriques et la compensation externe requise reste un inconvénient important pour cette configuration.

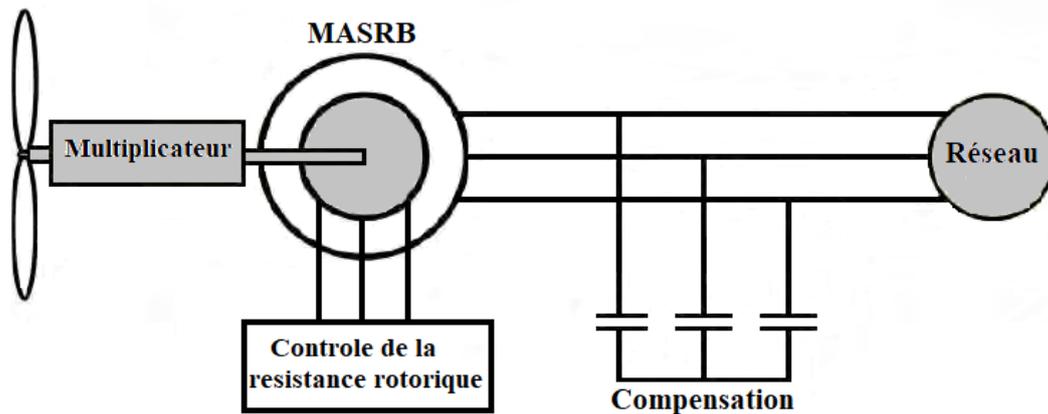


Figure I.15 Eolienne à vitesse variable partielle avec générateur asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par variation de la résistance rotorique.

Actuellement, la technologie s'est développée vers la vitesse variable. Les technologies à vitesse variable peuvent être subdivisées en deux types: les générateurs à double alimentation (MADA) avec des convertisseurs à échelle partielle et les générateurs synchrones à aimant permanent (MSAP), les générateurs à induction à cage d'écureuil (MAS) ou à rotor bobinée (MASRB), avec des convertisseurs à grande échelle [12], [21], [32].

I.7.2.2 Eolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à grande échelle et machines synchrones à aimants permanents (MSAP), MAS ou MASRB.

Ce concept est très important pour les éoliennes nouvellement installées. Il est illustré à la Figure I.16, il peut être équipé d'un générateur d'induction à cage d'écureuil (MAS), rotor bobinée (MASRB) ou générateur synchrone à aimant permanent (MSAP). Ce dernier étant le plus utilisé par l'industrie des éoliennes. En introduisant un convertisseur statique à pleine échelle bidirectionnel à la puissance du générateur, son fonctionnement est similaire à celui du système éolien basé sur la MADA. Son côté rotor assure le réglage de la vitesse de rotation dans une large plage, tandis que son côté réseau transmet la puissance active au réseau et tente d'annuler la consommation de puissance réactive [12], [21]. Les principaux avantages sont l'élimination des bagues collectrices, une boîte de vitesses plus simple ou même supprimée, et une pleine puissance et vitesse contrôlable, ainsi qu'une meilleure capacité de support du réseau. Cependant, il présente des inconvénients tels que, le convertisseur de puissance à grande échelle, qui conduit aux composants électroniques à haute puissance, étant plus sollicités et plus coûteux ainsi que des pertes de puissance plus élevées dans le convertisseur; C'est la raison principale pour laquelle ce concept n'est pas toujours utilisé dans les éoliennes terrestres nouvellement installées [12], [21]. Par conséquent, cette topologie convient aux

éoliennes de niveau MW de prochaine génération avec un niveau de tension moyen et une puissance élevée à partir de 7 MW, étant donné que les algorithmes de contrôle sont conçus pour minimiser les pertes ci-dessus [16].

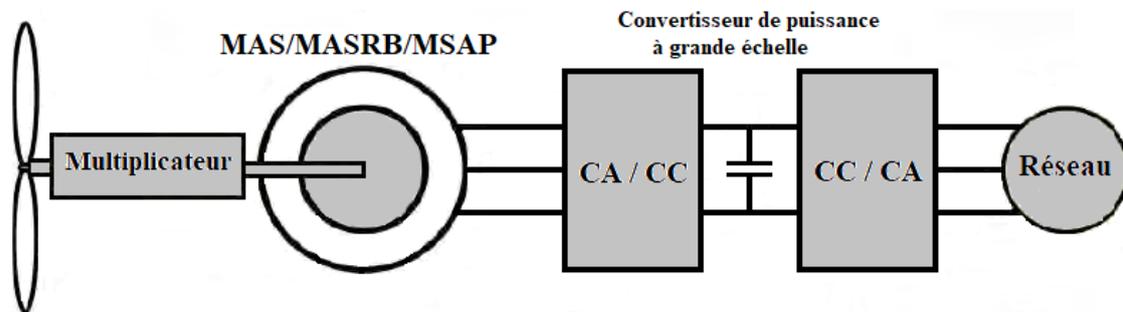


Figure I.16 Éolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à pleine échelle.

I.7.2.3 Éolienne à vitesse variable avec convertisseur de puissance à échelle partielle et machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Cette machine est la solution la plus utilisée à ce jour et a été installée à grande échelle depuis 2000, comme le montre la Figure I.17. La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB) les enroulements de stator du MADA sont directement connectés au réseau électrique, et les enroulements du rotor sont connectés au réseau électrique grâce à un convertisseur statique bidirectionnel avec environ $\pm 30\%$ de puissance du générateur [21], [33], [34]. Dans ce concept, les éoliennes basées sur MADA sont hautement contrôlables, permettant une extraction d'une puissance maximale sur une large gamme de vitesses de vent [35], [36], [37] et la MADA est particulièrement utilisée pour les applications de forte puissance, en raison du coût plus faible des convertisseurs et des pertes de puissance plus faibles [32]. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyper-synchrone où la puissance passe du rotor au réseau et hypo-synchrone où la puissance passe du réseau au rotor. Cette machine est choisie, dans la chaîne de conversion, pour le reste du travail de thèse.

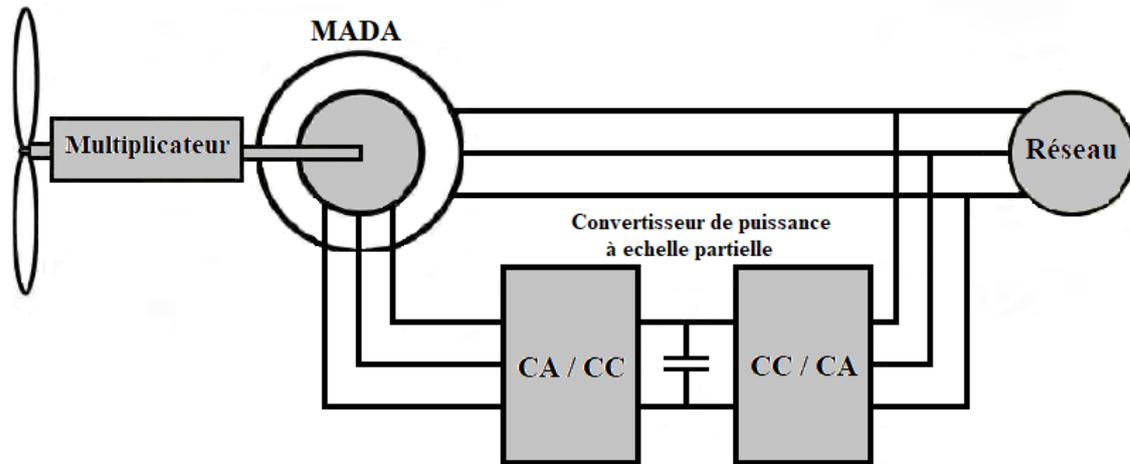


Figure I.17 Eoliennes à vitesse variable avec générateur asynchrone à double [12], [31].

La topologie de génératrices éoliennes à vitesse variable en utilisant la MADA est la plus grande part de marché des technologies dominantes dans les fabricants d'éoliennes avec une gamme de puissance de 1,5-3 MW dans le courant dominant [21], [38], [39] et 5-8 MW dans le haut de gamme en termes de niveau de puissance et occupe environ 50% du marché de l'énergie éolienne (Tableau I.3) [21].

Tableau I.3 Les meilleurs fabricants et gammes de produits éoliens en 2015 [21]

Rang	Fabricant	Parts de marché mondiales	Diamètres du Rotor	Gamme de puissance
1	Goldwind (Chine)	12.5 %	70-121 m	1.5-3 MW
2	Vestas (Danemark)	11.8 %	90-136 / 164 m	1.8-3.45 / 8 MW
3	GE Wind (USA)	9.5 %	83-137 / 150 m	1.7-3.8 / 6 MW
4	Siemens Wind (Danemark / Allemagne)	8.0 %	101-142 / 154 m	2.3-4/ 6-8 MW
5	Gamesa (Espagne)	5.4 %	80-132 / 132 m	2-3.3 / 5 MW
6	Nercon (Allemagne)	5.0 %	44-141 m	0.8-4.2 MW

Les quatre types de configurations des éoliennes à vitesse fixe ou variable utilisant les différentes machines (MAS, MASRB, MSAP et MADA) sont présentées par le Tableau I.4

Tableau I.4 Synthèse des quatre types des machines utilisant les systèmes d'éoliennes [38], [39].

Type de la turbine	Vitesse fixe	Vitesse variable partielle	Vitesse variable	
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Machine	MAS	MASRB	MADA	MSAP
Plage de la vitesse	1%	10%	30%	100%
Convertisseur de puissance	Pas nécessaire	Pont de diodes et un circuit d'hacheur à base de transistor bipolaire (IGBT)	Convertisseur bidirectionnel	Convertisseur bidirectionnel
Capacité du convertisseur	0%	10%	30%	100%
Compensation	Condensateurs	Condensateurs		
Technique MPPT	Impossible	Limité	Réalizable	Réalizable
Exemple	Vestas V82	Suzlon S88	RE Power 6M	Enercon E-126
Eolienne commerciale	1.65 MW	2.1 MW	6.0 MW	7.5 MW

I.8 La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation)

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), qui est largement utilisée aujourd'hui. Inventée par Dolivo-Dobrovolsky en 1889. C'est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. La différence de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil, il possède un bobinage triphasé couplé en étoile et identique à celui du stator. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (Figure I.18), ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques [26], traditionnellement il est utilisé pour les démarrages.

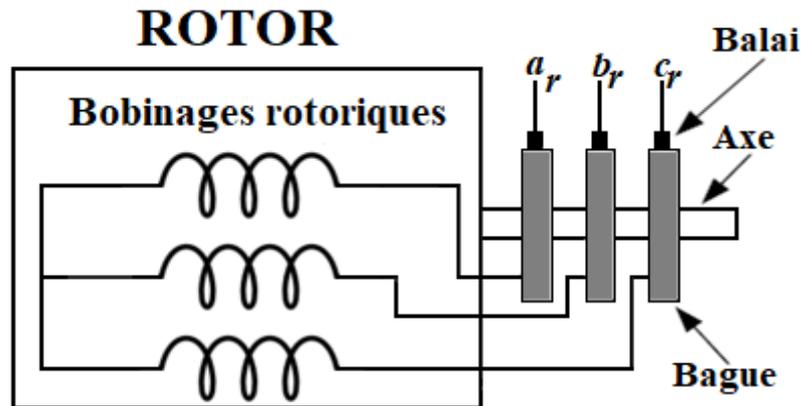


Figure I.18 Rotor de la MADA [26].

La topologie de la MADA lui confère différentes applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [40], [41]. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine.

I.8.1 Fonctionnement pour application moteur [40], [41]

Pour le cas de l'application moteur où la MADA est alimentée par deux convertisseurs statiques, l'un au stator et l'autre au rotor, les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaires et non linéaires avec ou sans capteur de vitesse ou de position.

Les travaux présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement.

I.8.2 Fonctionnement pour application génératrice [40], [41]

Avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA connaissent un grand essor et développement cette application concerne le thème considéré dans cette thèse.

Les principaux résultats obtenus avec ce type de configuration de la MADA peuvent être partagés en quatre catégories :

- ✓ Modélisation, zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA,
- ✓ Qualité de l'énergie fournie et qualité des courants et des tensions, notamment en présence des défauts au niveau du réseau d'alimentation.
- ✓ Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position,
- ✓ Dimensionnement du convertisseur du rotor.

I.8.3 Avantage des éoliennes à base de la MADA

✓ Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [26],

✓ Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont minimisées et le rendement du système de génération est amélioré,

✓ Les dimensions des filtres sont réduites et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri,

✓ Le facteur de puissance peut être contrôlé car la génératrice pouvant être commandée pour fonctionner de façon identique à un alternateur synchrone [42]. En effet, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur statique connecté coté rotor de la MADA [29].

La caractéristique (puissance, vitesse) mesurée d'une éolienne de 1,5 MW à base de la MADA se distingue par quatre zones de fonctionnement (Figure. I.19) [43].

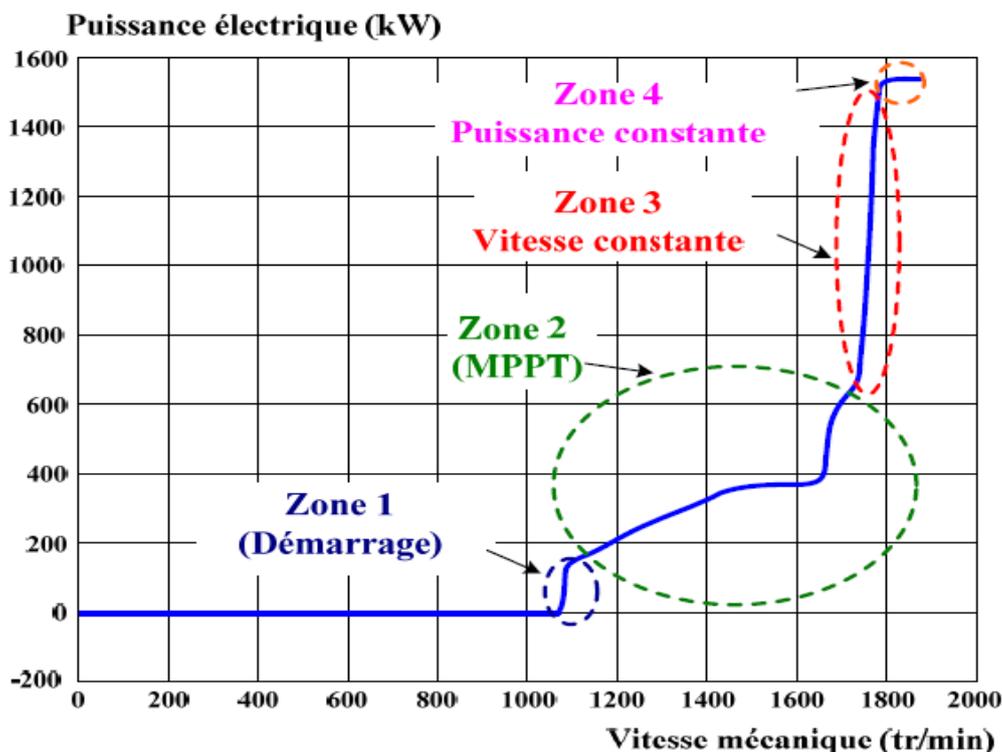


Figure I.19 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable d'une MADA de 1.5MW [43].

- La zone 1 correspond au démarrage de l'éolienne : celle-ci commence à produire de la puissance à partir de la vitesse de 1050 tr/min,

- La zone 2 est la zone pour laquelle la vitesse de la génératrice est adaptée afin d'extraire le maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking: MPPT). Ceci est réalisé grâce à un algorithme MPPT permettant d'imposer un couple de référence. Néanmoins, l'angle d'orientation des pales est maintenu constant,

- La zone 3 pour laquelle la vitesse de la génératrice est maintenue constante et égale à 1750 tr/min. Cette vitesse est imposée par une action sur l'angle d'orientation des pales ou par une régulation en boucle fermée pour permettre un fonctionnement hyper synchrone [44].

Dans ce cas, la puissance fournie au réseau est proportionnelle au couple (d'origine éolien) appliqué,

- La zone 4 correspond à la limitation de la puissance générée à sa valeur maximale (1.5MW) grâce au contrôle de l'angle d'orientation des pales.

I.9 Convertisseurs de puissance utilisés pour les éoliennes à base de la MADA

L'introduction des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance dans les éoliennes n'a cessé de croître depuis les années 1980, en raison de l'évolution des commutateurs à semi-conducteurs et des microprocesseurs, de nombreuses techniques d'électronique de puissance ont été développées au cours des dernières décennies [45], [46]. Leur intégration dans les systèmes de conversion joue un rôle important dans l'amélioration des performances et de la puissance des éoliennes. Dans les années 1990, c'était principalement l'utilisation du contrôle de la résistance rotorique avec un pont de diodes et un interrupteur électronique de puissance. Enfin, le convertisseur de puissance bidirectionnelle a émergé, d'abord dans la puissance à échelle partielle pour MADA, puis puissance en pleine échelle [17], [47], [48].

La solution la plus utilisée dans les convertisseurs de puissance pour les systèmes de conversion éolienne dans la gamme de puissance 1,5-3 MW est l'utilisation de la configuration de deux convertisseurs de source de tension à deux niveaux bidirectionnels [39].

Les systèmes de conversions éoliennes disponibles sur le marché pour des puissances comprises entre 1,5 et 3 MW. Ces systèmes éoliens sont fabriqués par 44 sociétés dans 163 modèles. Par exemple, la société canadienne AAER fabrique six modèles de système éolien (modèles A1650-A2000) avec des plages de puissance comprises entre 1,65 et 2,0 MW. Dans la plage de puissance de 1,5-3 MW, il existe 60 modèles de système éolien utilisant la MADA, y compris un modèle avec un enroulement de stator conçu pour une connexion directe à un réseau moyenne tension (par la société espagnole Acciona). Il y a 66 modèles implémentés avec des MSAP, 18 modèles implémentés avec les machines à induction

(machines à cage ou à rotor bobiné), et 19 modèles de système éolien mis en œuvre en utilisant des MAS à rotor bobiné avec excitation externe, pour plus de détails sur les commerciaux disponibles de la gamme de 1,5 à 3 MW voir la référence [39].

En ce qui concerne les convertisseurs de puissance, la plupart des systèmes éoliens sont équipés de convertisseurs bidirectionnels basés sur des commutateurs bipolaires (IGBT) basse tension (typiquement des dispositifs 1700 V pour une tension nominale de 690 V) [39]. Il est conclu que les convertisseurs bidirectionnels mis en œuvre avec des IGBT basse tension constituent la topologie électronique de puissance la plus importante pour la plage de puissance entre 1,5 à 3 MW.

Les dispositifs à semi-conducteurs de puissance sont également des technologies clés et les principales préoccupations pour les convertisseurs d'énergie éolienne, parce qu'ils sont liés à de nombreuses mesures de performances critiques, telles que : comme coût, densité de puissance, efficacité, fiabilité et modularité [21].

Les technologies de semi-conducteurs à base de silicium dans les applications d'énergie éolienne comprennent les IGBT emballés par module, des IGBT emballés sous pression et des packs de presse intégrés thyristors à commutation de portes (IGCT) [21]. En plus des dispositifs de puissance de silicium, le SiC dispositif qui est revendiqué pour avoir de meilleures caractéristiques de commutation et des pertes d'énergie plus faibles, est également prometteur [49].

Le convertisseur d'électronique de puissance utilisé dans un système d'énergie éolienne basé sur la MADA est un convertisseur bidirectionnel composé de deux onduleurs de tension triphasés partageant la liaison bus continu. La Figure I.20 montre le schéma simplifié d'un convertisseur général bidirectionnel à 2 niveaux [31].

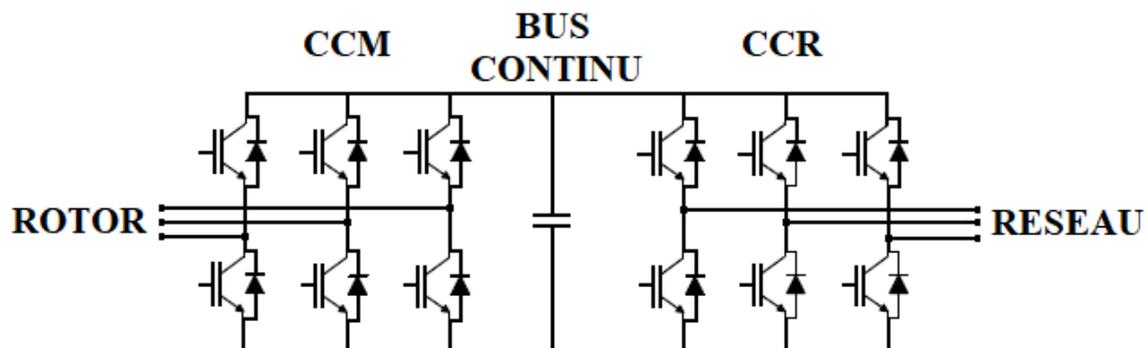


Figure I.20 Topologie du convertisseur de source de tension à deux niveaux pour l'application de l'énergie éolienne.

Le convertisseur de puissance à deux niveaux (2L-PWM-VSC) est la topologie de convertisseur triphasé la plus fréquemment utilisée dans les systèmes d'éoliennes à base d'une MADA. Les connaissances disponibles dans ce domaine sont vastes et il s'agit d'une technologie bien établie. En tant qu'interface entre la machine et le réseau dans le système d'éolienne, deux convertisseurs sont généralement configurés comme une structure bidirectionnelle à 2 niveaux, comme le montre la Figure I.21. Un avantage technique de cette solution est la structure relativement simple et peu de composants, ce qui contribue à une performance robuste et fiable éprouvée [17]. Cependant, à mesure que la plage de puissance et de la tension de l'éolienne augmente, le convertisseur peut subir des pertes de commutation plus importantes et une efficacité plus faible au niveau de la puissance (MW) et moyenne tension (MV) [17]. Les dispositifs de commutation disponibles doivent également être mis en parallèle ou connectés en série afin d'obtenir la puissance et la tension requises des éoliennes; cela peut conduire à une simplicité réduite et la fiabilité du convertisseur de puissance [50]. Un autre problème dans cette solution : les deux seuls étages de la tension introduisent des tensions dv/dt relativement plus élevées à la machine. Des filtres de sortie volumineux peuvent être nécessaires pour limiter le gradient de tension et réduire le THD [51]. Cette topologie est l'état de la technique des éoliennes basées sur la MADA, par exemple [33], [47], [48], le schéma simplifié d'un convertisseur bidirectionnel triphasé est montré par la Figure I.21 [31].

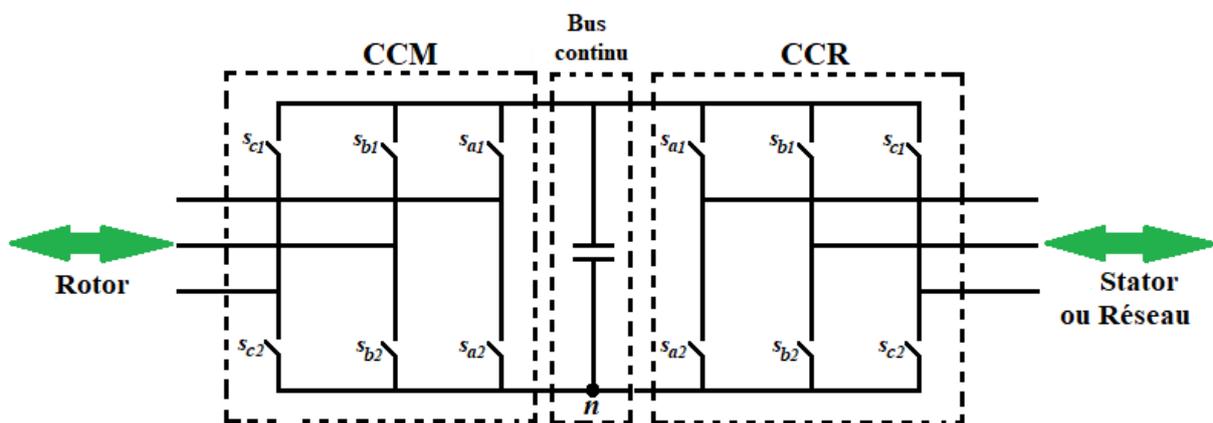


Figure I.21 Schéma général d'un convertisseur Bidirectionnelle à 2 niveaux.

Sur la Figure I.21, chaque convertisseur composé de six commutateurs pour le convertisseur côté rotor et de six commutateurs pour le convertisseur côté réseau. Lorsque le convertisseur modifie une tension du réseau avec une amplitude et une fréquence fixées à une tension ajustable, il est normalement appelé redresseur [52], qui est le cas pour le convertisseur de

côté réseau. Lorsque le convertisseur transforme une tension fixe en une tension triphasée avec une amplitude et une fréquence variable pour une charge alternative, on l'appelle souvent un onduleur.

Qu'il s'agisse d'un onduleur ou d'un redresseur, la puissance peut circuler de côté vers l'autre côté, et vice versa. Ainsi, le convertisseur bidirectionnel est considéré comme un convertisseur CA/CA indirect bidirectionnel [17], [33], [52], [53]. Les convertisseurs du côté du réseau et du côté de la machine génèrent la tension ou le courant triphasé avec l'amplitude et la fréquence désirée sur les enroulements rotoriques [31]. Les tensions ou les courants désirés sont la conséquence d'une approche de contrôle qui est l'objectif principal de ce travail. Comme le montre la Figure I.21, les sorties des contrôleurs sont des signaux de commande (S_{rabc} et S_{sabc}) qui peuvent être des commandes de tension ou de courant. Ces signaux de commande déterminent comment les commutateurs de chaque phase sont commandés ON ou OFF pour moduler les tensions ou les courants qui suivent les signaux de commande aux différents niveaux de contrôle [31].

I.10 L'évaluation des stratégies de contrôle pour le système de conversion éolienne à base de la MADA

Le contrôle du système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable à base de la MADA se compose de trois parties principales (Figure I.22): contrôle de la turbine, contrôle du côté rotor de la machine et contrôle côté réseau [12], [17], [24].

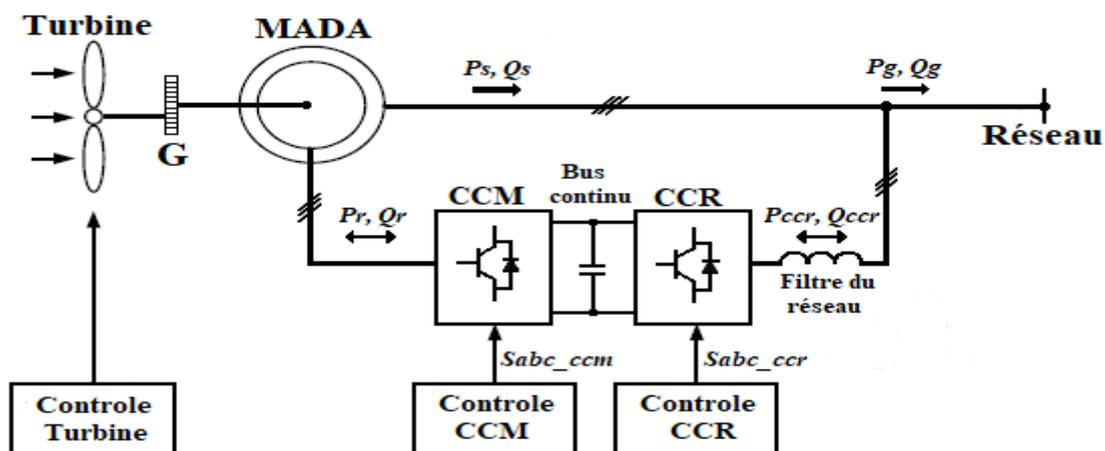


Figure I.22 Le schéma de contrôle des systèmes éoliens à base de la MADA avec le convertisseur Bidirectionnel à 2 niveaux.

Le contrôle de la turbine éolienne fournit une référence de puissance active (P_{sref}) ou une référence de couple électromagnétique (C_{emref}) pour contrôler la MADA [12]. Cette valeur de

référence est calculée en fonction de la vitesse du vent mesurée afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu la technique du point de puissance maximum (MPPT). On distingue deux modes [24], [29] :

- ✓ le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation,
- ✓ le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Le convertisseur côté rotor de la machine (CCM) génère une tension triphasée avec une amplitude et une fréquence variable pour contrôler le couple de la machine ou la puissance active (P_s) et la puissance réactive (Q_s) échangés entre le stator et le réseau. Le convertisseur côté réseau (CCR) maintenir la tension du bus continu constante, le contrôle la puissance active côté réseau échangé bidirectionnellement entre le rotor de la machine et le réseau. Un fonctionnement à facteur de puissance unitaire pour CCR, mais il est également possible génère une puissance réactive indépendante injectée dans le réseau [32], [34], [54], [55].

Plusieurs méthodes ont été proposées pour contrôler le CCM et le CCR pour le système d'énergie éolienne à vitesse variable à base d'une MADA. La commande de l'électronique de puissance et de la machine électrique peut être divisée en deux groupes principaux: la commande directe du couple ou puissance et la commande vectorielle classique sont les stratégies de contrôle pratiques ont été bien développés pour les systèmes de production d'énergie éolienne basés sur la MADA depuis 1996 [16], [31]. La Figure I.23 montre la classification des stratégies de contrôle [30], [31].

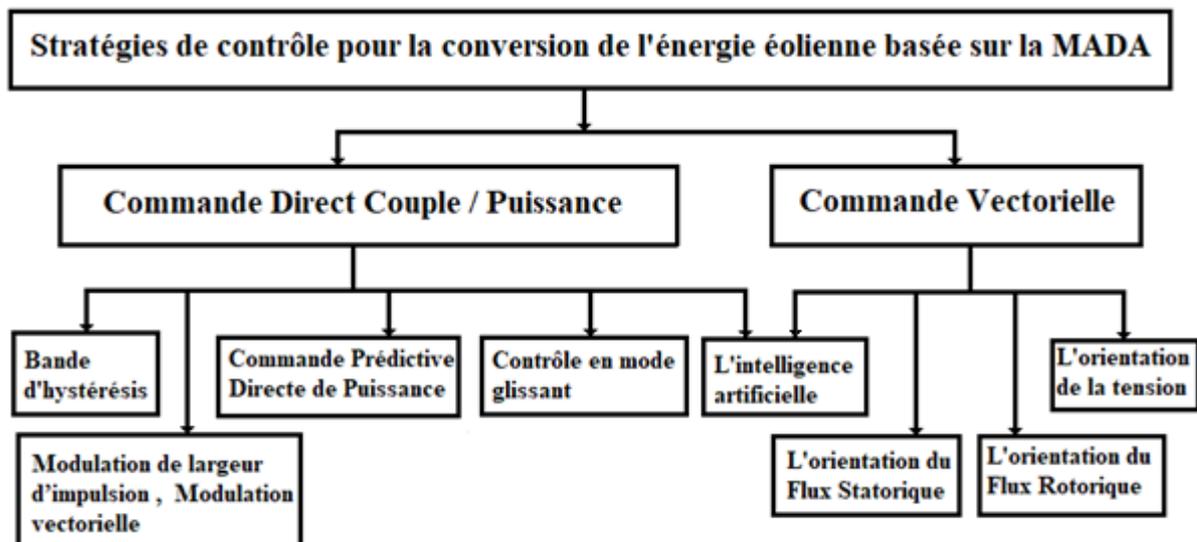


Figure I.23 Classification des méthodes de contrôle pour les systèmes de conversion éolienne à base de la MADA.

I.10.1 La commande vectorielle classique

La plupart des méthodes de commande existantes utilisent la commande vectorielle classique basée sur l'orientation de la tension (VOC) [34], [56], [57] ou la commande orientée du flux (FOC) [34], [58]-[61]. La commande vectorielle occupe aujourd'hui une place très importante dans l'industrie. Elle a été inventée durant les années 1970 sur la base de contrôle de la machine à courant continu à excitation séparée qui garantit la dynamique et la performance statique via des boucles de contrôle de courant interne avec un contrôleur linéaire proportionnel-intégral (PI). Cependant, il a une faible performance dynamique et ses performances dépendent des paramètres de la machine et de la qualité de la boucle de commande, qui est fortement influencée par la tension du réseau.

Ensuite, une technique de modulation complexe telle que la modulation de largeur d'impulsion (PWM) ou la modulation vectorielle (SVM) avec l'équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu est nécessaire pour appliquer ces techniques aux convertisseurs, pour résoudre ce problème, plusieurs approches ont été proposées telles que la SVM avec la sélection d'états de commutation redondante [12] et le PWM avec injection de tension homopolaire [12].

L'intelligence artificielle (IA) est un contrôleur avancé basé sur la connaissance experte (connaissance humaine) et l'imprécision implicite. Le contrôleur à logique floue (FLC) [62], [63], le réseau neuronal artificiel (ANN) [64]-[66] et neuro-flou [67] étaient connus sous le nom de contrôleurs IA qui étaient largement utilisés dans les applications d'électronique de puissance. Dans [63] et [64], les contrôleurs à logique floue sont utilisés à la place du contrôleur PI pour éviter la dépendance des paramètres de la machine du contrôleur. Le contrôle pitch angle pour l'éolienne à base MADA à travers le réseau neuronal a été discuté dans [65].

Pour réduire les difficultés de la commande vectorielle classique, les chercheurs ont développé une méthode de contrôle plus récente, moins dépendante des paramètres de la machine et moins d'efforts de réglage du compensateur connue sous le nom de contrôle direct du couple (DTC).

I.10.2 La commande directe couple/puissance

Le contrôle direct du couple (DTC) est développé pour le moteur à induction à cage d'écureuil à la fin des années 1980 [68]. Ce contrôleur a été étendu à la MADA en 2002 [69]. La technique DTC est basée sur une représentation vectorielle de l'espace des tensions de sortie du convertisseur côté rotor, qui est utilisé pour un onduleur de source de tension à deux

niveaux. Elle est capable de contrôler à la fois le flux de la machine ainsi que son couple d'une manière encore plus précise, plus robuste et plus rapide comparativement à la commande vectorielle et ce avec un algorithme de contrôle simplifié, et moins dépendant des paramètres de la machine, basé sur le DTC. La technique de contrôle de puissance directe (DPC) a été développée il y a une vingtaine d'années pour contrôler les redresseurs triphasés par [70] et par [71]. Dans l'approche DPC, les signaux variables primaires sont les puissances active et réactive [55], [57], [71], [72]. Également dans la DPC, pas de bloc de modulation de largeur d'impulsion, ni des boucles internes des variables commandés et il n'est pas nécessaire d'estimer les variables de contrôle car les puissances statoriques active et réactive peuvent être calculées en utilisant les tensions et les courants statoriques.

Ces méthodes utilisent la commande à hystérésis et les états de commutation de convertisseur, sélectionnés à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs entre la référence et les valeurs estimées (couple et flux dans DTC; puissances active et réactive dans DPC) et la position de la tension ou du flux virtuel.

En comparaison avec le contrôleur linéaire PI, ces méthodes ont des performances dynamiques élevées en raison de l'utilisation de contrôleurs basés sur l'hystérésis. Cependant, l'utilisation de contrôleurs basés sur l'hystérésis a une forte ondulation dans le couple où la puissance développée et fonctionne également à une fréquence de commutation variable, ce qui est une source de comportement non linéaire. Par conséquent, un certain nombre de chercheurs ont travaillé sur la DPC et le DTC pour la MADA afin de réduire l'ondulation de sortie et de maintenir constante la commutation du convertisseur côté rotor. Celles-ci incluent l'utilisation de la modulation vectorielle spatiale (SVM) [73], [74], la technique de modulation vectorielle discrète (DSVM) [75], le schéma prédictif de puissance directe (PDPC) [76] - [78], et le contrôle en mode glissant (SMC) [79], [80]. La logique floue a été employée dans le contrôle direct de puissance du MADA en remplaçant le contrôleur basé sur l'hystérésis et la table de commutation conventionnelle par des contrôleurs basés sur la logique floue [81], [82]. Toutes ces contributions permettent d'améliorer les performances de la DPC, mais en même temps elles conduisent à des schémas plus complexes.

I.11 Mode autonome des éoliennes à base de la MADA

La littérature traite le mode connecté de la MADA au réseau. Le stator est connecté directement au réseau, et fournit les vecteurs de puissance qui sont utilisés dans le retour du système. Cependant, en cas d'absence de la tension du réseau, en cas de défaillance du réseau

ou d'électrification d'une zone éloignée sans réseau, les stratégies de contrôle connectées au réseau ne sont plus valables. Ces cas sont connus en mode autonome (isolé) de la MADA où la tension du réseau n'est pas connectée au stator. Un système de production autonome devrait fournir une tension et une fréquence régulées aux charges [83]. Il existe deux méthodes de contrôle différentes pour le système autonome: contrôle indirect à flux statorique orienté (ISFO) et le contrôle direct de la tension (DVC) [83].

I.12 Conclusion

Dans ce premier chapitre un état d'art des systèmes de la conversion de l'énergie éolienne a été traité. Nous avons tout d'abord présenté un aperçu général sur sa situation actuelle, énoncé quelques chiffres concernant la production d'électricité dans le monde entier actuellement et pour l'avenir, y compris notre pays l'Algérie.

Nous avons discuté des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne, le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, nous avons également parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal avec leurs avantages et inconvénients, les principaux composants constituant d'une éolienne ainsi que son principe de fonctionnement ont été décrits.

Dans un deuxième temps un état d'art sur la conversion électromécanique à travers différentes structures de génératrice éolienne à vitesse fixe et vitesse variable, parmi lesquelles on a choisi le système éolien à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) structure de convertisseur de puissance bidirectionnelle à deux niveaux. L'éolienne à base de la MADA offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base de notre travail.

Enfin nous avons présenté la MADA en général avec ses éléments composantes, son fonctionnement en moteur et génératrice, les gammes de puissance, les avantages de l'utilisation d'une MADA dans un système éolien. Nous avons ensuite décrypter les convertisseurs de puissance pour les éoliennes à base de la MADA, puis nous avons donné un résumé global sur l'évaluation des techniques de contrôle des systèmes éoliens à base de la MADA et à la fin nous avons présenté le fonctionnement d'un système autonome (isolé) à base d'une MADA.

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la présentation et la modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une MADA fonctionnant à vitesse variable.

Chapitre II

Modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction

Dans le cadre de cette thèse, le cahier de charge nous impose l'étude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans le présent chapitre nous allons étudier et modéliser, sous forme d'équations les différents composants constituant la chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice MADA.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle du vent, le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le fonctionnement de la MADA sera alors brièvement décrit, puis la MADA sera modélisée dans le repère de Park en vue de présenter la commande du CCM (convertisseur coté machine). Pour finir, la connexion du convertisseur CCR (convertisseur coté réseau) au réseau électrique via le filtre de couplage $R_f L_f$ sera également modélisé en vue de présenter la commande du CCR.

II.2 Description et modélisation du système éolien

La Figure II.1 présente le schéma synoptique d'un système de conversion éolien à base de la MADA connectée au réseau est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé. La turbine, à travers un multiplicateur de vitesse, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également par l'intermédiaire de convertisseurs statiques triphasés bidirectionnels à IGBT par le rotor. Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ces convertisseurs côtés MADA et réseau, notés respectivement CCM et CCR dans la suite, dans notre étude, le système éolien fonctionne en deux modes hypo-synchrone et hyper-synchrone [24], [84], [85].

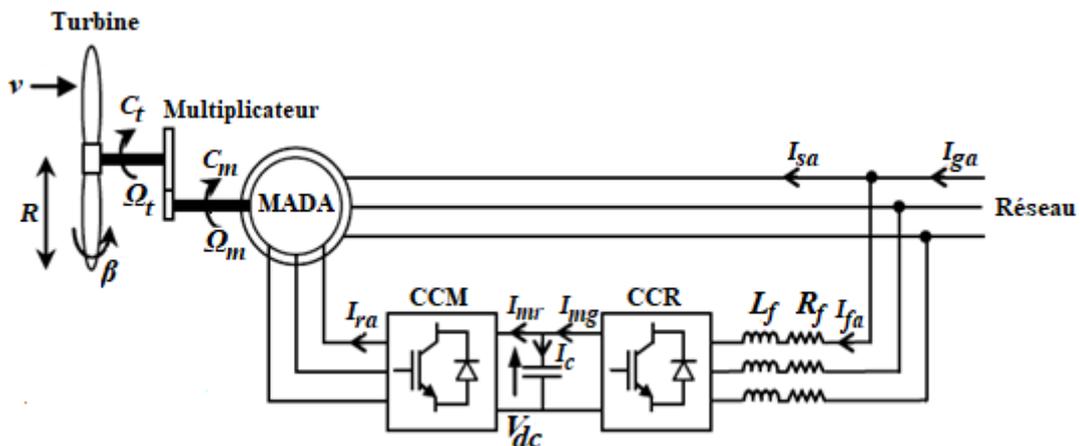


Figure II.1 Schéma synoptique du système éolien basé sur une MADA.

II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statique, est essentielle dans un projet éolien et constitue un facteur déterminant pour le calcul de la production de l'électricité et de la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion de l'énergie car la puissance aérodynamique de la turbine, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel [23], [28], il existe deux méthodes, la première basée sur les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la deuxième utilise la modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique représentant le fonctionnement réel du système. C'est cette deuxième méthode qui sera utilisée à cause de sa flexibilité avérée. Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent, celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven [26], [85]. La vitesse du vent est généralement modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [23], [28] :

$$v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [86]:

$$v = v_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{II.2})$$

Avec:

v_0 est la composante moyenne; A_i , ω_i , et φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

Un exemple de profil de vent reconstruit à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven [86] et il est à signaler que ce profil de vent sera exploité pour appliquer à la chaîne éolienne présentée au chapitre III. Son équation est donnée par:

$$v = 6,5 + \sin\left(2.5t - \frac{\pi}{5}\right) + \sin\left(4t - \frac{\pi}{3}\right) + 0,75 \cdot \sin\left(5.4t - \frac{\pi}{12}\right) + 0,25 \cdot \sin\left(2.5t - \frac{\pi}{12}\right) \quad (\text{II.3})$$

II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

II.2.2.1 Modèle Aérodynamique

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est [87]:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.4})$$

Chapitre II Modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne

La puissance cinétique du vent traversant une surface S donnée par [29] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.5})$$

La puissance aérodynamique P_t captée par l'éolienne peut s'identifier à la puissance cinétique du vent est donnée par [4], [24], [29] :

$$P_t = P_v \cdot C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.6})$$

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

λ : la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent,

ρ : la masse volumique de l'air (approximativement $1,225 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à 15°C),

S : la surface circulaire balayée par la turbine, $S = \pi R^2$

Ω_t : la vitesse de rotation de la turbine,

R : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne (Figure II.2) et dépend également de la caractéristique de la turbine (de la vitesse relative λ et de l'angle de calage des pales β). Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte en pratique [4], [24], [29].

Dans le cadre de cette thèse et pour une éolienne de 1.5MW dont les paramètres sont donnés en Annexe A, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance donnée par [29], [43] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{13.25 - 0.3 \cdot \beta} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.8})$$

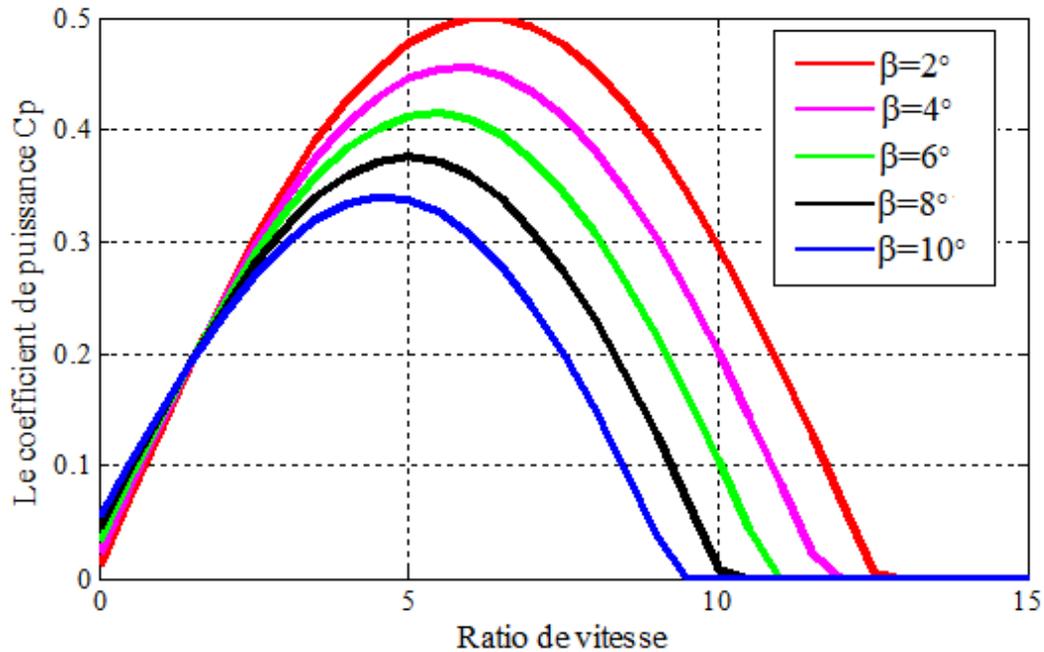


Figure II.2 Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ de la turbine de la puissance 1.5 MW.

Le couple aérodynamique est donné par [4] :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^3 \cdot \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (\text{II.9})$$

On définit C_c le coefficient du couple :

$$C_c(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (\text{II.10})$$

II.2.2.2 Modèle dynamique de la turbine éolienne

La partie mécanique basée essentiellement sur une turbine à trois pales orientables ayant une longueur R . Elles sont fixées sur un arbre tournant à une vitesse de rotation Ω_t , lequel est relié à un multiplicateur de vitesse de rapport G , appelé gain. Sur ce multiplicateur est couplée la génératrice électrique MADA. Afin de modéliser la partie mécanique de la turbine, nous nous considérons des hypothèses simplificatrices couramment admises [24] :

- ✓ Les trois pales sont supposées strictement identiques,
- ✓ Une répartition uniforme de la vitesse du vent sur les trois pales et donc une égalité parfaite des forces de poussée,
- ✓ Habituellement l'ensemble des trois pales est modélisé comme un seul et même système mécanique caractérisé par la superposition de toutes les caractéristiques mécaniques,
- ✓ le coefficient de frottement f par rapport à l'air peut être négligé,

✓ la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront aussi négligées par rapport aux pertes par frottement côté génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique simplifié, comme il est présenté par la Figure II.3 [24].

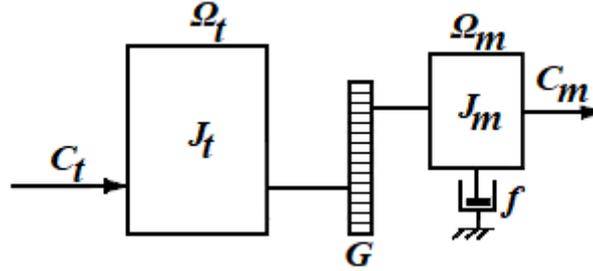


Figure II.3 Modèle dynamique simplifié de la turbine éolienne.

Avec :

J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne,

J_m : le moment d'inertie de la MADA,

f : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA,

C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA,

Ω_m : la vitesse de rotation de la MADA.

II.2.2.2.1 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur existant entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour rôle d'adapter la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à celle de la MADA (arbre rapide), (Figure II.3).

Dans le cas d'un multiplicateur parfait, on peut le modéliser par les deux équations suivantes [4], [24], [43] :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.11})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.12})$$

II.2.2.2.2 Modèle de l'arbre mécanique

D'après la Figure II.3, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA est donnée par [4], [24], [43]:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + f \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

Chapitre II Modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne

Le signe plus (+) signifie que la machine fonctionne en régime hypo synchrone ($\omega_m < \omega_s$).

Le signe moins (-) signifie que la machine fonctionne en régime hyper synchrone ($\omega_m > \omega_s$).

D' autre part, on peut donner la relation liant la fréquence du stator et celle du rotor:

$$f_s = f_r + p f_m \quad (\text{II.16})$$

Dans ce cas le glissement est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (\text{II.17})$$

D'après l'équation ci-dessus, on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA :

- ✓ ($g=1$) : mode stationnaire,
- ✓ ($0 < g < 1$): la MADA fonctionne en mode hypo-synchrone,
- ✓ ($g=0$) : mode synchrone,
- ✓ ($g < 0$): la MADA fonctionne en mode hyper-synchrone.

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 et comme mentionné précédemment, la MADA peut fonctionner en moteur et en génératrice aux vitesses hypo-synchrone et hyper-synchrone, il en résulte quatre modes de fonctionnement de la MADA indiqués par la Figure (II.5) :

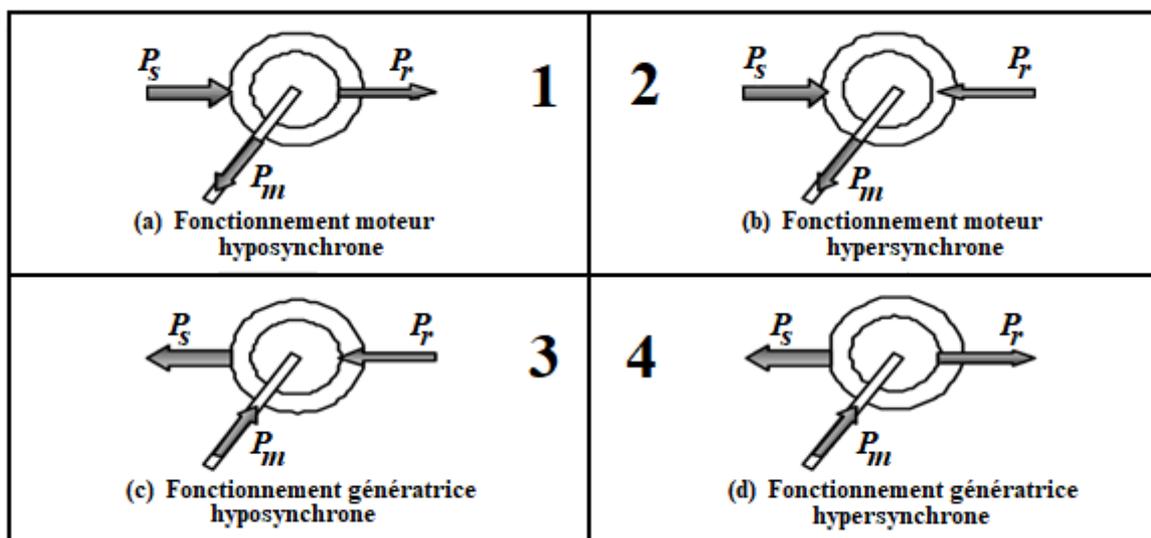


Figure II.5 Différents modes de fonctionnement de la MADA [19].

En fonctionnement moteur, la puissance active P_s consommée par le stator est fournie par le réseau. Dans le mode hypo-synchrone (Figure II.5.a), la puissance active rotorique P_r est fournie au réseau à travers les deux convertisseurs séparés par le bus continu. Par contre dans le mode hyper-synchrone (Figure II.5.b), c'est le réseau qui fournit la puissance active au stator et au rotor de la MADA. La puissance P_r transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au dessus de la vitesse de synchronisme et le champ tournant induit par les enroulements des bobinages rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator [19], [25], [26].

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien.

Lors de fonctionnement en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique P_m à la MADA. En mode hypo-synchrone (Figure II.5.c), une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En revanche, en mode hyper-synchrone (Figure II.5.d), la totalité de la puissance mécanique fournie à la MADA est transmise au réseau [19], [25], [26].

L'écoulement de la puissance au sein de la MADA dans les quatre quadrants est résumé par le tableau récapitulatif II.1

Tableau II.1 Ecoulement de la puissance de la MADA

		Modes de fonctionnements	
		Moteur $P_m > 0$	Génératrices $P_m < 0$
Régimes	Hypo-synchrone	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$
	Hyper-synchrone	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$

Avec :

$$P_m = P_s - P_r \tag{II.18}$$

$$(1 - g).P_s = P_s - g.P_s \tag{II.19}$$

II.2.3.2 Modélisation de la MADA

II.2.3.2.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la MADA. Nous nous soumettons aux hypothèses simplificatrices classiques: [24], [25], [26], [40] :

- ✓ entrefer constant,
- ✓ effet des encoches négligé,
- ✓ distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,

- ✓ influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte,
- ✓ circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- ✓ pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

II.2.3.2.2 Modèle de la MADA dans le système triphasé abc

La Figure II.6 montre la représentation schématique de la MADA dans le repère triphasé (abc).

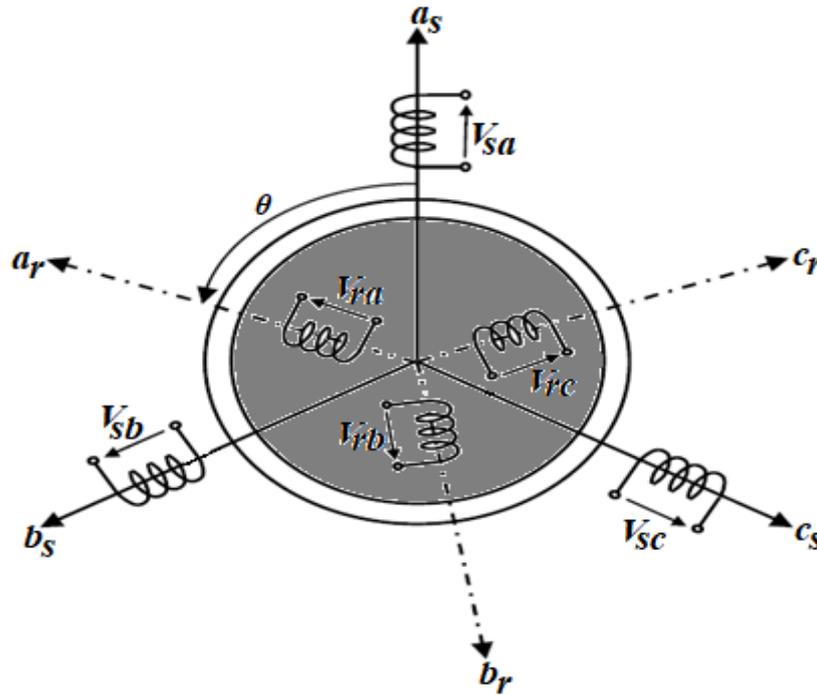


Figure II.6 Schéma représentation de la MADA dans le repère triphasé.

Avec :

a_s, b_s, c_s les vecteurs orientés suivant les enroulements statoriques,
 a_r, b_r, c_r les vecteurs orientés suivant les enroulements rotoriques,
 θ l'angle de position entre le stator et le rotor.

La loi de Faraday permet d'écrire [26] :

$$V = R \cdot I + \frac{d\varphi}{dt} \tag{II.20}$$

Les équations de tension de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère (abc) :

$$[V_{sabc}] = R_s \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \tag{II.21}$$

$$[V_{rabc}] = R_r \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$[V_{sabc}]$, $[V_{rabc}]$: les tensions statoriques et rotoriques,

$[I_{sabc}]$, $[I_{rabc}]$: les courants statoriques et rotoriques,

$[\varphi_{sabc}]$, $[\varphi_{rabc}]$: les flux statoriques et rotoriques,

R_s , R_r : respectivement les résistances statorique et rotorique par phase.

Les équations de flux de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère (abc) :

$$[\varphi_{sabc}] = L_s \cdot [\varphi_{sabc}] + M \cdot [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.23})$$

$$[\varphi_{rabc}] = M \cdot [\varphi_{rabc}] + L_r \cdot [\varphi_{sabc}] \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Où

l_s , l_r : inductances propres statorique et rotorique,

M_s , M_r : inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques,

M_{sr} : valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique,

L_s , L_r et M représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et mutuelle entre le stator et le rotor.

L'équation du couple électromagnétique de la machine asynchrone dans un repère (abc) :

$$C_{em} = p [I_{sabc}]^T \frac{d}{d\theta} ([M] \cdot [I_{rabc}]) \quad (\text{II.26})$$

II.2.3.2.3 Modèle de la MADA dans le repère tournant dq

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, a des équations compliquées dans le repère triphasé (abc). Afin de mieux représenter le comportement de la machine, simplifier les équations de la machine, obtenir un modèle plus simple et dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA, il est nécessaire de faire appel aux transformations de Park et de Concordia. Ces transformations nous permettront de passer d'un système triphasé

abc vers un système tournant diphasé dq. Elle consiste à faire une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation (Figure II.7). La transformation de Park tournant consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées [19], [24], [25], [26], [29], [43].

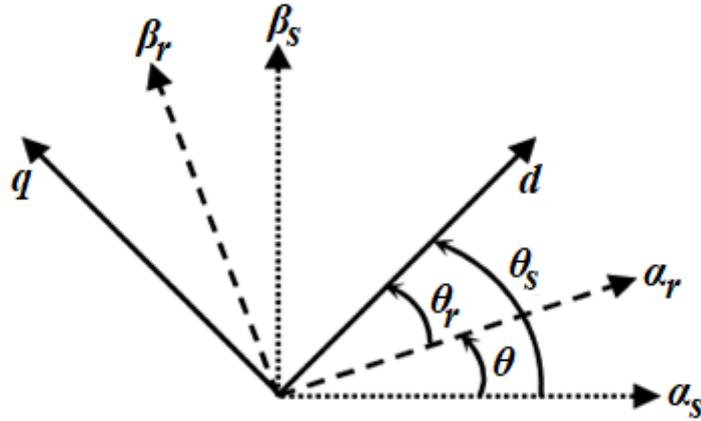


Figure II.7 Schéma de la transformation de Park tournant.

D'après la Figure (II.7) on peut introduire la relation suivante :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (\text{II.27})$$

Avec :

θ_s, θ_r respectivement les angles de Park des grandeurs statoriques et des grandeurs rotoriques.

θ angle électrique entre le stator et le rotor.

Notons $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ et $\omega_m = \omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega_m = \frac{d\theta}{dt}$.

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MADA dans le repère de Park sont :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \quad (\text{II.28})$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \quad (\text{II.29})$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \quad (\text{II.30})$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} les tensions statoriques dans le repère de Park dq,

V_{rd}, V_{rq} les tensions rotoriques dans le repère de Park dq,

I_{sd}, I_{sq} les courants statoriques dans le repère de Park dq,

I_{rd}, I_{rq} les courants rotoriques dans le repère de Park dq,

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$ les flux statoriques dans le repère de Park dq,

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ les flux rotoriques dans le repère de Park dq,

Les équations des flux statoriques et rotoriques de la MADA dans le repère de Park sont :

$$\varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (\text{II.32})$$

$$\varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \quad (\text{II.33})$$

$$\varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \quad (\text{II.34})$$

$$\varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \quad (\text{II.35})$$

II.2.3.2.4 L'expression des puissances statoriques et rotoriques

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques peuvent être exprimées par:

$$P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \quad (\text{II.36})$$

$$Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \quad (\text{II.37})$$

$$P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \quad (\text{II.38})$$

$$Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \quad (\text{II.39})$$

II.2.3.2.5 L'expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être obtenu, à partir des plusieurs expressions toutes égales, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.40})$$

Il peut également s'exprimer en fonction des courants rotoriques et des flux statoriques par :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \quad (\text{II.41})$$

Cette dernière équation est utilisée dans la commande vectorielle, indirecte des puissances statoriques active et réactive avec orientation du flux statorique, laquelle sera étudiée dans le chapitre suivant (chapitre.III).

II.2.3.2.6 Choix du repère dq

Jusqu'à présent, les équations et les grandeurs de la machine sont exprimées dans un repère dq qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique θ_r avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre.

Le choix du référentiel est important pour la stratégie de commande imposée à la machine. Classiquement les trois référentiels suivants sont utilisés :

- (a) Référentiel fixé par rapport au rotor (x, y),
- (b) Référentiel fixé par rapport au stator (α , β),
- (c) Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d, q).

Rappelons que le repère (d, q) est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park θ_s et θ_r afin d'effectuer les rotations. On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant. Ce choix permet d'avoir une pulsation de glissement et s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique. L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'aboutir à des grandeurs constantes en régime permanent, ce qui facilitera de faire une régulation.

II.2.4 Résultats de simulation de la modèle du MADA

Afin de valider le modèle de la MADA de 1.5MW de puissance (Annexe A) étudiée dans ce chapitre. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park dans le référentiel liée au champ tournant. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab/simulink de la société MathWorks.

Pour une MADA alimentée en tensions statoriques (V_{sd} , V_{sq}) et des tensions rotoriques (V_{rd} , V_{rq}) considérées comme variable de commande, et le couple résistant C_r (Figure II.8).

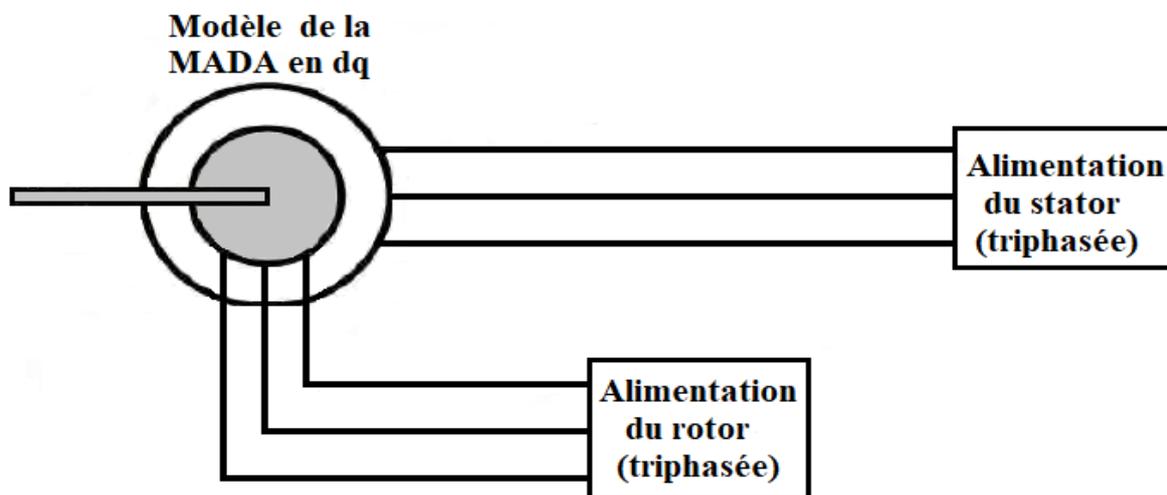


Figure II.8 Schéma bloc de simulation de la MADA dans le repère dq.

Le référentiel choisi est celui lié au champ tournant, alors le modèle de la MADA alimentée en tension est représenté par les équations tensions statoriques, rotoriques, flux statoriques, rotoriques et l'équation mécanique.

Le stator de la MADA est relié directement à un réseau électrique triphasé 3*690V/50Hz; et le rotor alimenté par une source sinusoïdale de fréquence f_r .

La réponse du comportement de la MADA est observée après application de différentes valeurs du couple résistant selon les profils suivants :

- (a) $C_r = 0$ N pour t compris entre 0 et 3.5 s,
- (b) $C_r = 7000$ N.m de $t = 3.5$ s et jusqu'à l'instant $t = 7$ s.
- (c) $C_r = -7000$ N.m de $t = 7$ s et jusqu'à l'instant $t = 10$ s.

Les Figures II.9, II.10, II.11, II.12 et II.13 détaillent respectivement l'évolution des courbes de la vitesse, la couple électromagnétique, la puissance active statorique, du courant rotorique et de la tension statorique avec le courant statorique obtenus sous MATLAB/SIMULINK.

La Figure II.9 illustre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation de l'instant $t=3.5$ s à 7s la valeur de vitesse est inférieure à la vitesse de synchronisme, la MADA fonctionne en hypo-synchrone et de l'instant $t=7$ s à 10s la valeur de vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme la MADA fonctionne en hyper-synchrone.

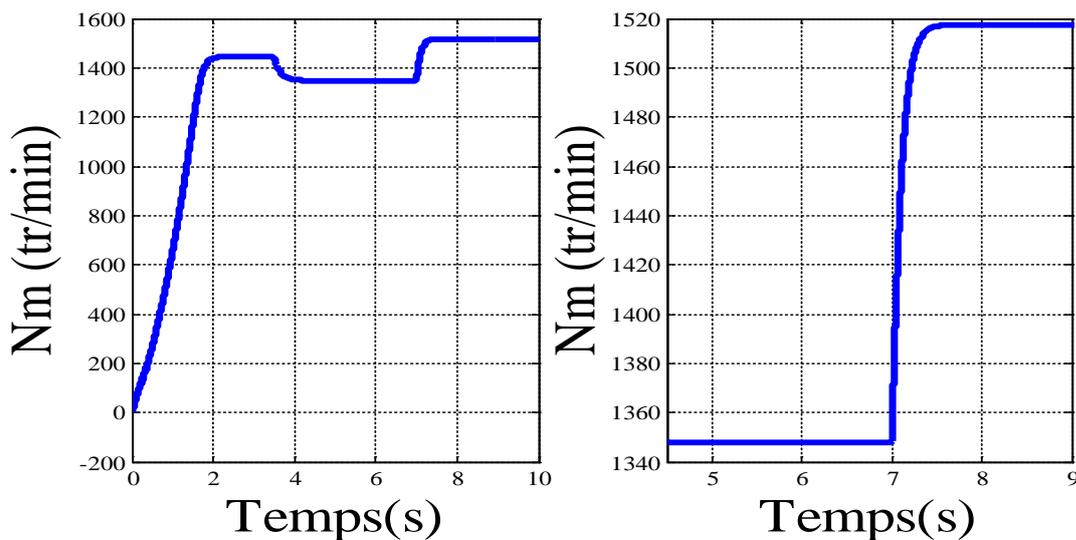


Figure II.9 La vitesse de rotation de la MADA.

La Figure II.10 montre le couple électromagnétique de la MADA, après le régime transitoire le couple électromagnétique suit les paliers imposés par couple résistant.

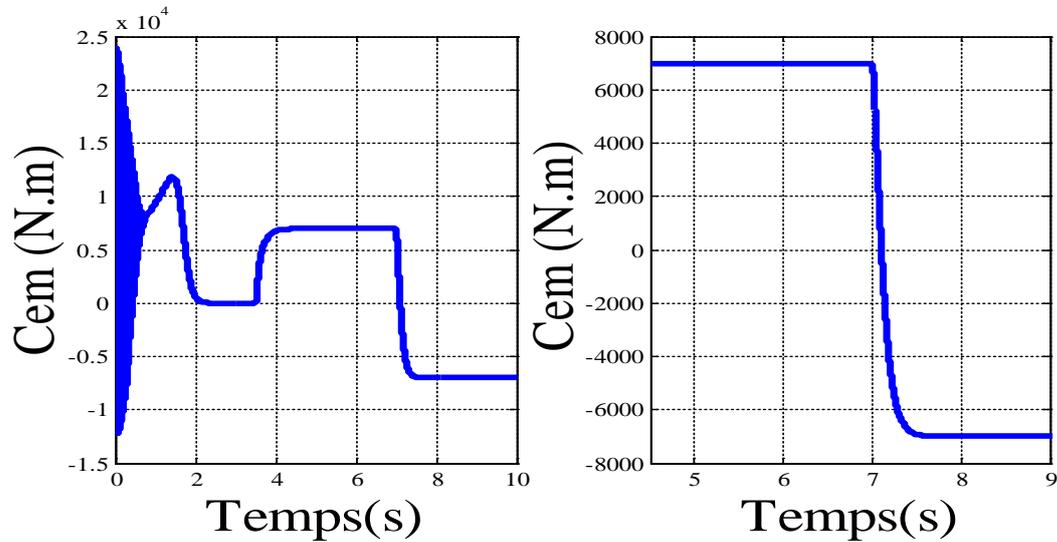


Figure II.10 Couple électromagnétique de la MADA.

La Figure II.11 montre la puissance active statorique image du couple électromagnétique présenté précédemment. De l'instant $t=3.5$ s à 7 s la puissance active de la MADA est positive (1MW), la MADA reçoit la puissance active à travers le stator, et de l'instant $t=3.5$ s à 7 s la puissance active de la MADA prend une valeur négative (-1MW) ce qui signifie que la MADA fournit de la puissance à travers le stator.

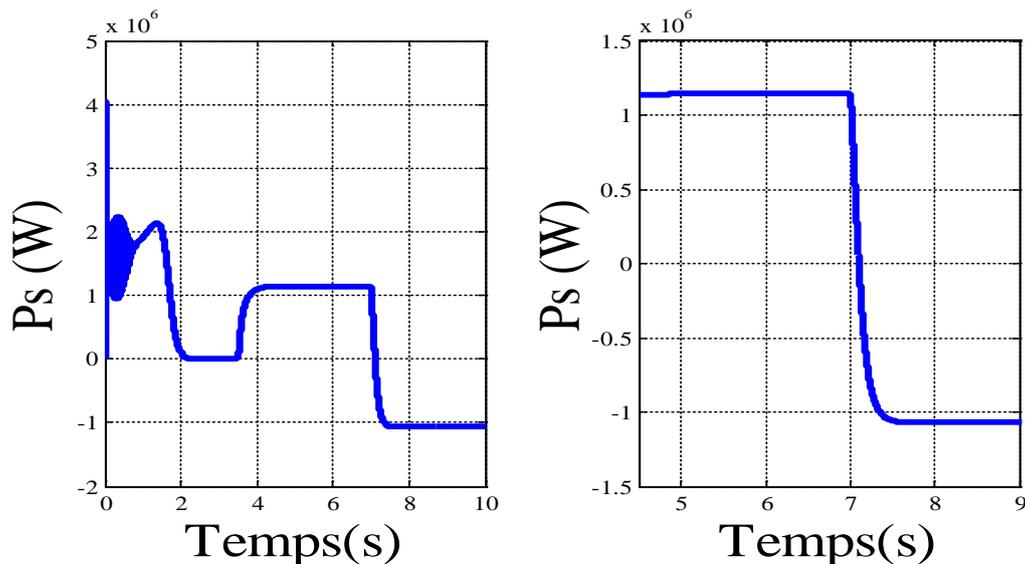


Figure II.11 La puissance statorique active de la MADA.

La Figure II.12 montre un courant rotorique sinusoïdal.

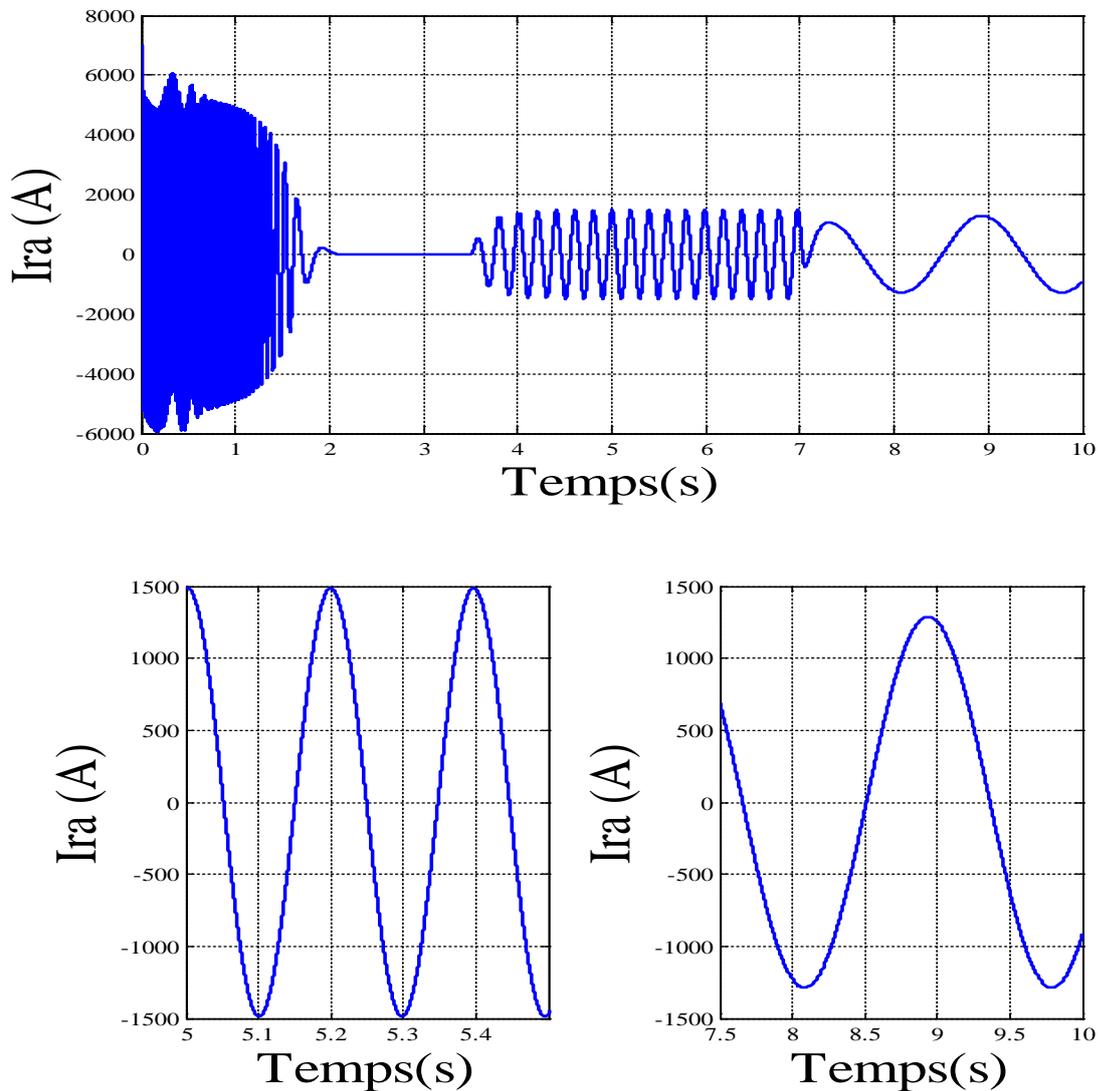


Figure II.12 Courant rotorique de la MADA.

La Figure II.13 montre l'évolution du courant statorique et la tension du réseau durant les régimes hyper et hypo synchrone. Nous remarquons que le courant du stator est en phase par rapport à la tension réseau (de $t=3.5$ s à 7 s) régime hypo-synchrone. Cependant, durant le régime hyper synchrone, le courant du stator est en opposition de phase par rapport à la tension réseau ($t=7$ s à 10 s).

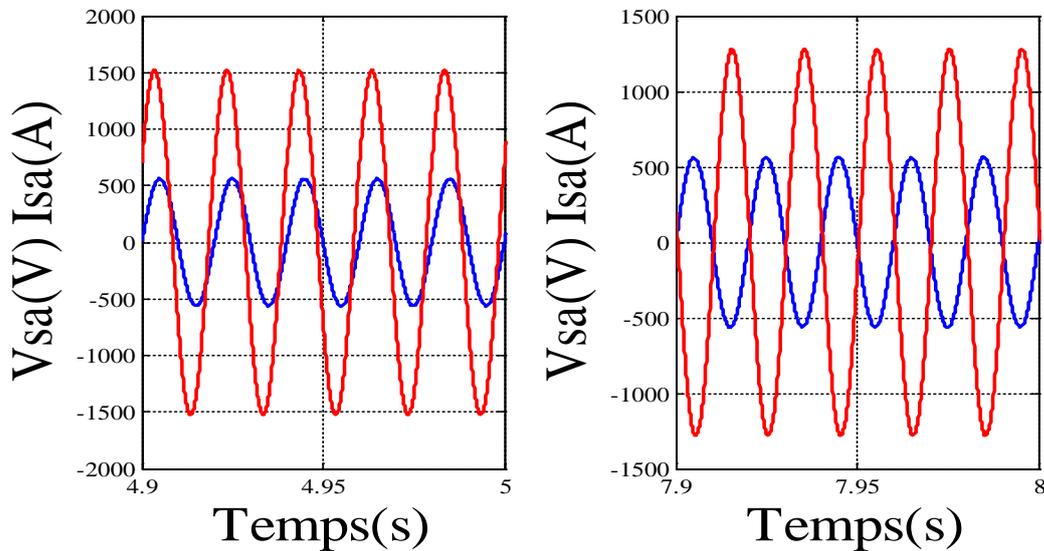
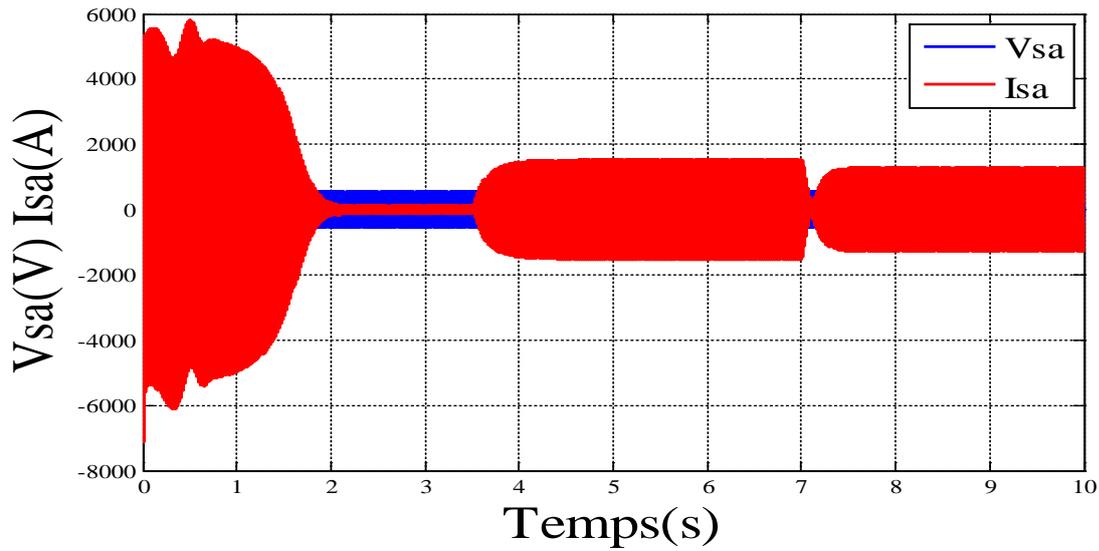


Figure II.13 Tension statorique et courant rotorique de la MADA.

II.2.5 Modélisation de la connexion convertisseur coté réseau (CCR)

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance constitué de transistor IGBT et de diodes en anti-parallèle, le convertisseur considéré dans notre étude, est celui relié au réseau électrique (CCR) via le filtre $R_f L_f$. La Figure II.14 illustre l'ensemble de la liaison du convertisseur CCR, alimenté par le bus continu, à travers le filtre $R_f L_f$ au réseau électrique [24], [29].

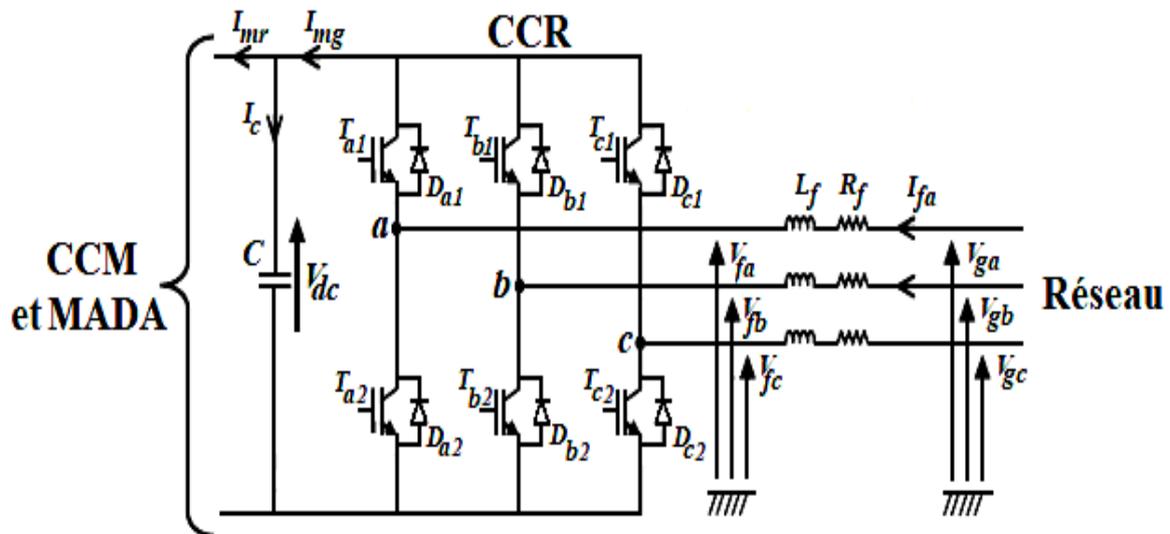


Figure II.14 Schéma de connexion du convertisseur de puissance au réseau électrique.

Avec :

I_{mr}, I_{mg} respectivement les courants modulés par le CCM et le CCR,

I_c le courant traversant le condensateur,

V_{dc} la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),

T_{ij}, D_{ij} désignent respectivement le transistor IGBT et la diode en anti-parallèle, avec $i \in \{a, b, c\}, j \in \{1, 2\}$,

R_f, L_f respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,

V_{fa}, V_{fb}, V_{fc} les tensions simples modulées par le CCR,

V_{ga}, V_{gb}, V_{gc} les tensions simples du réseau électrique,

I_{fa}, I_{fb}, I_{fc} les courants circulant à travers le filtre $R_f L_f$.

II.2.5.1 Modélisation du convertisseur de puissance

Le convertisseur côté réseau est un convertisseur statique bidirectionnel, qui doit fonctionner en redresseur et en onduleur. Ce dernier est réalisé à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture et classiquement composé de trois cellules de commutation, chacune est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. Pour cette étude, les semi-conducteurs seront considérés comme parfaits : pas de pertes et les commutations sont instantanées. L'hypothèse de la conduction continue nous conduit à considérer un convertisseur équivalent à des interrupteurs idéaux et donc sans pertes (Figure II.15) [29], [44].

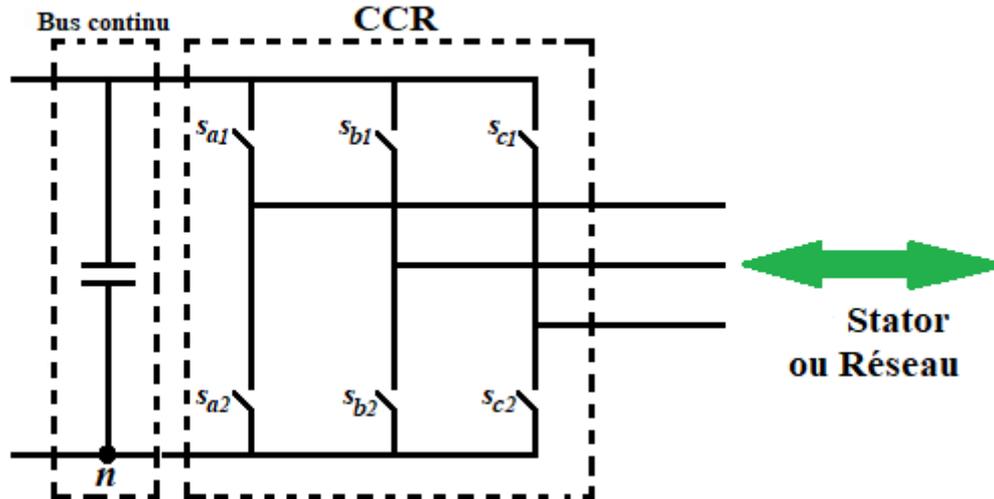


Figure II.15 Schéma du convertisseur de puissance à interrupteurs idéaux.

Chaque ensemble transistor/diode correspond un interrupteur idéal. L'état de chaque interrupteur est quantifié par une fonction de connexion (S_{ij}) on définit cette fonction de commutation comme suit :

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } \overline{S_{ij}} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

i indice correspondant à la cellule de commutation $i \in \{a, b, c\}$,

j indice correspondant à l'emplacement de l'interrupteur dans cette cellule $j \in \{1,2\}$.

La condition de la complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras afin de ne pas court-circuiter la source de tension et de ne pas interrompre la circulation des courants issus du filtre donné par l'équation suivante [29]:

$$S_{i1} + S_{i2} = 1 \quad (\text{II.43})$$

Les tensions triphasées entre les points a, b, c et la référence de la source continue n peuvent être exprimées par :

$$V_{an} = S_{a1} \cdot V_{dc} \quad (\text{II.44})$$

$$V_{bn} = S_{b1} \cdot V_{dc} \quad (\text{II.45})$$

$$V_{cn} = S_{c1} \cdot V_{dc} \quad (\text{II.46})$$

Les tensions composées entre les phases du convertisseur peuvent être décrites par [88]:

$$V_{ab} = (V_{an} - V_{bn}) = (S_{a1} - S_{b1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.47})$$

$$V_{bc} = (V_{bn} - V_{cn}) = (S_{b1} - S_{c1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.48})$$

$$V_{ca} = (V_{cn} - V_{an}) = (S_{c1} - S_{a1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.49})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions simples en fonction des fonctions de commutation comme suit [88] :

$$V_a = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot S_{a1} - S_{b1} - S_{c1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.50})$$

$$V_b = \frac{1}{3} \cdot (-S_{a1} + 2 \cdot S_{b1} - S_{c1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.51})$$

$$V_c = \frac{1}{3} \cdot (-S_{a1} - S_{b1} + 2 \cdot S_{c1}) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.52})$$

II.2.5.2 Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est donnée par la relation suivante [24]:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (\text{II.53})$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (Figure II.14) [24] :

$$I_c = I_{mg} - I_{mr} \quad (\text{II.54})$$

II.2.5.3 Modèle de la liaison au réseau via le filtre

Le convertisseur coté réseau est relié à ce dernier à travers un filtre triphasé (Figure II.14). Celui-ci a pour rôle d'atténuer les harmoniques de courant d'ordre supérieur. En appliquant la loi des mailles, la tension du filtre $R_f L_f$ s'écrit sous forme suivante [19], [44]:

$$V_{fa} = -R_f I_{fa} - L_f \frac{dI_{fa}}{dt} + V_{ga} \quad (\text{II.55})$$

$$V_{fb} = -R_f I_{fb} - L_f \frac{dI_{fb}}{dt} + V_{gb} \quad (\text{II.56})$$

$$V_{fc} = -R_f I_{fc} - L_f \frac{dI_{fc}}{dt} + V_{gc} \quad (\text{II.57})$$

II.2.5.4 Modèle du nœud de connexion au réseau de la MADA

Le système éolien est interconnecté au réseau électrique à travers le stator de la MADA ainsi que le filtre de sortie du convertisseur statique coté réseau (Figure II.1). Les équations modélisant le nœud de connexion sont [19], [24] :

$$[I_{gabc}] = [I_{sabc}] + [I_{fabc}] \quad (\text{II.58})$$

$$[V_{sabc}] = [V_{gabc}] \quad (\text{II.59})$$

Avec :

[V_{gabc}] les tensions triphasées de réseau électrique

II.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de montrer la modélisation des différents éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dont le stator est connecté directement au réseau électrique, tandis que le rotor est relié au réseau à travers deux convertisseurs statiques réversibles en puissance. D'abord, nous avons modélisé le vent en assurant un modèle qui permet de reproduire des variations de la vitesse du vent basé sur la décomposition spectrale de Van der Hoven. Ces variations de vent sont ensuite appliquées au modèle de la turbine adopté. Ensuite, nous avons abordé les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine. Nous avons décrit le principe et le mode de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, puis la présentation du modèle mathématique de la MADA moyennant des hypothèses simplificatrices. Ce modèle est basé sur les équations électriques et mécaniques obtenues avec la transformation de Park dans le repère de Park lié au champ tournant, Pour valider le modèle mathématique, et voir le comportement de la MADA des simulations ont été réalisées sous environnement MATLAB/Simulink/SimPowerSystem et des résultats de simulation sont présentés et discutés. Enfin nous avons modélisé la connexion de convertisseur statique avec le réseau électrique, comprenant celle du convertisseur statique, du bus continu, de liaison du réseau via le filtre RfL_f et enfin le nœud de connexion.

Chapitre II Modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne

Dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser à la commande d'une chaîne de la conversion d'énergie éolienne à base de la MADA en introduisant des techniques de commande telle que l'application de la technique de Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse de la génératrice utilisant un régulateur PI, la commande vectorielle classique pour contrôler les puissances statoriques active et réactive du CCM et la commande directe de puissance (DPC) pour la commande du CCR avec le contrôle de la tension du bus continu.

Chapitre III

Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaine de conversion éolienne à base d'une MADA

III.1 Introduction

Précédemment nous avons étudié le fonctionnement d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA et la modélisation de ses différents constituants, dans ce chapitre nous sommes intéressés à la structure et à la commande de cette chaîne. Dans un premier temps nous allons étudier les différentes stratégies de commande de chaque fonction de la chaîne de conversion éolienne, à savoir la commande optimale de la turbine à l'aide de la technique MPPT, la commande des convertisseurs statiques côté machine et côté réseau pour obtenir un meilleur rendement. Le fonctionnement de l'ensemble de ces commandes est validé par une simulation de la chaîne complète avec l'application de la variation d'un profil de vent sous environnement Matlab/Simulink.

III.2 Description du dispositif des techniques de commande

Le schéma synoptique de commande de la chaîne de conversion est donné par la Figure III.1. Il est composé d'une éolienne reliée à une machine à double asynchrone à alimentation (MADA) d'une puissance de 1,5 MW, dont les paramètres sont données en Annexe A, avec la présence du multiplicateur de vitesse, des deux convertisseurs insérés entre le rotor et le réseau électrique, du système de stockage d'énergie de capacité dans le bus continu et le réseau dans laquelle l'énergie électrique produite est injectée [89].

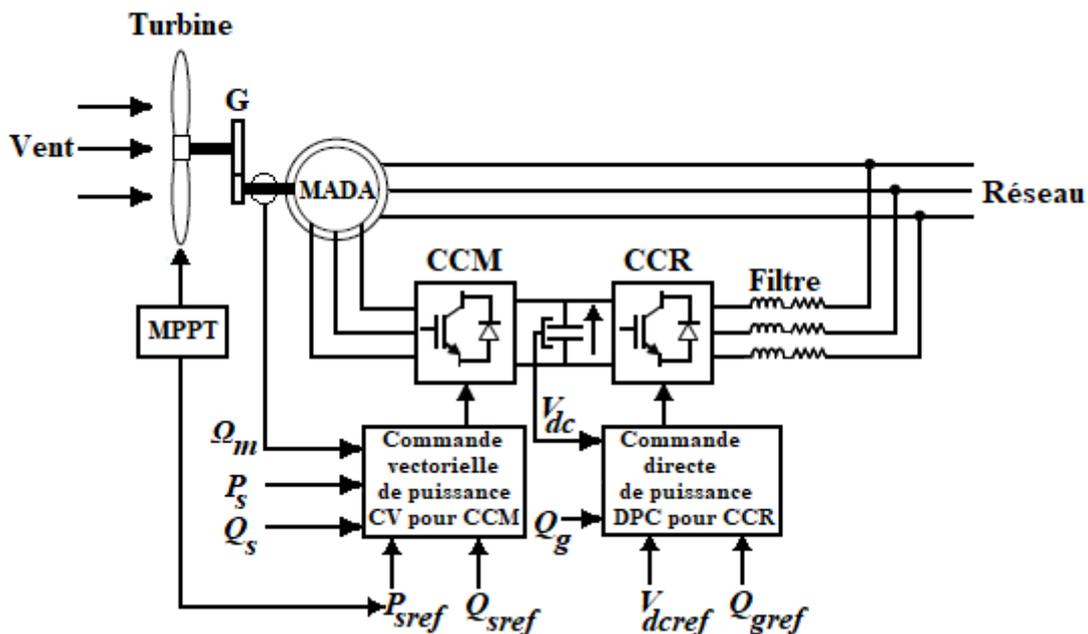


Figure III.1 Schéma synoptique de commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

Donc par la suite nous avons abordé trois stratégies de commande pour assurer le fonctionnement optimal de l'éolienne [89] :

- **la technique d'extraction du maximum de puissance du vent par le contrôle "MPPT" (Maximum Power Point Tracking)** pour capter le maximum de puissance avec asservissement de la vitesse.
- **la commande du CCM** en contrôlant séparément par la commande vectorielle (CV) la puissance active statorique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- **la commande du CCR** en contrôlant par la commande directe de puissance (DPC) les puissances active et réactive échangées avec le réseau et la tension du bus continu.

III.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance du vent (MPPT)

III.3.1 Zone d'exploitation de la turbine

Afin d'atteindre une efficacité élevée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) dans les systèmes de conversion éolienne à vitesse variable, comme les systèmes à base de la MADA et de la MSAP, a attiré beaucoup d'attention. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons plus particulièrement les points de fonctionnement de l'éolienne situés dans la zone 2 (Figure I.16) et (Figure I.21) [19], [24], [29], [43]. En effet, dans cette zone, nous nous considérons que l'angle de calage des pales β est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour conséquence un réglage de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne ne sera alors pas étudié dans ce manuscrit [24].

III.3.2 Différents types de MPPT

La puissance aérodynamique capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la MADA. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet d'extraire le maximum de puissance. Il est donc nécessaire de donner des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Fondamentalement, les techniques étudiées la MPPT comprennent deux approches possibles [23], [90] :

- ✓ La première approche, considère que la connaissance de la caractéristique $C_p(\lambda)$ n'est pas obligatoirement,

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

✓ La seconde approche, considère que la caractéristique $C_p(\lambda)$ doit être connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

Pour cette dernière approche qui consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique $C_p(\lambda)$, et afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée dans le but de contrôler le couple électromagnétique de la MADA, il existe différentes stratégies de contrôle qui correspondent à la zone 2. Cette technique est connue sous le nom MPPT. On peut classer deux catégories de contrôle, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la génération de la référence [29], [43], [90]:

- ✓ le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation mécanique,
- ✓ le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation mécanique.

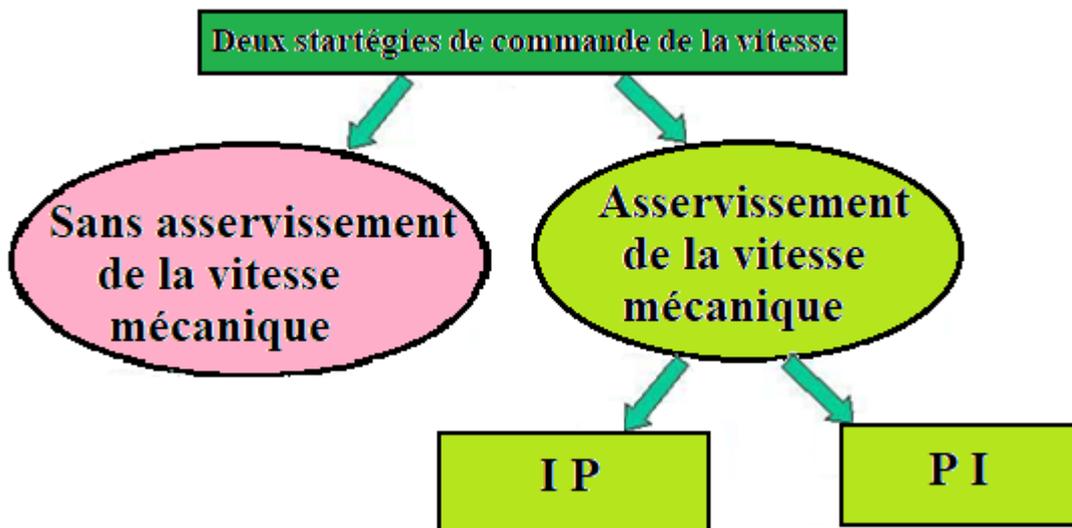


Figure III.2 Stratégies de contrôle de la turbine étudiée.

Nous utiliserons dans la suite de notre étude la stratégie de commande MPPT avec l'asservissement de la vitesse de rotation mécanique avec deux régulateurs PI et IP.

III.3.3 La technique MPPT avec contrôle de la vitesse

Le vent est de nature très aléatoire, la Figure II.4 montre nettement que les fluctuations du vent sont à l'origine des principales perturbations de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations et des changements de puissance [29], [90].

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

Pour cela et pour l'étude de ce mode de contrôle, supposera que la MADA et le CCM sont idéaux quelque soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique C_{em} produit par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence C_{emref} imposée par la stratégie de commande [24], [29], [90].

$$C_{em} = C_{emref} \quad (III.1)$$

Le principe de cette technique d'extraction du maximum de puissance consiste à déterminer la vitesse de la turbine Ω_t qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Ainsi, il est nécessaire de régler le couple électromagnétique de l'arbre de la MADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour effectuer ceci, un contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, comme donnée par la Figure III.3 [23], [24], [29], [89], [90].

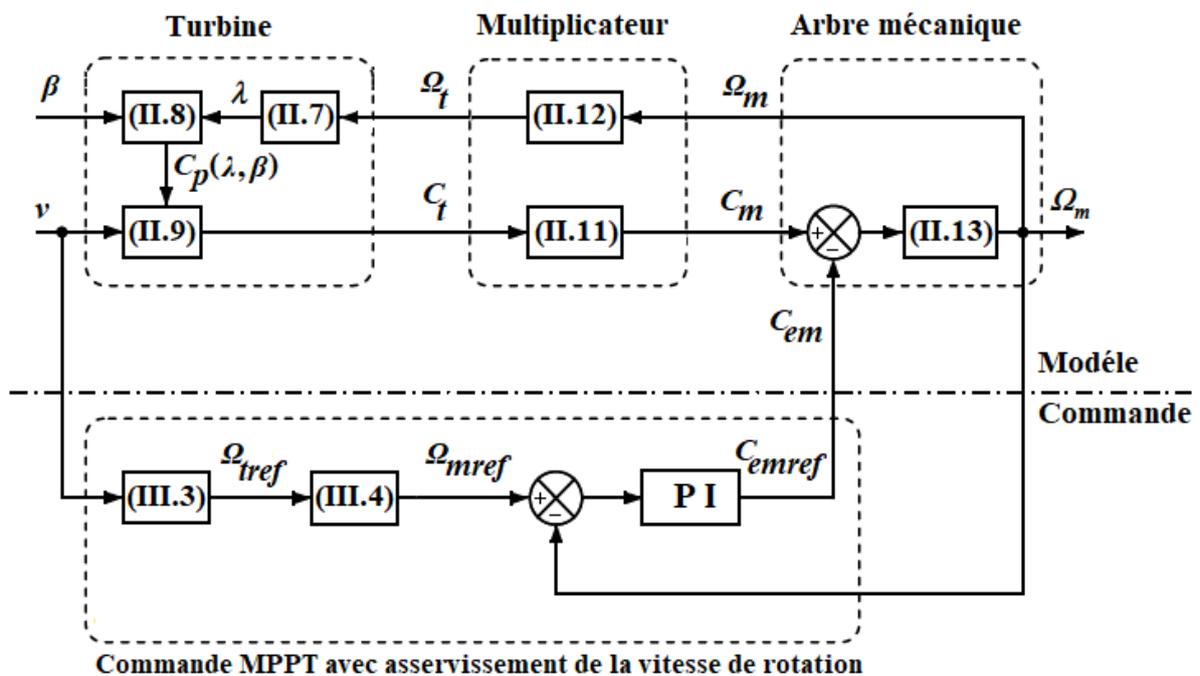


Figure III.3 Stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

Le couple électromagnétique de référence, C_{emref} permettant le réglage de la vitesse de rotation mécanique Ω_m égale à sa valeur de référence Ω_{mref} , est obtenu à la sortie du régulateur de vitesse (Figure III.3). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (PI), permet ainsi de réaliser deux tâches : contrôler la vitesse de rotation mécanique et atténuer l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une entrée perturbatrice. Il est donné par la relation suivante [24], [29], [90], [91]:

$$C_{emref} = PI.(\Omega_{mref} - \Omega_m) \tag{III.2}$$

Avec : PI le régulateur de vitesse.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), la vitesse de référence Ω_{mref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer Ω_{tref} pour maximiser la puissance mécanique, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance C_{pmax} . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour β constant et égal à 2°), comme indiqué par la Figure III.4.

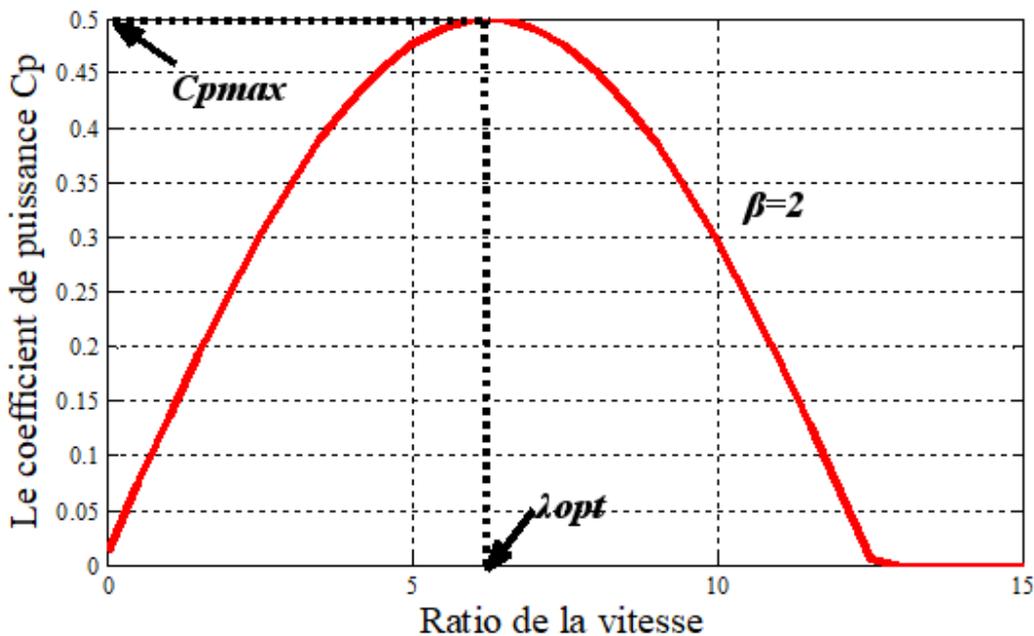


Figure III.4 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$.

D'après la Figure III.4 on peut constater que le coefficient de puissance passe par un maximum ($C_{pmax}=0.5$), pour un angle de calage $\beta = 2^\circ$, et une valeur de la vitesse relative λ optimale ($\lambda_{opt}=6.2$).

La vitesse de rotation de référence de la turbine Ω_{tref} correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{opt} permettant d'obtenir la valeur maximale du C_{pmax} est donnée par :

$$\Omega_{tref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \tag{III.3}$$

En prenant en considération le gain du multiplicateur, la référence de vitesse de rotation de la MADA est obtenue par:

$$\Omega_{mref} = G \cdot \Omega_{tref} \quad (III.4)$$

III.3.4 Calcul des paramètres de régulateur PI

La fonction du transfert liant la vitesse aux couples électromagnétique et mécanique est défini à partir l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA (équation (II.13)) est défini par:

$$\frac{\Omega_m}{C_{em} - C_m} = \frac{1}{J \cdot s + f} \quad (III.5)$$

Le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse est présenté par la Figure III.5 :

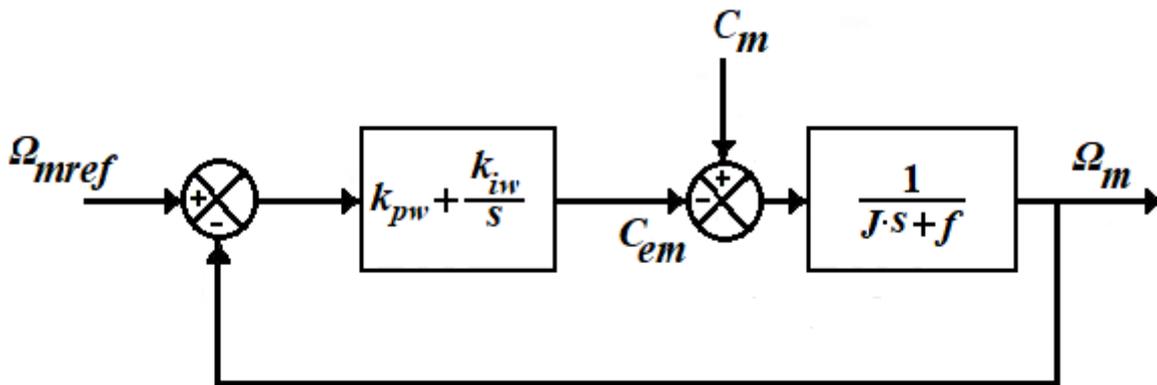


Figure III.5 Schéma fonctionnel de contrôle de la vitesse utilisant un régulateur PI.

L'erreur de la vitesse entre la vitesse de référence Ω_{mref} et la vitesse de rotation mécanique Ω_m de la machine est transmise au régulateur PI, et K_{pw} et K_{iw} sont les gains proportionnel et intégral du régulateur PI. La sortie du régulateur PI agit comme un couple de référence à la MADA [92].

La fonction de transfert entre la vitesse de sortie Ω_m et la vitesse de référence Ω_{mref} est donnée par :

$$\frac{\Omega_m}{\Omega_{mref}} = \frac{K_{pw} \cdot s + K_{iw}}{J s^2 + (f + K_{pw})s + K_{iw}} \quad (III.6)$$

Le dénominateur de la fonction de transfert de la vitesse de rotation (l'équation (III.6)) est imposé à zéro, puis nous avons comparé ce dernier à une équation différentielle du second ordre comme montré à l'équation suivante:

$$\begin{cases} Js^2 + (f + K_{pw})s + K_{iw} = 0 \Rightarrow s^2 + \frac{(f+K_{pw})}{J}s + \frac{K_{iw}}{J} = 0 \\ s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Par identification terme à terme on peut écrire :

$$\frac{K_{pw} + f}{J} = 2\xi\omega_n \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{K_{iw}}{J} = \omega_n^2 \quad (\text{III.9})$$

Donc, nous déduisons les expressions des paramètres k_{pw} et k_{iw} :

$$K_{pw} = 2\xi J\omega_n - f \quad (\text{III.10})$$

$$K_{iw} = J\omega_n^2 \quad (\text{III.11})$$

Avec : ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation propre.

III.4 Commande vectorielle de la puissance (CV) pour le CCM

III.4.1 Principe

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un système non-linéaire et complexe, où son couple électromagnétique (équation II.41) est obtenu à travers un produit hybride entre les flux et les courants statoriques. Ceci rend la commande de la MADA plus difficile. La commande vectorielle à base du flux orienté est utilisée afin d'éliminer cette difficulté et rend sa commande plus facile. L'objectif principal de cette technique consiste à contrôler les machines à courant alternatif d'une façon similaire à celle des machines à courant continu. Dans la littérature plusieurs publications ont traité le contrôle vectoriel à flux orienté de la MADA [34], [58]-[61]. Le contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux permet de contrôler de manière indépendante la puissance active et la puissance réactive par le convertisseur de puissance du côté rotor. Les courants sont asservis par deux correcteurs qui déterminent les références des tensions à appliquer (V_{rdref} et V_{rqref}). Le courant dans l'axe en quadrature permet de contrôler la puissance active. Celui dans l'axe direct est utilisé pour contrôler la puissance réactive [44].

Cette technique peut classer selon l'orientation du repère (d,q) en trois catégories :

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

Dans le cadre de notre travail, nous aborderons la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d, q) selon le flux statorique.

III.4.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Nous choisissons un référentiel de Park tournant (d,q) lié au champ tournant statorique, cela permet d'obtenir des grandeurs constantes en régime permanent, et en orientant le repère (d, q) afin que l'axe direct *d* soit entièrement aligné sur le flux statorique φ_s [25], [26]. Le principe de la commande vectorielle avec orientation du flux statorique est montré par la Figure III.6.

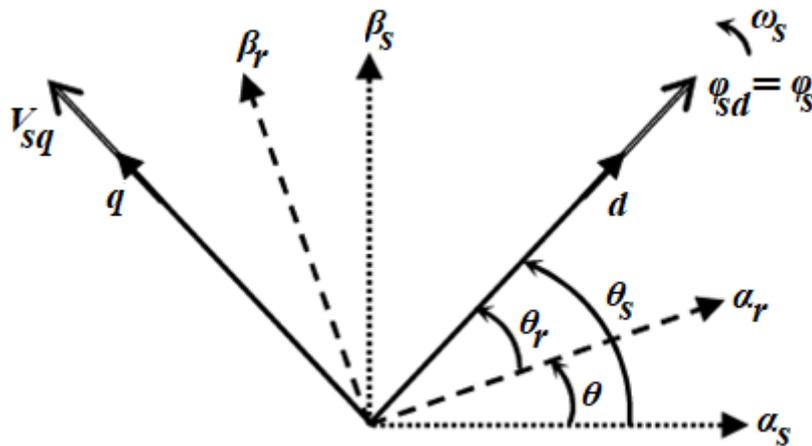


Figure III.6 Principe de la commande vectorielle avec orientation du flux statorique.

Ainsi, nous pouvons s'écrire :

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad (III.12)$$

$$\varphi_{sq} = 0 \quad (III.13)$$

L'équation (II.41) du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd} \quad (III.14)$$

Si on suppose que le réseau électrique connecté au stator est stable, cela conduit à un flux statorique φ_s constant. Cette hypothèse associée à l'équation (III.14), on remarque que ce couple électromagnétique et par conséquent la puissance active ne dépend plus que de la composante en quadrature du courant rotorique I_{rq} et le problème du couplage entre les deux axes direct *d* et en quadrature *q* est éliminé [25], [26].

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

De plus, dans le cas d'une utilisation des génératrices de moyennes et fortes puissances, dans le système de conversion éolien, la résistance de bobinage statorique R_s , étant négligée [34], [93].

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les équations qui lient la puissance active et la puissance réactive statorique aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous réalisons pour le contrôle de la MADA, sous ces hypothèses ($\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $R_s = 0$).

L'équation (II.21) de la tension statorique devient:

$$[V_{sabc}] \approx \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (\text{III.15})$$

La relation (III.15) confirme qu'un repère (d, q) lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de la tension statorique et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur, en considérant toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant on peut alors écrire [26] :

$$V_{sd} = 0, V_{sq} = V_s$$

En considérant le choix du repère (d, q) lié au champ tournant statorique et avec l'utilisation des hypothèses simplificatrices ci-dessus associé à ce repère (les tensions du réseau électrique sont stables, le flux statorique constant, et en négligeant la résistance des bobinages statoriques), nous avons obtenue un modèle simplifié de la MADA.

Donc les équations des tensions statoriques (II.28) et (II.29) peuvent être écrites comme suit :

$$V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \quad (\text{III.17})$$

Expressions entre les courants statoriques et rotoriques

En tenant compte des équations (III.12) et (III.13), les relations des flux statoriques définies par les équations (II.32) et (II.33) deviennent :

$$\varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (\text{III.18})$$

$$0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \quad (\text{III.19})$$

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

A partir des équations des flux statoriques (équations (III.18) et (III.19), nous pouvons alors obtenir les expressions liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\varphi_s}{L_s} \quad (\text{III.20})$$

$$I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \quad (\text{III.21})$$

Expressions entre les puissances statoriques et courants rotoriques

D'après les équations (III.16) et (III.17), Les expressions des puissances statoriques active et réactive (II.36) et (II.37) s'écrivent:

$$P_s = V_s I_{sq} \quad (\text{III.22})$$

$$Q_s = V_s I_{sd} \quad (\text{III.23})$$

Pour obtenir les expressions des puissances active et réactive en fonction des courants rotoriques, nous remplaçons dans les équations précédentes (III.22) et (III.23) les courants I_{sd} et I_{sq} par les équations (III.20), (III.21):

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \quad (\text{III.24})$$

$$Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \quad (\text{III.25})$$

A partir des équations (III.16) et (III.17) nous tirons l'expression du flux statorique suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.26})$$

Donc l'expression (III.25) de la puissance réactive devient :

$$Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \quad (\text{III.27})$$

En tenant compte de l'hypothèse du flux statorique φ_{sd} est maintenu constant est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la MADA, et le choix du repère et l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, Les expressions des puissances active et réactive (III.24) et (III.27) montrent que la puissance active statorique P_s est

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

directement proportionnelle au courant rotorique quadrature I_{rq} et la puissance réactive statorique Q_s est proportionnelle au courant rotorique direct I_{rd} de plus une constante $\frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s}$ imposé par le réseau. En conséquence, ces puissances statoriques peuvent être contrôlées séparément l'une de l'autre.

Expressions entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques

Afin d'exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, il faut d'abord exprimer les flux rotoriques.

Pour cela en remplaçant dans les équations du flux rotoriques (II.34), (II.35), les courants statoriques par les expressions (III.20), (III.21) nous obtenons les expressions suivantes :

$$\varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \quad (\text{III.28})$$

$$\varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \quad (\text{III.29})$$

Les expressions des flux rotoriques (III.28) et (III.29) sont remplacées dans les expressions des tensions rotoriques (II.30) et (II.31). Nous obtenons:

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \quad (\text{III.30})$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \varphi_s \quad (\text{III.31})$$

Les expressions des tensions rotoriques en régime permanent peuvent être écrites comme suit :

$$V_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \quad (\text{III.32})$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \varphi_s \quad (\text{III.33})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes des tensions rotoriques du repère (d, q) à imposer à la MADA pour obtenir les courants rotoriques voulus.

Le schéma de bloc présenté par la Figure III.7 montre le système interne de la MADA à réguler qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactive statoriques, cette dernière est obtenue à partir des équations (III.24), (III.27), (III.32) et (III.33).

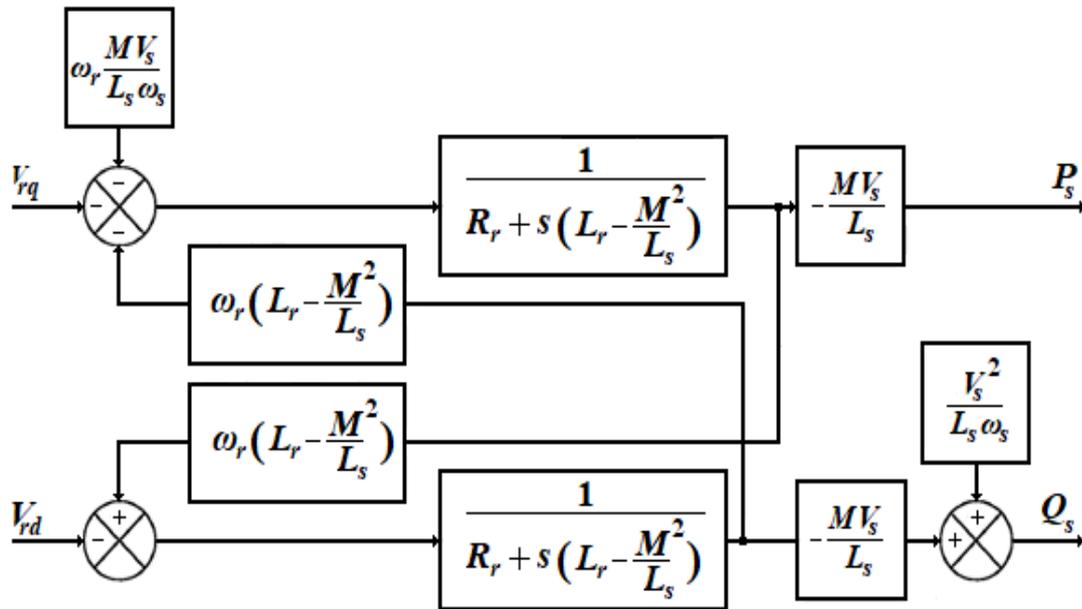


Figure III.7 Synoptique du système interne de la MADA.

On constate d'après ce schéma que les puissances statoriques active et réactive et les tensions rotoriques sont liées par des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes. Cela permet d'accéder à la commande vectorielle facilement parce que les influences des couplages resteront faibles. Chaque axe peut être contrôlé séparément avec le soutien de son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront la puissance active pour l'axe q du rotor et la puissance réactive pour l'axe d du rotor [25], [26].

Deux solutions sont faisables pour réaliser la commande vectorielle des puissances active et réactive, selon le choix de prendre en considération les termes de couplages ou non comme indiqué la Figure III.7 [94].

Le principe de la première méthode tient à la négligence des termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour commander séparément les puissances statoriques active et réactive. Cette méthode est connue par la méthode directe puisque les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la MADA.

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaine de conversion.....

La deuxième méthode consiste à prendre en considération les termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de commander les puissances statoriques et les courants rotoriques. Cette méthode est connue par la méthode indirecte qui dépend directement des équations (III.24), (III.27), (III.32) et (III.33).

Dans le cadre de ce manuscrit nous nous sommes intéressés à la méthode indirecte des puissances, elle sera développée et simulée dans la suite de ce chapitre.

III.4.3 Commande vectorielle indirecte des puissances active et réactive de la MADA

La méthode indirecte des puissances consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler (Figure III.7) et en gardant l'hypothèse que la tension du réseau est stable. Nous avons créé ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions rotoriques en fonction des puissances statoriques. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui du modèle interne de la MADA mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA.

Nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral (PI) pour chacune, une boucle pour la puissance statorique et l'autre pour le courant rotorique tout en compensant les termes de perturbations et de couplages des axes d et q, donc les puissances statoriques en fonction des courants rotoriques et les expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques [34], [89] [94], [95].

La Figure III.8 montre le schéma bloc de la commande du CCM. Cette commande permet de contrôler séparément les courants rotoriques quadrature et direct et donc les puissances active et réactive statoriques de la MADA.

Le courant rotorique de référence quadrature I_{rqref} est originaire du contrôle MPPT via la commande de la puissance active statorique. Le courant rotorique de référence direct I_{rdref} est, quant à lui, originaire de la commande de la puissance réactive statorique.

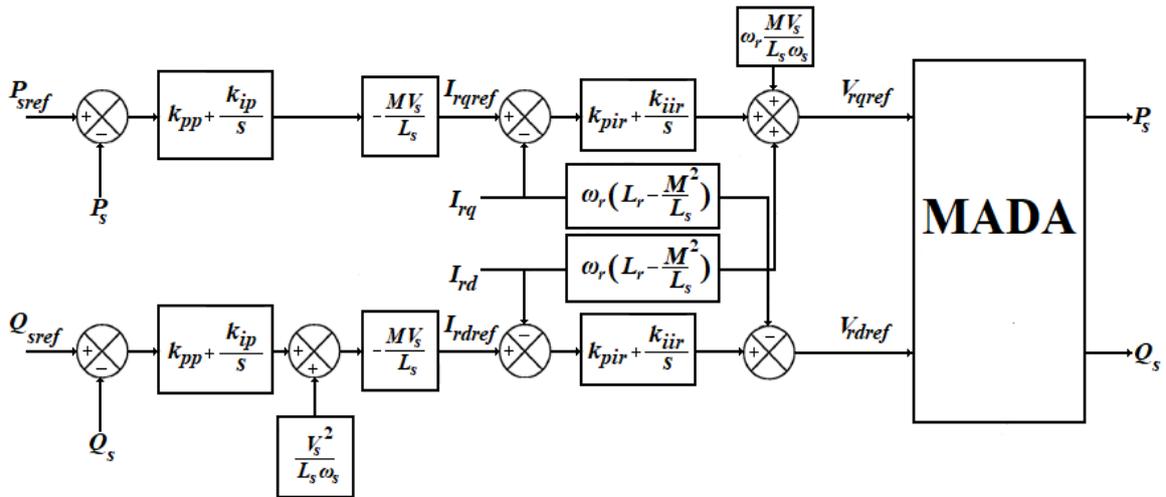


Figure III.8 Commande vectorielle indirecte des puissances active et réactive pour CCM.

Avec :

k_{pp} , k_{ip} : les gains proportionnel et intégral du régulateur PI des puissances active et réactive.

k_{pir} , k_{iir} : les gains proportionnel et intégral du régulateur PI des courants rotoriques direct et quadrature.

III.5 Contrôle direct de puissance (DPC) pour le CCR

III.5.1 Principe

Le principe du contrôle direct de puissance (DPC) est identique au contrôle direct de couple (DTC) introduit pour les moteurs à induction. Les puissances active et réactive instantanées sont commandées à la place du couple et du flux statorique (Figure III.9) [57], [70], [71], [88], [89], [96].

L'application de la commande DPC au CCR permet en premier lieu de se passer des correcteurs généralement utilisés pour contrôler les convertisseurs de puissance statique. Dans cette commande il n'y a pas de boucles internes et élimine les blocs de modulation. Elle n'utilise que les puissances instantanées comme variable de contrôle, plus précisément les erreurs des puissances instantanées entre les valeurs de référence des puissances instantanées active et réactive et leurs valeurs mesurées, qui sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux qui déterminent, avec l'aide d'un tableau de commutation, et aussi la valeur du secteur où se trouve la tension du réseau, l'état de commutation des semi-conducteurs, pour le réglage du CCR de plus une boucle de régulation de tension de bus continue [57], [70], [71], [74], [88], [89], [96], [97], [98] .

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

Le secteur de la tension de la ligne est nécessaire pour lire la table de commutation; la connaissance de la tension de ligne est donc essentielle. Cependant, une fois que les valeurs estimées de la puissance active et réactive sont calculées et que les courants du réseau électrique sont connus, la tension de la ligne peut être simplement estimée à partir de la théorie de la puissance instantanée [57], [70].

$$\begin{bmatrix} V_{g\alpha} \\ V_{g\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_{f\alpha}^2 + I_{f\beta}^2} \begin{bmatrix} I_{f\alpha} & -I_{f\beta} \\ I_{f\beta} & I_{f\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

Avec:

$V_{g\alpha}, V_{g\beta}$ les composantes du vecteur de la tension du réseau dans le repère α, β stationnaire.

$I_{f\alpha}, I_{f\beta}$ les composantes du vecteur du courant circulant à travers le filtre dans le repère α, β stationnaire.

III.5.3 Calcul de la puissance instantanée active de référence

Dans cette partie nous allons nous intéresser au calcul des valeurs de puissances instantanées de référence pour pouvoir les comparer par la suite aux puissances instantanées calculées par les équations (III.34) et (III.35).

La puissance réactive instantanée est comparée à une puissance réactive de référence Q_{gref} qui est directement imposée à zéro. En effet on cherche à obtenir une puissance réactive nulle, cela permet d'assurer un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire, pour le convertisseur statique de puissance, en revanche la puissance active instantanée comparée à la puissance active de référence P_{gref} est obtenue après avoir ajouter au P_{cref} (qui est le produit de la tension V_{dc} avec le courant de référence obtenu par le régulateur PI de la tension bus continu à la sortie du convertisseur de puissance), la puissance générée par la MADA (qui est le produit de la tension V_{dc} avec le courant modulé I_{mr} par le CCM) [74], [85], [89], [96].

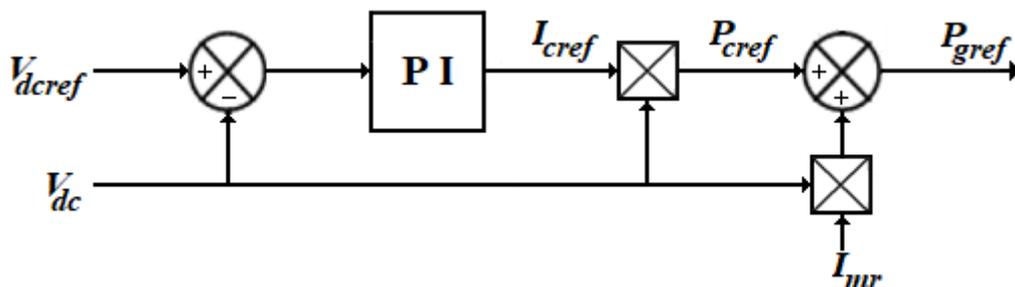


Figure III.10 Calcul de la puissance active instantanée de référence.

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

La Figure III.11 montre le schéma de régulation de la tension du bus continue V_{dc} obtenue en la mesurant aux bornes du condensateur et sa référence V_{dcref} avec l'utilisation d'un régulateur PI (proportionnel-intégrateur)

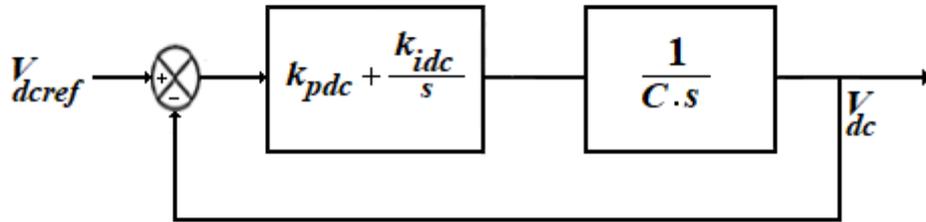


Figure III.11 Réglage de la tension du bus continu avec régulateur PI.

Avec :

k_{pdc} , k_{idc} : les gains proportionnel et intégral du régulateur PI de la tension du bus continu.

III.5.4 Comparateurs à hystérésis

Les régulateurs utilisés sont des comparateurs à hystérésis pour le contrôle de convertisseur statique; dans notre cas nous utilisons deux régulateurs à deux niveaux caractérisés par une bande fixée comme le montre la Figure III.12. Pour calculer le signal d'erreur entre les valeurs de référence et les valeurs estimées des puissances instantanées active et réactive, les signaux de sortie des régulateurs à hystérésis sont des variables booléennes d_p et d_q tiennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée et l'état "0" pour une diminution [57], [71], [74], [88], [89], [96].

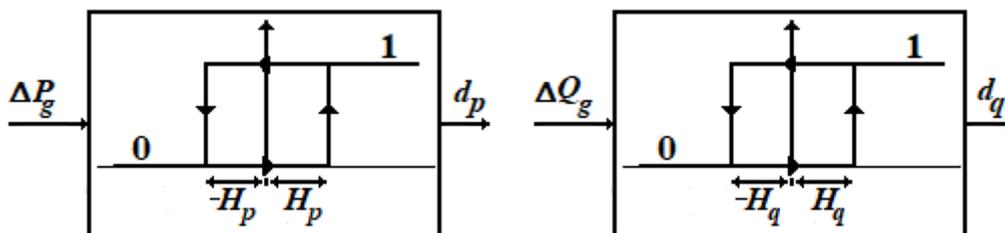


Figure III.12 Comparateurs à hystérésis à deux niveaux.

Avec $\Delta P_g = P_{gref} - P_g$ et $\Delta Q_g = Q_{gref} - Q_g$

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaine de conversion.....

Le signal de sortie de régulateur à hystérésis à deux niveaux pour dP est modélisé :

$$\Delta P_g > H_p \Rightarrow d_p = 1 \quad (\text{III.37})$$

$$-H_p \leq \Delta P_g \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta P_g}{dt} > 0 \Rightarrow d_p = 0 \quad (\text{III.38})$$

$$-H_p \leq \Delta P_g \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta P_g}{dt} < 0 \Rightarrow d_p = 1 \quad (\text{III.39})$$

$$\Delta P_g < -H_p \Rightarrow d_p = 0 \quad (\text{III.40})$$

La même chose pour le signal de sortie de régulateur à hystérésis à deux niveaux pour dq :

$$\Delta Q_g > H_q \Rightarrow d_q = 1 \quad (\text{III.41})$$

$$-H_q \leq \Delta Q_g \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta Q_g}{dt} > 0 \Rightarrow d_q = 0 \quad (\text{III.42})$$

$$-H_q \leq \Delta Q_g \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta Q_g}{dt} < 0 \Rightarrow d_q = 1 \quad (\text{III.43})$$

$$\Delta Q_g < -H_q \Rightarrow d_q = 0 \quad (\text{III.44})$$

Avec H_p, H_q sont les bandes d'hystérésis.

III.5.5 Dérivés des Puissances active et réactive en fonction du temps

Les dérivés des puissances instantanées active et réactive dépendent du choix du vecteur de la tension à l'entrée du convertisseur. Pour les huit vecteurs de tension nous obtenons huit valeurs possibles des dérivées des puissances instantanées active et réactive. Elles peuvent être données par [98] :

$$\frac{dp_g}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{g\alpha}^2 + V_{g\beta}^2) - \frac{1}{L_f} (V_{g\alpha} \cdot V_\alpha + V_{g\beta} \cdot V_\beta) \quad (\text{III.45})$$

$$\frac{dq_g}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{g\alpha} \cdot V_\beta - V_{g\beta} \cdot V_\alpha) \quad (\text{III.46})$$

Avec V_α, V_β sont les composantes de Concordia de la tension de la sortie du convertisseur.

III.5.6 Détermination du secteur

Le θ représente la position angulaire du vecteur de tension où se trouve la tension du réseau dans notre repère diphasé (α, β), cette position peut être calculée simplement par l'équation [88]:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{g\beta}}{V_{g\alpha}} \right) \tag{III.47}$$

Lorsque θ est connue, donc il faut déterminer dans quel secteur où se trouve les vecteurs de la tension du réseau. Cette technique de commande DPC, permet généralement de diviser le référentiel (α, β) en douze secteurs égaux avec un décalage de 30° comme montre dans la Figure III.13. Les secteurs peuvent être exprimés numériquement par l'équation suivante [57], [71], [74], [88] :

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n < (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n = 1,2 \dots 12 \tag{III.48}$$

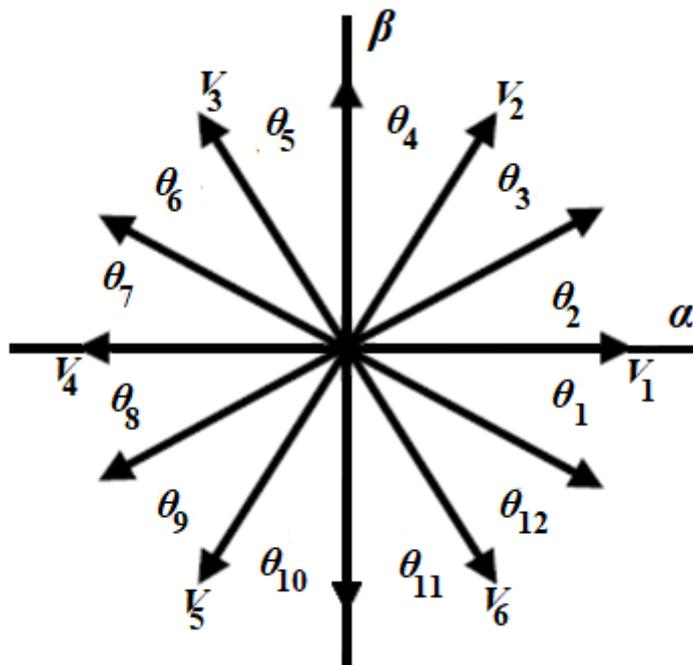


Figure III.13 Vecteurs de la tension dans le référentiel (α, β) avec 12 secteurs.

III.5.7 Table de commutation

Un convertisseur statique de puissance à deux niveaux génère huit vecteurs de tension pour huit combinaisons différentes : deux vecteurs nuls nommés (V_0 et V_7) et six vecteurs non nuls ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$) sont représentés dans le référentiel (α, β).

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

La table de commutation prend en entrée les sorties booléennes des comparateurs à hystérésis d_p , d_q et la position du vecteur de tension $V_{ga\beta}$ (1 à 12), les états de commutation S_a , S_b , et S_c du convertisseur statique de puissance sont sélectionnés par cette table de commutation; comme indiqué dans le tableau III.1 [70], [100].

Tableau III.1 Table de commutation de la DPC pour CCR

d_p	d_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

$V_1(100)$, $V_2(110)$, $V_3(010)$, $V_4(011)$, $V_5(001)$, $V_6(101)$, $V_0(000)$, $V_7(111)$

III.6 Résultats de simulations et discussions

Cette section est divisée en deux parties la première partie consiste à faire des essais de test sur les commandes étudiées pour CCM et CCR et la deuxième partie consiste à simuler la chaîne de conversion complète avec l'application d'un profil du vent réel.

Les résultats de simulation opérés à l'aide de logiciel Matlab/Simulink et de la bibliothèque SymPowerSystems dont les paramètres de la chaîne de conversion sont donnés dans l'Annexe A.

III.6.1 Test de suivi de consigne du CCM et CCR

III.6.1.1 Test de suivi de consigne de la commande vectorielle pour CCM

Nous avons soumis donc le CCM à des échelons de puissance active et réactive afin de tester et d'observer le comportement de la stratégie de commande vectorielle indirecte de puissance.

Les résultats de simulation de cette section sont présentés par les Figures ci-dessous.

Les Figure III.14 et III.15 présentent les puissances statoriques active et réactive de la MADA et leurs références mesurés. La consigne de puissance statoriques active prend deux valeurs de l'instant ($t=0s - 5s$) pour $P_s=-1MW$ et ($t=5s - 10s$) pour $P_s=1MW$ et en revanche la puissance statoriques réactive prend trois valeurs ($t=0s - 3.5s$) pour $Q_s=-0.7MVAR$, de ($t=3.5s - 7s$) pour $Q_s=0MW$ et de ($t=7s - 10s$) pour $Q_s=-0.7MVAR$

On constate que les échelons des puissances statoriques active et réactive sont bien suivent par leurs références correspondants.

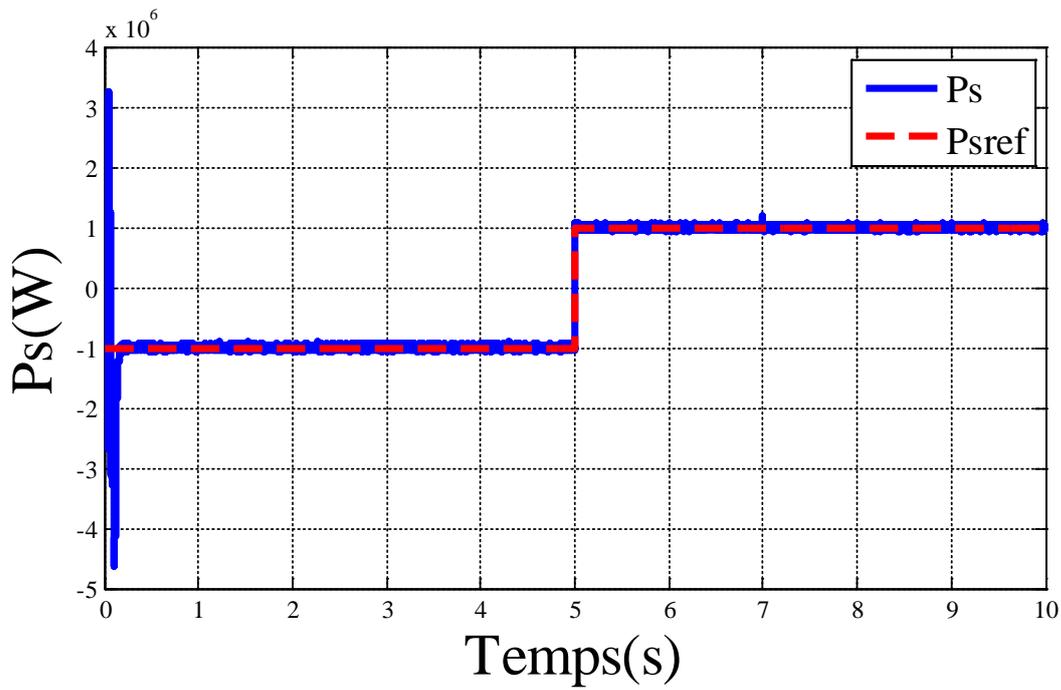


Figure III.14 Puissance active statorique.

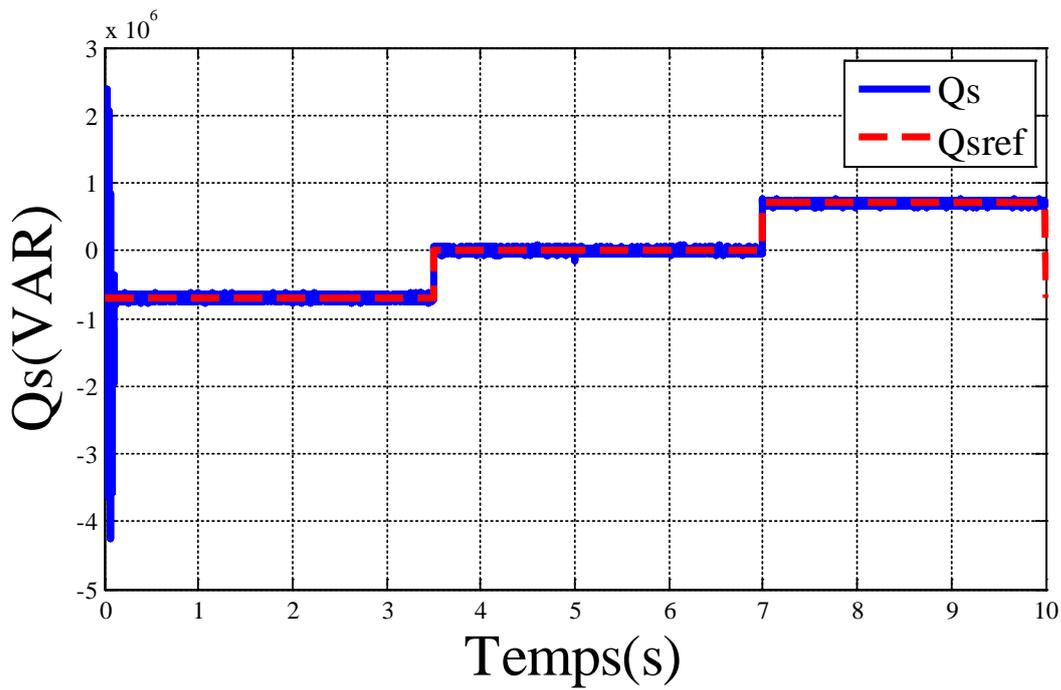


Figure III.15 Puissance réactive statorique.

Les Figures III.16 et III.17 montrent les composantes des courants rotoriques en quadrature et directe de la MADA. Ces derniers sont proportionnelle aux puissances statoriques active et réactive comme indique les équations III.24 et III.27. Donc, on peut dire que la puissance

active statorique est commandée par la composante en quadrature du courant rotorique, et la puissance réactive statorique est contrôlée par la composante en directe du courant rotorique.

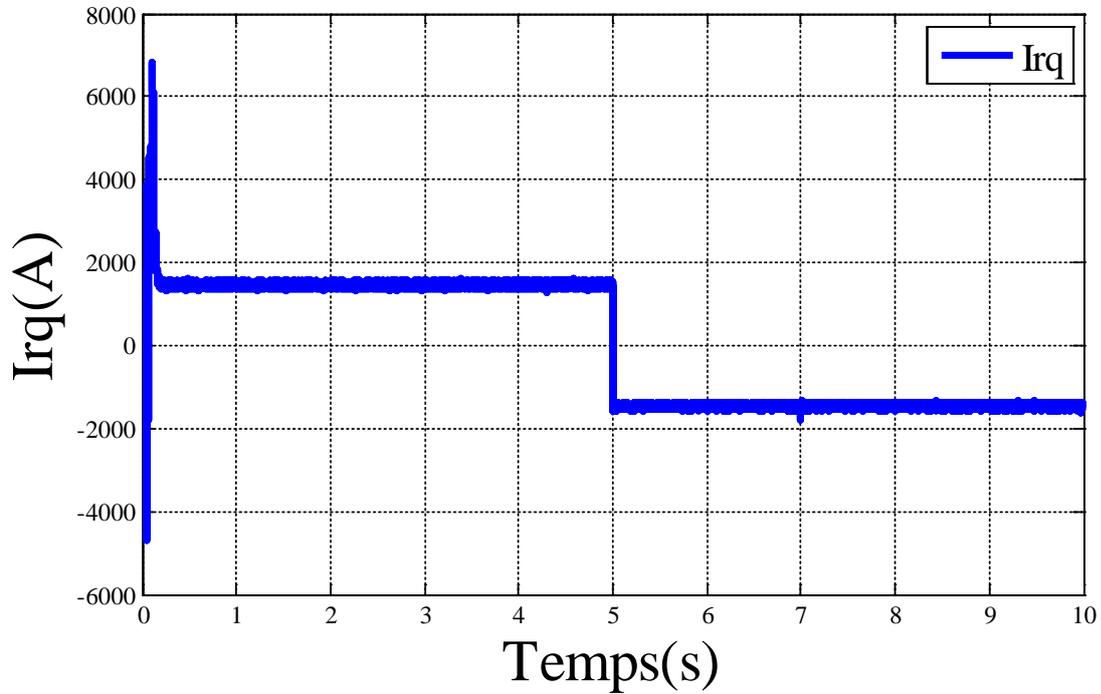


Figure III.16 Courant rotorique quadrature.

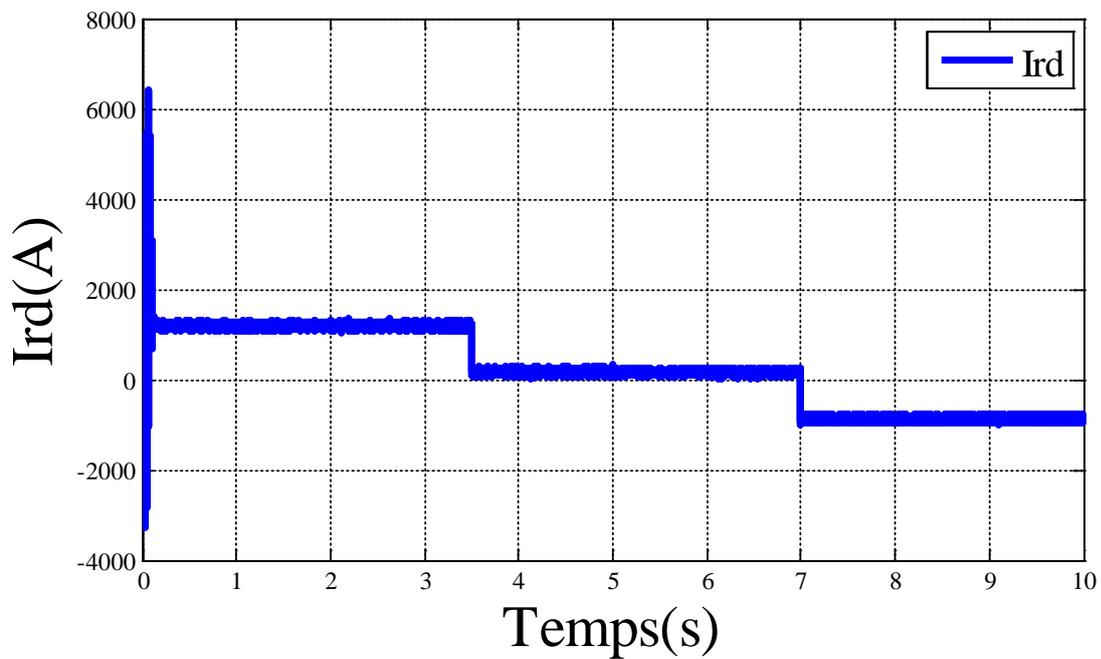


Figure III.17 Courant rotorique direct.

III.6.1.2 Test de suivi de consigne de la commande directe de puissance pour CCR

Dans cette section nous testons le comportement du contrôle direct de puissance (DPC).

La Figure III.18 présente la tension du bus continu et leur référence qui à maintient à 1200 V.

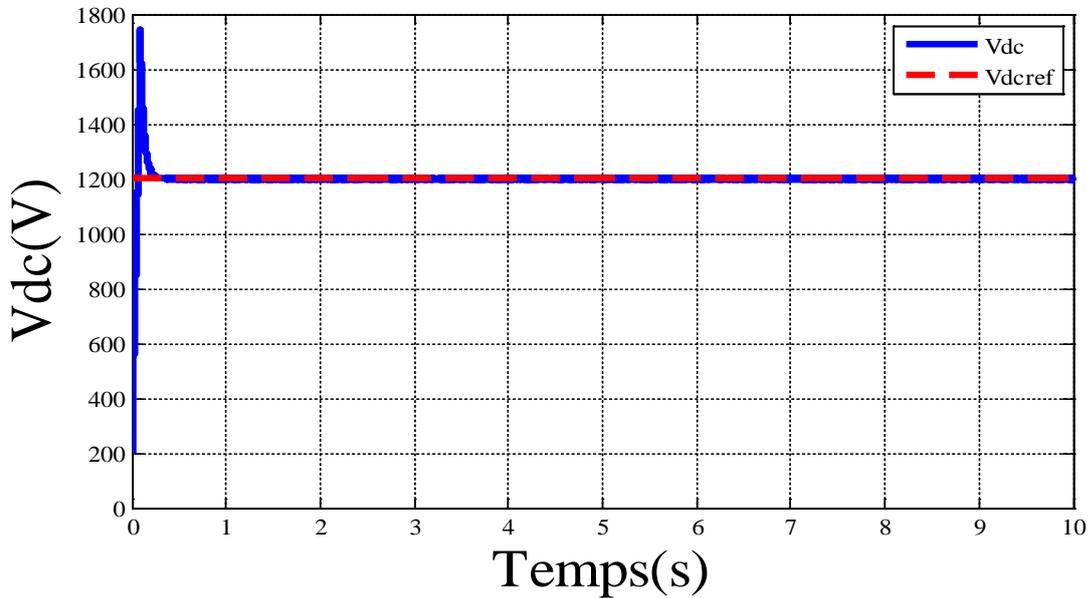


Figure III.18 Tension du bus continu.

Les Figures III.18 et III.20 montrent les puissances instantanées active et réactive côté réseau et leurs références, de la Figure III.20, on peut remarquer que la puissance réactive instantanée est maintien à zéro, pour assurer un facteur de puissance unitaire côté réseau.

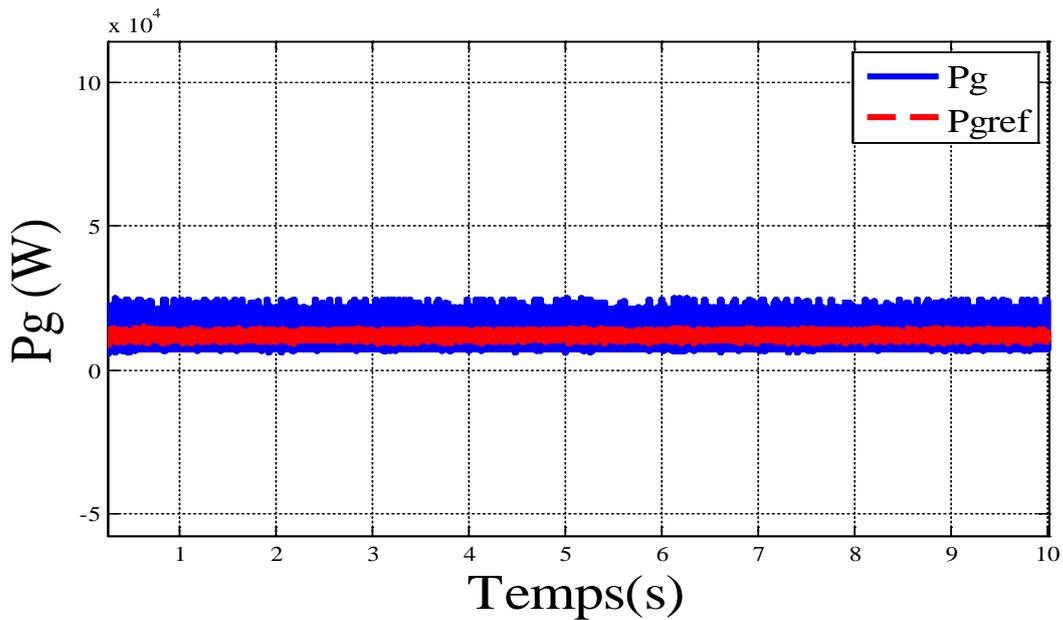


Figure III.19 Puissance active côté réseau.

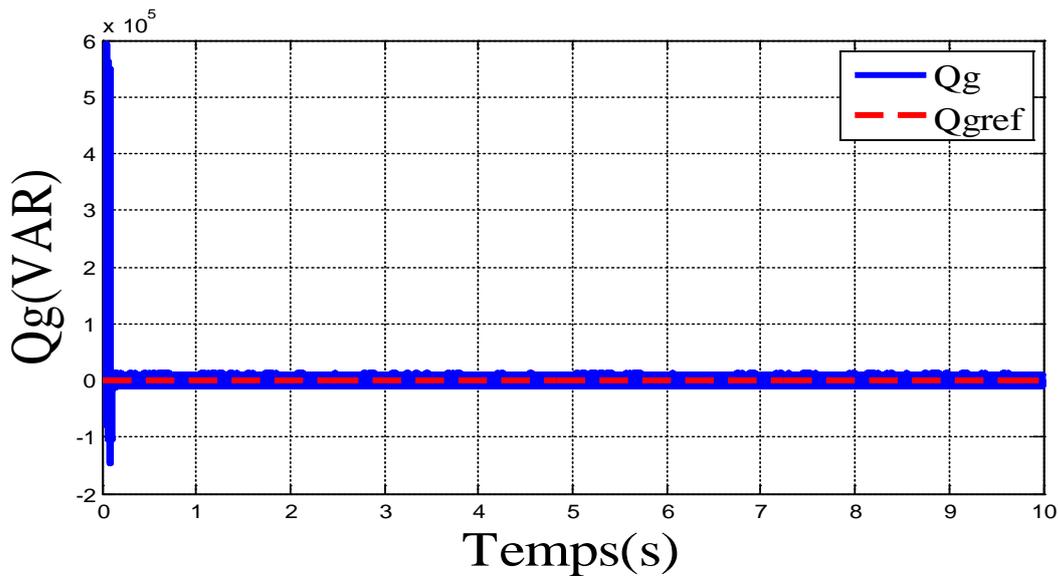


Figure III.20 Puissance réactive côté.

III.6.2 Simulation de la chaîne complète avec l'application d'un profil du vent

Le modèle de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA avec les trois commandes étudiées illustré par la Figure III.1 est simulé en mode hypo-synchrone.

Le profil du vent appliqué à la chaîne de conversion est illustré par la Figure III.20 sur 10 s.

Ce profil du vent est un exemple de profil de vent reconstruit à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven. Sa relation est donnée par l'équation (II.3).

La Figure III.22 montre la vitesse de rotation avec leur référence, le résultat du réglage de la vitesse de rotation est assurée par un régulateur PI, la courbe montre que le contrôle de la vitesse proposé est très satisfaisant, c à d la vitesse mesurée est identique à la référence obtenue par la stratégie de contrôle MPPT.

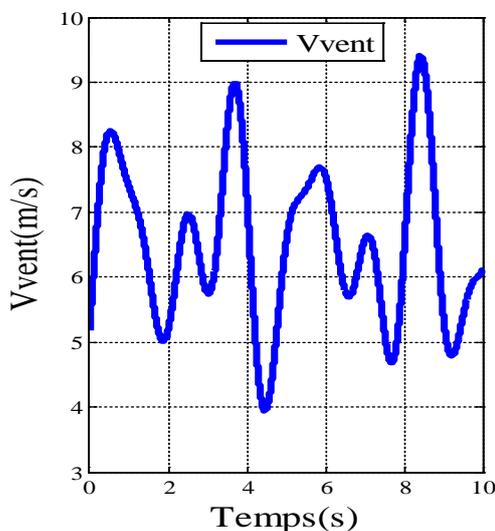


Figure III.21 Profil du vent

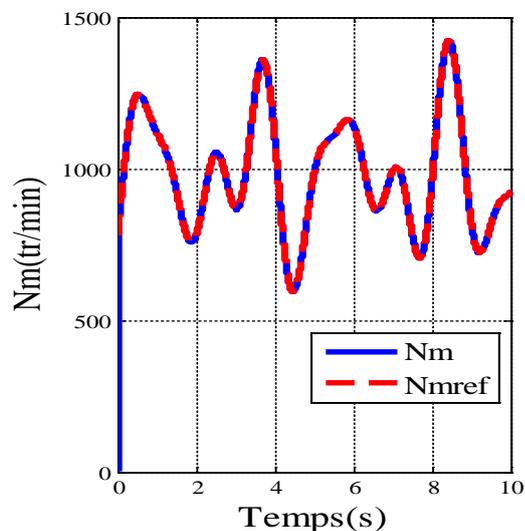


Figure III.22 Vitesse de rotation de la MADA

Chapitre III Commande vectorielle de la puissance (CV) d'une chaîne de conversion.....

Les Figures III.23 et III.24 représentent les puissances statoriques active et réactive de références et mesurées de la MADA. La puissance active de référence est obtenue par le contrôle MPPT, par contre la puissance réactive de référence est imposée à zéro pour assurer un facteur de puissance unitaire côté rotor de la machine de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. On peut noter que les puissances active et réactive mesurées de la MADA suivent avec une bonne précision leurs références; ceci assure un contrôle de la puissance active et réactive découplée avec de bonnes performances avec l'utilisation des régulateurs PI.

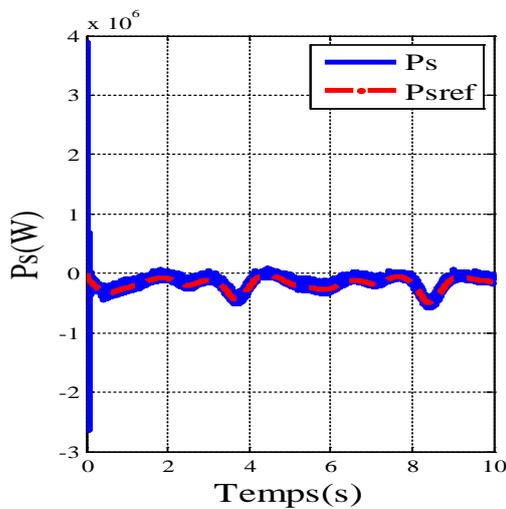


Figure III.23 Puissance statorique active

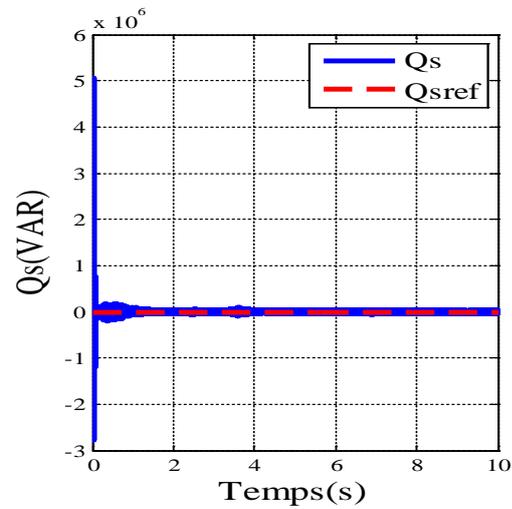


Figure III.24 Puissance statorique réactive.

Les Figures III.25 et III.26 montrent les composantes des courants rotoriques en quadrature et directe de la MADA

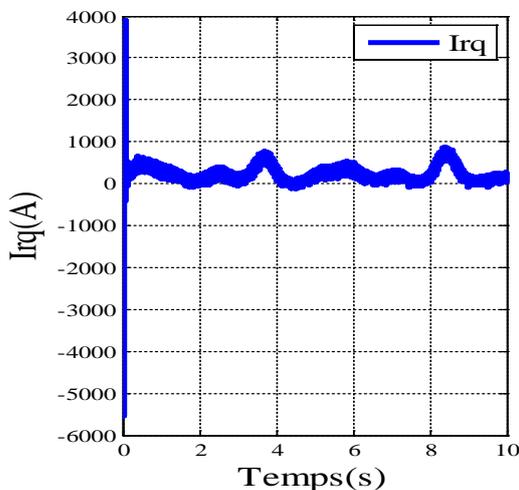


Figure III.25 Courant rotorique quadrature

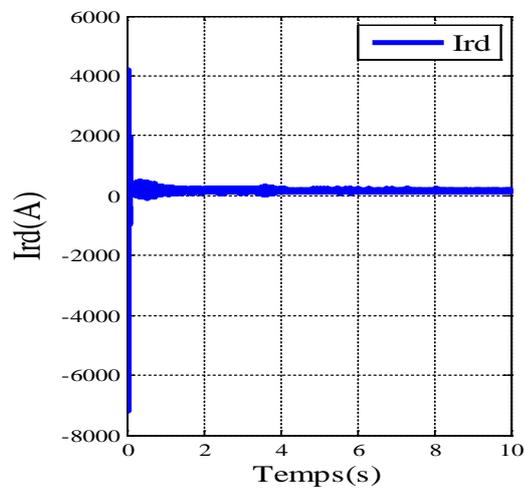


Figure III.26 Courant rotorique direct.

La Figure III.27 illustre le courant statorique de la MADA.

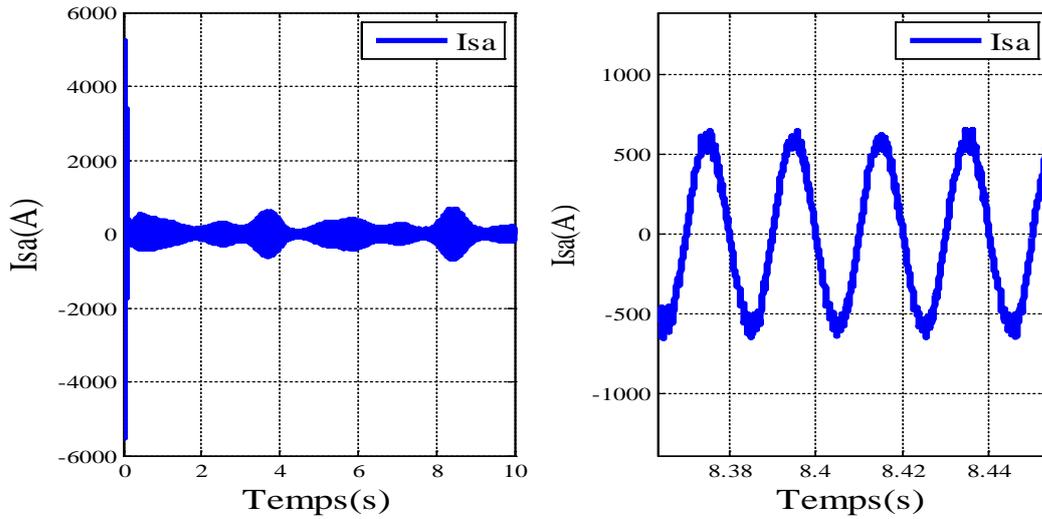


Figure III.27 Courant statorique.

La Figure III.28 illustre le courant rotorique de la MADA.

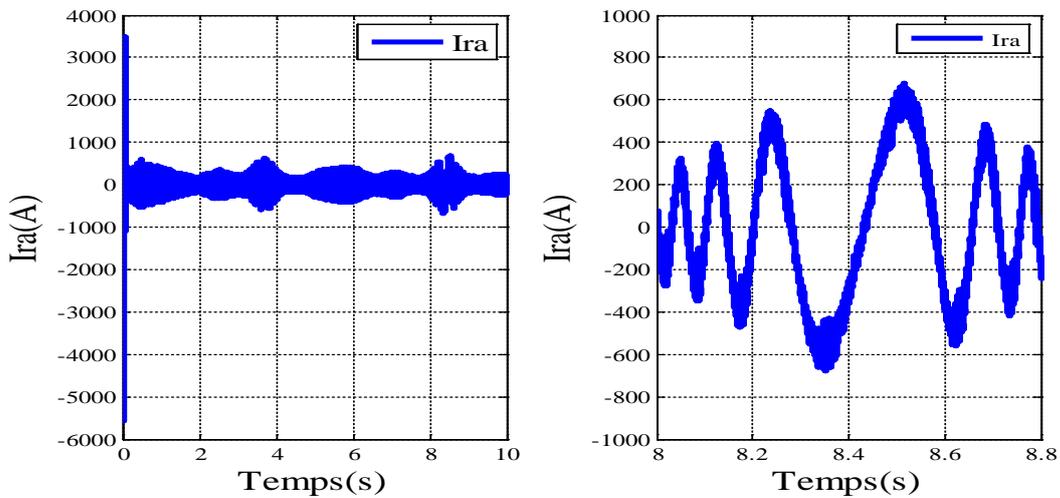


Figure III.28 Courant rotorique.

Le résultat de simulation de la tension du bus continu est représenté sur la Figure III.29; La référence de tension du bus continu est réglée à 1200 V, la tension mesurée suit parfaitement la tension de référence et reste aussi constante malgré les variations de la vitesse du vent à l'exception des conditions initiales où la boucle de régulation de tension n'a pas assez de temps pour réagir. Cela montre l'efficacité du régulateur PI utilisé pour le contrôle de la tension du bus continu.

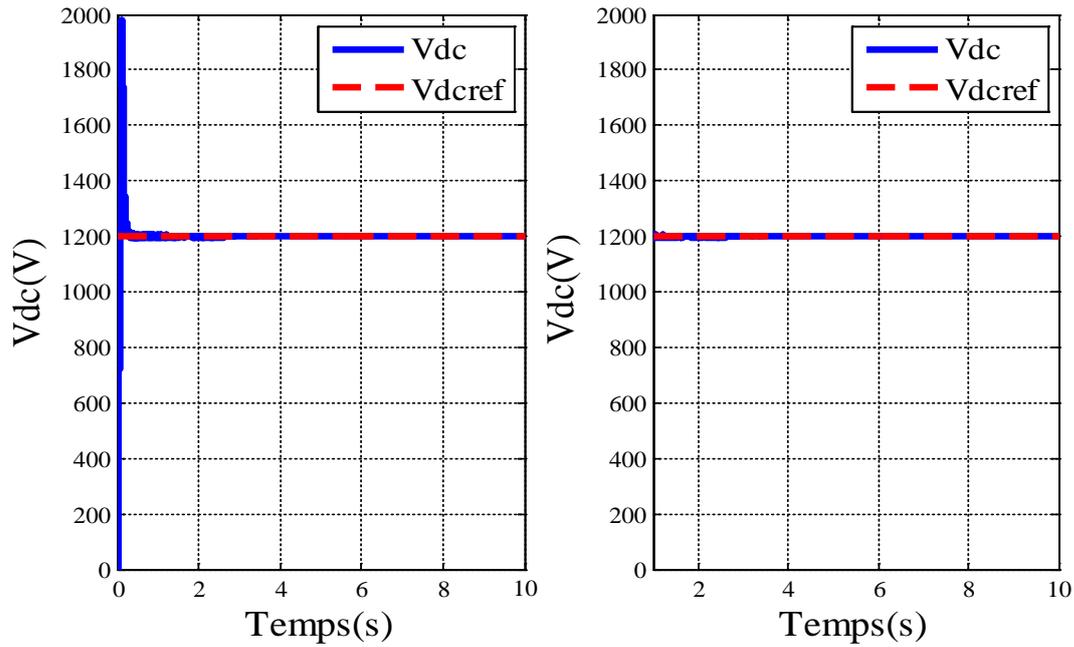


Figure III.29 Tension du bus continu.

Les Figures III.30 et III.31 montrent les puissances instantanées active et réactive côté réseau et leurs références. On constate que les grandeurs de référence suivent bien les grandeurs mesurés, pour la puissance réactive instantanée est maintenue à zéro, afin d'assurer un facteur de puissance unitaire côté réseau.

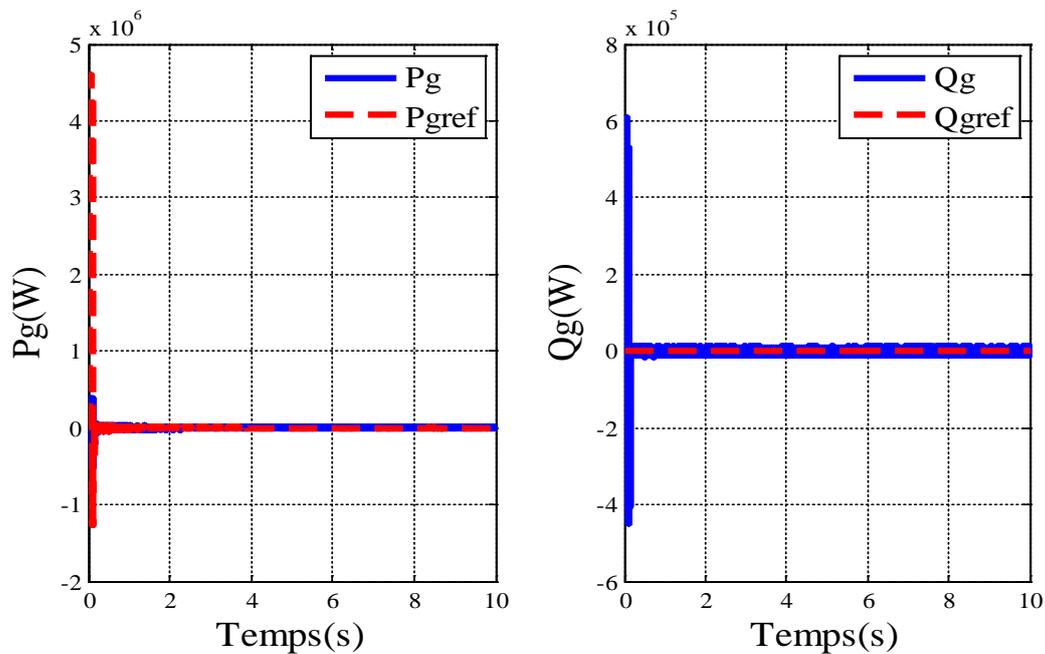


Figure III.30 Puissance active côté réseau. **Figure III.31** Puissance réactive côté réseau.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé la stratégie de commande vectorielle de la puissance active et réactive du système éolien à base de la MADA de 1.5 MW.

Nous avons présenté en détail trois techniques de commande, la technique MPPT, la commande vectorielle de puissance active et réactive pour le CCM et le contrôle direct de puissance (DPC) pour le CCR.

Nous avons travaillé dans la zone 2 qui permet un fonctionnement optimal de l'éolienne. La technique MPPT permet à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent, puis nous présentons les différents types de MPPT et pour notre étude, nous avons choisi et étudié la technique MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation par l'utilisation d'un régulateur PI, cette technique simple et dépendante de la vitesse du vent.

Pour le CCM nous avons détaillé la commande vectorielle des puissances statoriques active et réactive afin d'avoir un contrôle séparé des puissances.

Pour le CCR, contrairement aux méthodes traditionnelles, la DPC a été choisie pour sa simplicité. Non utilisation des boucles imbriquées. Elle présente plusieurs avantages par rapport au contrôle vectoriel, ainsi le réglage de la tension de bus continu est réalisé par un régulateur PI.

Enfin, et afin de valider les commandes utilisées des résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne complète ont été effectués sous environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation dévoilent que la commande de la chaîne de conversion complète montre des bonnes performances.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la structure et la commande directe de puissance d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA, avec le développement des techniques de commande pour les différentes parties de la chaîne:

- ✓ Le contrôle de la vitesse de rotation par un régulateur IP.
- ✓ Le contrôle du convertisseur côté MADA par le contrôle direct de puissance.
- ✓ Le contrôle du convertisseur côté réseau par le contrôle direct de puissance.

Dans la deuxième partie nous avons proposé une méthode qui consiste à combiner entre la commande vectorielle et la DPC, l'objectif de cette proposition est de profiter des avantages de deux techniques pour la commande de CCM.

Chapitre IV

Commande directe de puissance (DPC)
d'une chaine de conversion éolienne à base
d'une MADA

IV.1 Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons étudié et analysé les résultats de simulation d'une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable à base d'une MADA contrôlée par une commande vectorielle des puissances active et réactive classique basée sur l'orientation de flux statorique. Cette dernière technique de commande est la plus populaire dans les systèmes éoliens à base de la MADA. Malgré sa popularité elle présente plusieurs inconvénients tels que la dépendance aux paramètres de la machine. Pour surpasser cet inconvénient et d'autres difficultés rencontrés lors de l'application de la commande vectorielle et afin d'avoir des meilleures solutions de contrôle, nous introduisons deux stratégies de commande pour la MADA dans une chaîne de conversion éolienne, la première est la commande directe de puissance (DPC) et pour la deuxième nous combinons entre les deux commandes proposées (CV-DPC).

Ce chapitre traite donc la commande d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA. Dans la première partie la commande directe de puissance (DPC) est appliquée pour le CCM et CCR en plus de la présence de technique MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation, la régulation est assurée par un régulateur intégral-proportionnel (IP). A la fin de cette partie, des résultats simulation de la chaîne complète sont présentés et discutés pour deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Dans la deuxième partie de chapitre nous avons proposé une méthode pour le CCM afin de contrôler la MADA. Cette proposition consiste à combiner entre la commande vectorielle classique des puissances (CV) et la commande directe de puissance (DPC) pour une application éolienne. L'objectif de cette proposition est de profiter des avantages simultanés de ces deux techniques. Afin de valider cette proposition des simulations ont été réalisés sous environnement Matlab/Simulink et les résultats de simulations sont montrés et interprétés.

IV.2 Description du dispositif des techniques de commande

La Figure IV.1 présente le schéma synoptique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA de 1.5 MW étudiée et avec également les stratégies de contrôle appliqués aux différentes parties de la chaîne de conversion qui seront abordés et analysés dans les sections suivantes de ce chapitre [96].

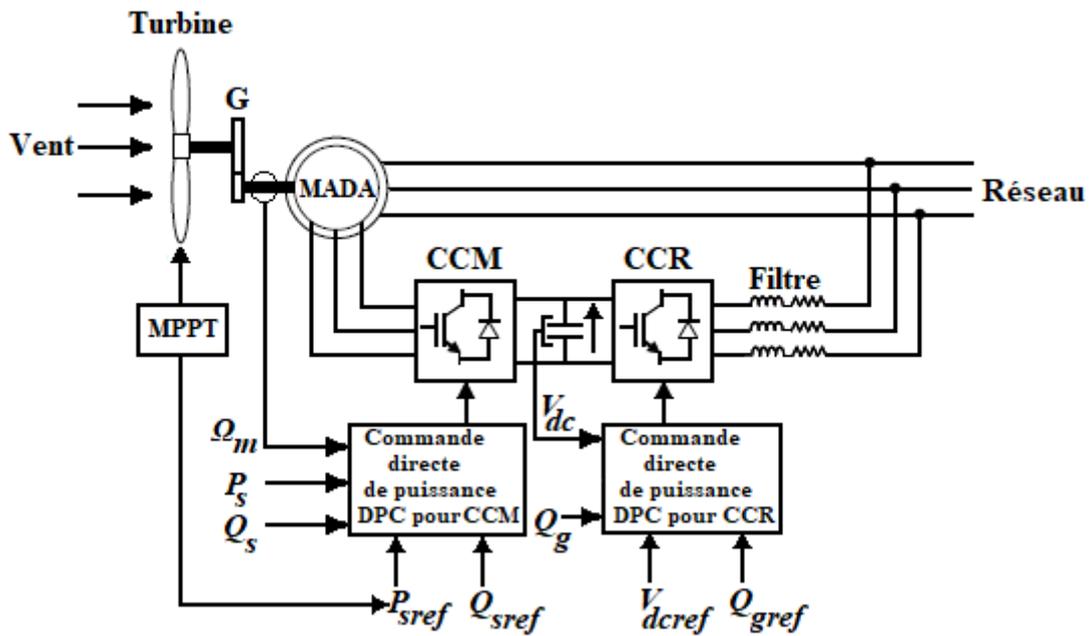


Figure IV.1 Schéma synoptique de commande du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

D'après la Figure IV.1 trois stratégies de commande sont appliquées à cette chaîne [96] :

- **la technique MPPT** d'extraction avec asservissement de la vitesse de rotation, le réglage de cette dernière est réalisé par un régulateur IP.
- **la commande du CCM** en contrôlant séparément par la commande directe de puissance (DPC) la puissance active statorique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- **la commande du CCR** en contrôlant par la commande directe de puissance (DPC) les puissances active et réactive échangées avec le réseau et la tension du bus continu.

IV.3 Technique MPPT avec asservissement de vitesse

Dans cette section nous avons utilisé la technique MPPT avec asservissement de vitesse qui nous avons déjà utilisée dans le Chapitre III, section III.3.3, mais cette fois le réglage de la vitesse est assurée par un régulateur IP comme le montre la Figure IV.2

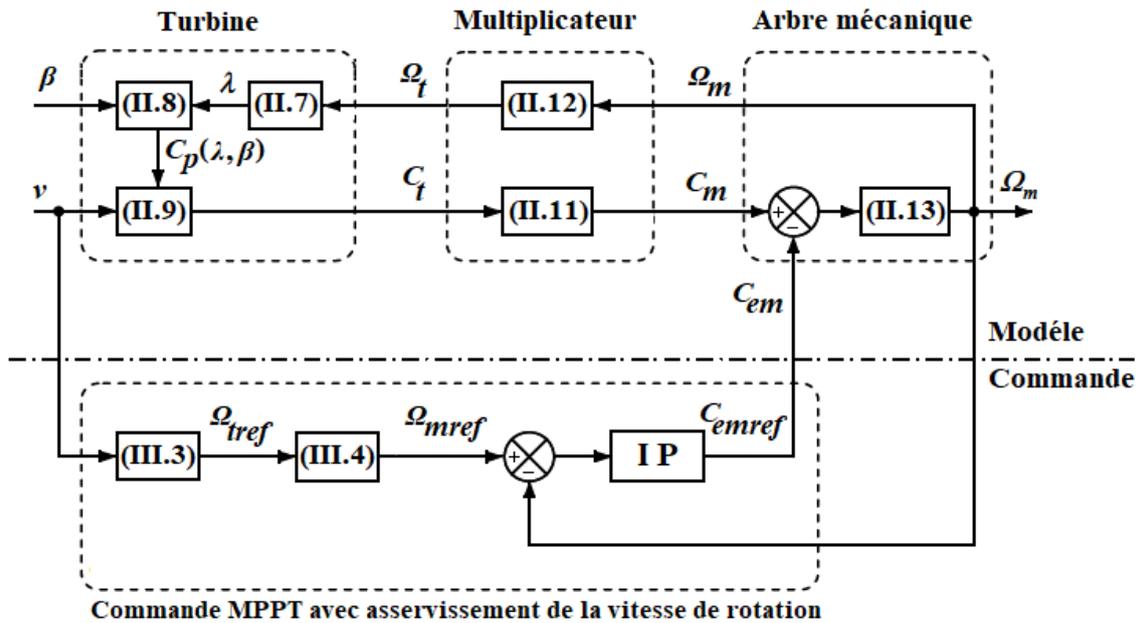


Figure IV.2 Stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

IV.3.1 Calcul des paramètres du régulateur IP

Le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse de rotation avec régulateur IP est illustré par la Figure IV.3 :

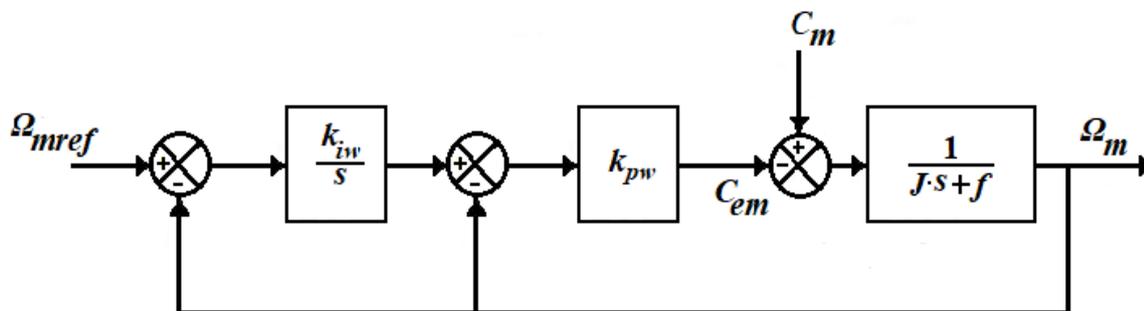


Figure IV.3 Schéma fonctionnel de contrôle de la vitesse utilisant un régulateur IP.

L'erreur de vitesse entre celle de référence Ω_{mref} et la vitesse de rotation mécanique Ω_m de la MADA est transmise au régulateur IP, et K_{pw} et K_{iw} sont les gains proportionnel et intégral du régulateur IP. La sortie du régulateur IP agit comme un couple de référence à la MADA [92]. La fonction de transfert entre la vitesse de sortie Ω_m et la vitesse de référence Ω_{mref} est donnée par :

$$\frac{\Omega_m}{\Omega_{mref}} = \frac{K_{pw} \cdot K_{iw}}{J s^2 + (f + K_{pw})s + K_{pw} K_{iw}} \quad (IV.1)$$

Chapitre IV Commande directe de puissance (DPC) d'une chaîne de conversion

Le dénominateur de la fonction de transfert de la vitesse de rotation (l'équation (IV.1)) est imposé à zéro, puis nous avons comparé ce dernier à une équation différentielle du second ordre comme montré à l'équation suivante:

$$\begin{cases} Js^2 + (f + K_{pw})s + K_{pw}K_{iw} = 0 \Rightarrow s^2 + \frac{(f+K_{pw})}{J}s + \frac{K_{pw}K_{iw}}{J} = 0 \\ s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \end{cases} \quad (IV.2)$$

Par identification terme à terme on peut écrire :

$$\frac{K_{pw} + f}{J} = 2\xi\omega_n \quad (IV.3)$$

$$\frac{K_{pw}K_{iw}}{J} = \omega_n^2 \quad (IV.4)$$

Donc, nous déduisons les expressions des paramètres k_{pw} et k_{iw} :

$$K_{pw} = 2\xi\omega_n J - f \quad (IV.5)$$

$$K_{iw} = \frac{J\omega_n^2}{K_{pw}} \quad (IV.6)$$

Avec : ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation propre.

IV.4 Commande directe de la puissance (DPC) pour le CCM

IV.4.1 Modèle de la MADA en (d) dans une référence liée au rotor

Dans cette section nous allons présenter le modèle de la MADA liée au rotor, les équations de tension du stator et du rotor peuvent s'écrire comme suit [57], [75], [101] :

$$V_s^r = R_s I_s^r + \frac{d\varphi_s^r}{dt} - \omega_s \varphi_s^r \quad (IV.7)$$

$$V_r^r = R_r I_r^r + \frac{d\varphi_r^r}{dt} \quad (IV.8)$$

"r" indique que les équations ont été écrites dans le repère lié au rotor.

Les équations des flux statoriques et rotoriques dans le repère lié au rotor [57], [75], [101] :

$$\varphi_s^r = L_s I_s^r + M I_r^r \quad (IV.9)$$

$$\varphi_r^r = L_r I_r^r + M I_s^r \quad (IV.10)$$

IV.4.2 Principe de la commande directe de puissance (DPC)

La commande directe de la puissance (DPC) a été développée pour le contrôle des convertisseurs de puissance [70], [71]. Finalement, compte tenu de ses capacités de suivi, rapidité de puissance, robustesse et précision, la DPC est devenue l'une des principales stratégies de commande pour les systèmes éoliennes basés sur la MADA [54], [55], [72], [80], [96].

La DPC est basée sur les mêmes principes de la technique de commande directe du couple (DTC), utilisée pour la commande des moteurs électriques. L'unique différence étant les variables commandées directement. Dans le cas de la DTC, le couple électromagnétique et le flux rotorique sont directement commandés, cependant pour la DPC, les puissances statoriques active et réactive sont directement commandées, sans l'utilisation des boucles intermédiaires des régulateurs de courant, comme en commande vectorielle avec flux orienté. En fait, il est basé sur la détermination des vecteurs instantanés rotoriques dans chaque période d'échantillonnage concernant les puissances statoriques active et réactive [31], [96].

Le schéma synoptique de principe de la DPC est représenté par la Figure IV.4 comme on le voit, les valeurs calculées des puissances statoriques active et réactive sont comparées aux références correspondantes, et les erreurs sont envoyées à deux comparateurs d'hystérésis à trois et deux niveaux [55], [101]. En utilisant les sorties des comparateurs à hystérésis ainsi que le numéro de secteur dans lequel se trouve le flux statorique lié au référence rotorique, les vecteurs de commutation de convertisseur de puissance à deux niveaux (S_a, S_b, S_c) ont été sélectionnés à partir d'une table de commutation [55], [101].

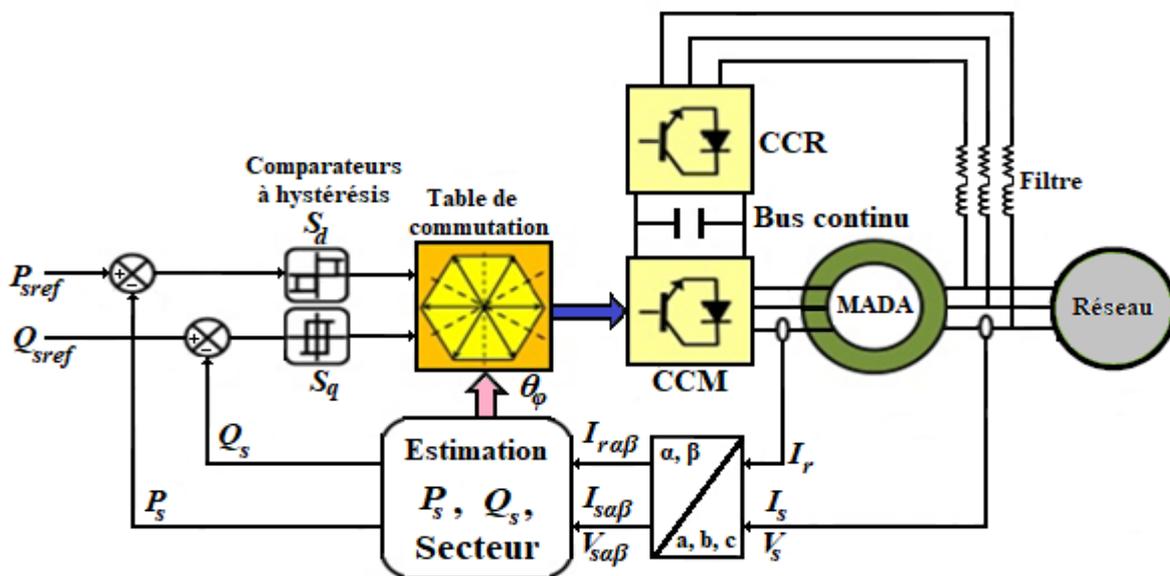


Figure IV.4 Schéma synoptique de la commande directe de puissance (DPC) pour le CCM.

IV.4.3 Concept de base de la DPC appliquée à la MADA

La technique de contrôle directe de puissance (DPC) est basée sur une représentation de vecteur du flux rotorique et du flux statorique et l'angle entre eux, les équations II.36 et (II.37) présentées dans le chapitre II montrent que les puissances statoriques active et réactive de la MADA peuvent être calculées directement à partir de la tension et des courants du stator. Notons que la tension du stator est fixée par le réseau, tandis que le courant du stator établi dépend de la façon dont les vecteurs de tension du rotor ont été choisis, en négligeant la chute de tension à travers la résistance du stator et la vitesse du rotor ne change pas pendant l'intervalle d'échantillonnage durant une période. Par conséquent, afin de clarifier le principe de cette étude, la technique DPC peut être expliquée par les expressions des puissances statoriques active et réactive suivantes [31], [32], [54], [55], [75], [101] :

$$P_s = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| |\varphi_r^r| \sin \theta_\varphi \quad (\text{IV.10})$$

$$Q_s = \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\varphi_s^r| \left(|\varphi_s^r| - \frac{M}{L_r} |\varphi_r^r| \cos \theta_\varphi \right) \quad (\text{IV.11})$$

Avec :

$$\sigma = \frac{L_s L_r - M^2}{L_s L_r}$$

θ_φ : angle entre les vecteurs du flux statorique et flux rotorique.

Les dérivées des équations (IV.10) et (IV.11) sont données par [32], [55] :

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| \frac{d(|\varphi_r^r| \cos \theta_\varphi)}{dt} \quad (\text{IV.12})$$

$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| \frac{d(|\varphi_r^r| \sin \theta_\varphi)}{dt} \quad (\text{IV.13})$$

Ces dernières expressions montrent que, ayant un flux statorique constant φ_s^r et ω_s constante, les puissances statoriques active et réactive peuvent être contrôlées séparément en modifiant l'angle relatif θ_φ entre les vecteurs d'espace du flux statorique et rotorique et leurs amplitudes en ajustant sur $|\varphi_r^r| \sin \theta_\varphi$ pour la puissance statorique active P_s et sur $|\varphi_r^r| \cos \theta_\varphi$ pour la puissance statorique réactive Q_s comme indique la Figure IV.5.

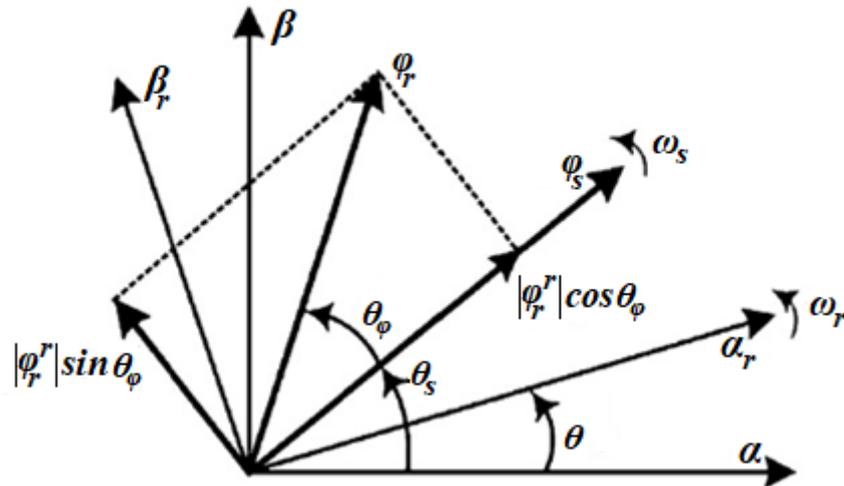


Figure IV.5 Vecteurs du flux statorique et rotorique dans $(\alpha\text{-}\beta)$ et le repère lié au rotor.

IV.4.4 Contrôle direct du flux rotorique

Le convertisseur de puissance à deux niveaux côté machine (CCM) génère huit vecteurs de tension pour huit combinaisons différentes : deux vecteurs nuls nommés (V_0 et V_7) et six vecteurs non nuls ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$), le vecteur de tension des convertisseurs de puissance triphasés est représenté comme suit [31]:

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left[S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (\text{IV.14})$$

Si on néglige la résistance rotorique à partir de l'équation (IV.8), l'équation de la tension rotorique [31], [101], [102] :

$$\frac{d\varphi_r^r}{dt} = V_r^r - R_r I_r^r \approx V_r^r \quad (\text{IV.15})$$

L'équation (IV.15) indique clairement que la variation du flux rotorique dépend de la tension du rotor appliquée [101], [102].

Les flux du stator et du rotor sont calculés dans chaque intervalle d'échantillonnage en utilisant les équations suivantes [55] :

$$\varphi_s^s = \int (V_s^s - R_s I_s^s) dt \quad (\text{IV.16})$$

$$\varphi_r^r = \int (V_r^r - R_r I_r^r) dt \quad (\text{IV.17})$$

La Figure IV.6 montre les huit vecteurs de tension du convertisseur de puissance côté machine (CCM) à deux niveaux dont le plan vectoriel est divisé en six secteurs; tels que:

$$(2K - 3) \frac{\pi}{6} \leq \theta_{\phi k} \leq (2K - 1) \frac{\pi}{6} \quad k = 1, 2 \dots 6 \quad (\text{IV.16})$$

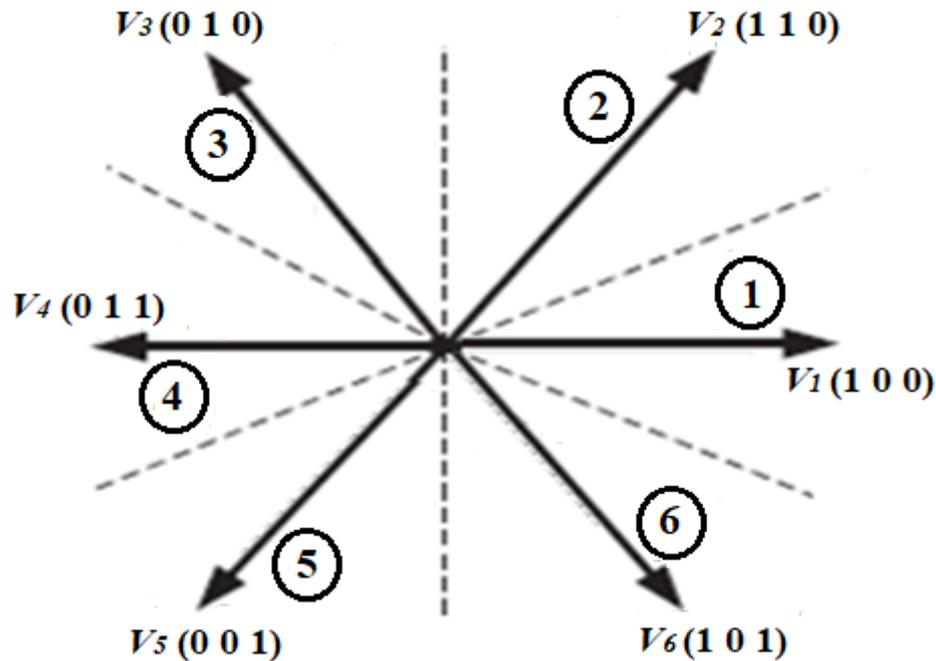


Figure IV.6 Vecteurs de la tension du convertisseur côté machine avec 6 secteurs.

IV.4.5 Les puissances statoriques instantanées active et réactive

Les puissances statoriques instantanées active et réactive peuvent être exprimées en fonction des tensions et des courants statoriques à partir des relations suivantes [80], [103] :

$$P_s = V_{s\alpha} I_{s\alpha} + V_{s\beta} I_{s\beta} \quad (\text{IV.17})$$

$$Q_s = V_{s\beta} I_{s\alpha} - V_{s\alpha} I_{s\beta} \quad (\text{IV.18})$$

IV.4.6 Comparateurs à hystérésis

Les régulateurs utilisés sont des comparateurs à hystérésis pour le contrôle du CCM; nous avons utilisé deux régulateurs à deux et trois niveaux caractérisés par une bande fixée comme le montre la Figure IV.7, le régulateur d'hystérésis à 3 niveaux a été proposé pour la commande de puissance active P_s (Figure IV.7.a), où S_p est le signal de sortie prend les états "1" et "-1" (augmentation / diminution), mais aussi "0" pour maintenir P_s et un régulateur

d'hystérésis à deux niveaux a été proposé pour la commande de la puissance réactive Q_s (Figure IV.7.b), où S_q est le signal de sortie prend "1" pour augmenter Q_s et "0" pour le diminuer [54], [88].

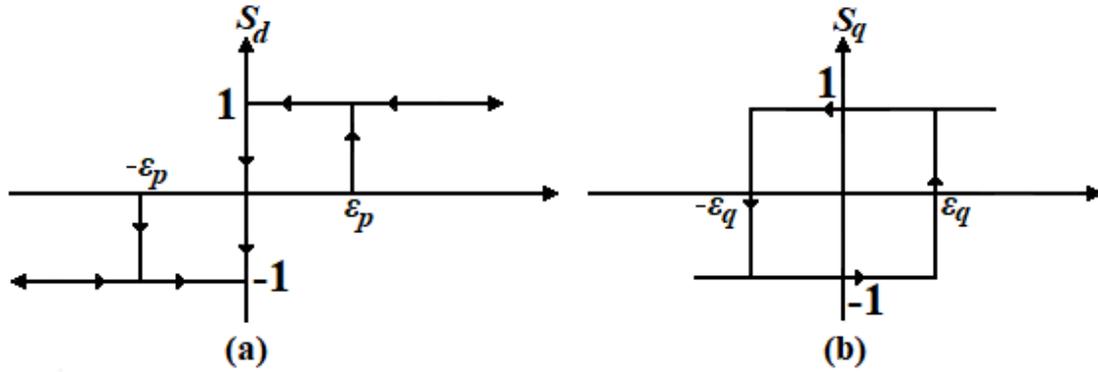


Figure IV.7 Comparateurs à hystérésis: a) Trois niveaux; b) Deux niveaux.

Avec $\Delta P_s = P_{sref} - P_s$ et $\Delta Q_s = Q_{sref} - Q_s$

Le comparateur à hystérésis à trois niveaux est modélisé par:

$$\Delta P_s > \varepsilon_p \Rightarrow S_p = 1 \quad (IV.19)$$

$$0 \leq \Delta P_s \leq \varepsilon_p \text{ et } \frac{d\Delta P_s}{dt} > 0 \Rightarrow S_p = 0 \quad (IV.20)$$

$$0 \leq \Delta P_s \leq \varepsilon_p \text{ et } \frac{d\Delta P_s}{dt} < 0 \Rightarrow S_p = 1 \quad (IV.21)$$

$$\Delta P_s < -\varepsilon_p \Rightarrow S_p = -1 \quad (IV.22)$$

$$-\varepsilon_p \leq \Delta P_s \leq 0 \text{ et } \frac{d\Delta P_s}{dt} > 0 \Rightarrow S_p = 0 \quad (IV.23)$$

$$-\varepsilon_p \leq \Delta P_s \leq 0 \text{ et } \frac{d\Delta P_s}{dt} < 0 \Rightarrow S_p = -1 \quad (IV.24)$$

Le comparateur à hystérésis à deux niveaux est modélisé par:

$$\Delta Q_s > \varepsilon_p \Rightarrow S_q = 1 \quad (IV.25)$$

$$-\varepsilon_q \leq \Delta Q_s \leq \varepsilon_q \text{ et } \frac{d\Delta Q_s}{dt} > 0 \Rightarrow S_q = 0 \quad (\text{IV.26})$$

$$-\varepsilon_q \leq \Delta Q_s \leq \varepsilon_q \text{ et } \frac{d\Delta Q_s}{dt} > 0 \Rightarrow S_q = 1 \quad (\text{IV.27})$$

$$\Delta Q_s < -\varepsilon_p \Rightarrow S_q = 0 \quad (\text{IV.28})$$

IV.4.7 Table de commutation

Les signaux d'erreur numérisés S_p et S_q et le secteur du flux rotorique (1 à 6) sont les entrées de la table de commutation dans laquelle chaque état de commutation du convertisseur statique de puissance S_a , S_b et S_c est indiqué dans le Tableau IV.1 [102].

Tableau IV.1 Table de commutation optimale de la DPC pour CCM

S_q	S_p	θ_{φ_1}	θ_{φ_2}	θ_{φ_3}	θ_{φ_4}	θ_{φ_5}	θ_{φ_6}
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
-1	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

$V_1(100), V_2(110), V_3(010), V_4(011), V_5(001), V_6(101), V_0(000), V_7(111)$

IV.5 Commande directe de la puissance (DPC) pour le CCR

Pour la commande du CCR nous avons appliqué la commande directe de la puissance (DPC), qui est étudiée déjà en détail dans le Chapitre III, section III.5.

IV.6 Résultats de simulations et discussions

Les résultats ont été obtenus par simulation effectuée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink dont les paramètres de la chaîne de conversion sont donnés dans l'Annexe A.

Le modèle global de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA, avec les trois commandes étudiées, illustré par la Figure IV.1 est étudié par simulation pour valider les commandes étudiées dans ce chapitre pour les deux modes de fonctionnements : hypo-synchrone et hyper-synchrone.

La Figure IV.8 montre l'exemple du profil du vent appliqué au système étudié, profil du vent à deux vitesses, pour le mode de fonctionnement hypo-synchrone une vitesse de vent égale à 9 m/s (0s à 5s), ce qui correspond à une vitesse de rotation de la MADA avec contrôle MPPT d'environ 1360 tr/min, et pour le mode de fonctionnement hyper-synchrone une vitesse de vent égale à 11m/s (5s à 10s), ce qui correspond à une vitesse de rotation de la MADA avec contrôle MPPT d'environ 1660 tr/min.

La Figure IV.9 montre la vitesse de référence et la vitesse mesurée de rotation de la MADA obtenue à partir de la simulation du système. On peut constater que la vitesse mesurée est ajustée avec précision aux formes d'onde de la vitesse de référence, obtenue à partir de la MPPT. Il est à noter que pendant la durée de 5s le système éolien passe de mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone.

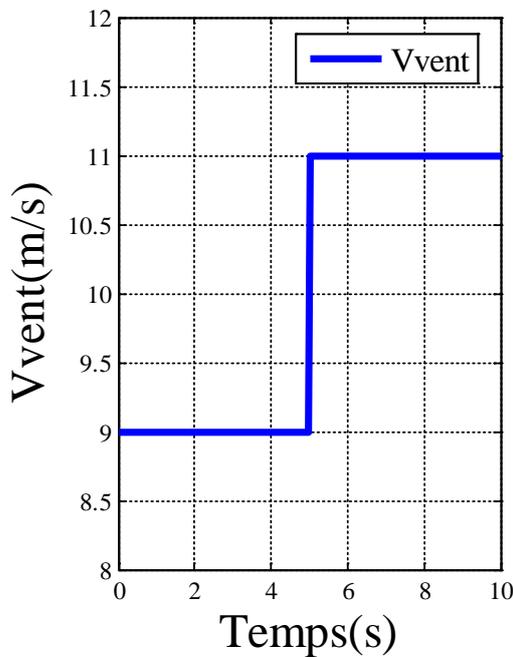


Figure IV.8 Profil du vent

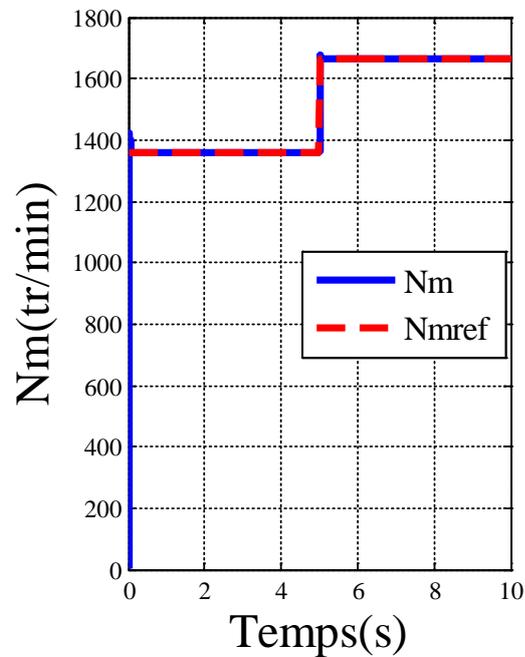


Figure IV.9 Vitesse de rotation de la MADA

Les Figures IV.10 et IV.11 montrent les puissances statoriques active et réactive de la MADA mesurées avec leurs références. La référence de la puissance statorique active est obtenue avec MPPT. La référence de puissance réactive maintenue à zéro pour assurer un facteur de puissance unitaire du côté de la MADA afin d'optimiser la qualité de l'énergie fournie au réseau. La commande DPC appliquée à la MADA donne de bonnes performances avec une meilleure robustesse de la commande de puissance par rapport à la commande vectorielle.

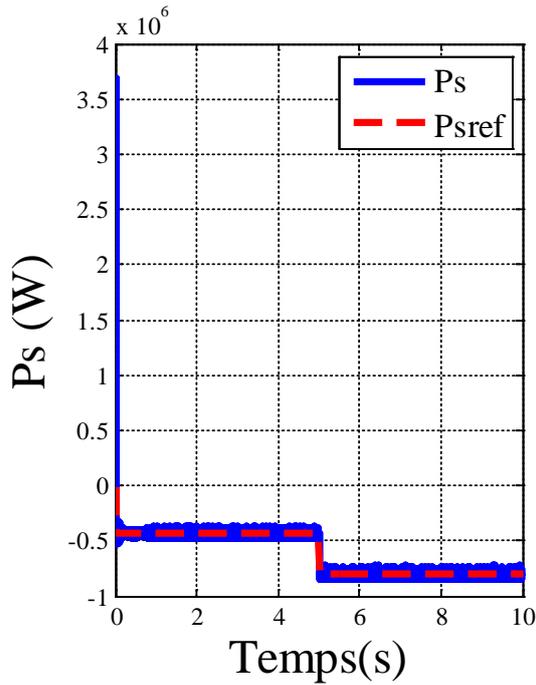


Figure IV.10 Puissance statorique active

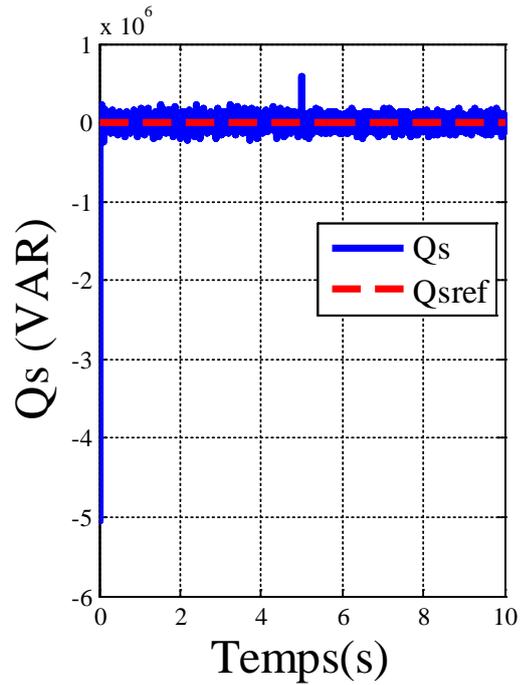


Figure IV.11 Puissance statorique réactive.

Les Figures IV.12 et IV.13 montrent le courant statorique, et le courant rotorique de la MADA pendant les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone. Ces résultats confirment que la MADA peut fonctionner dans les deux modes tout en permettant un passage doux durant le changement de mode.

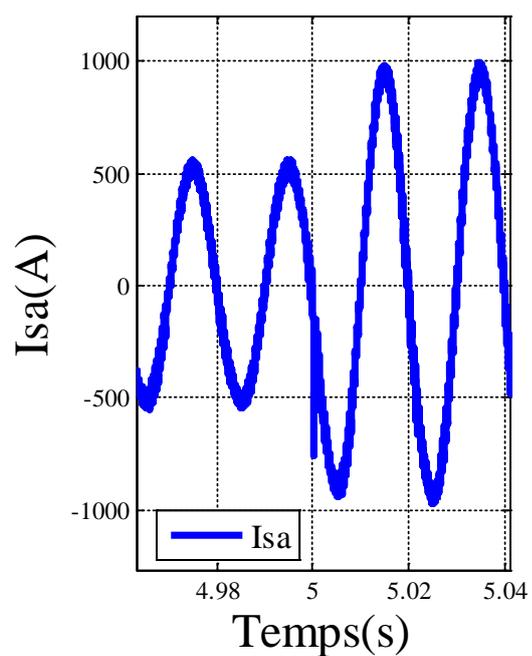
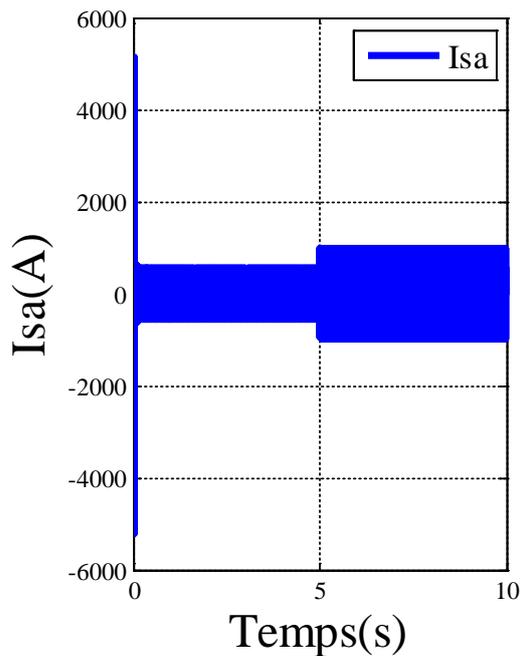


Figure IV.12 Courant statorique.

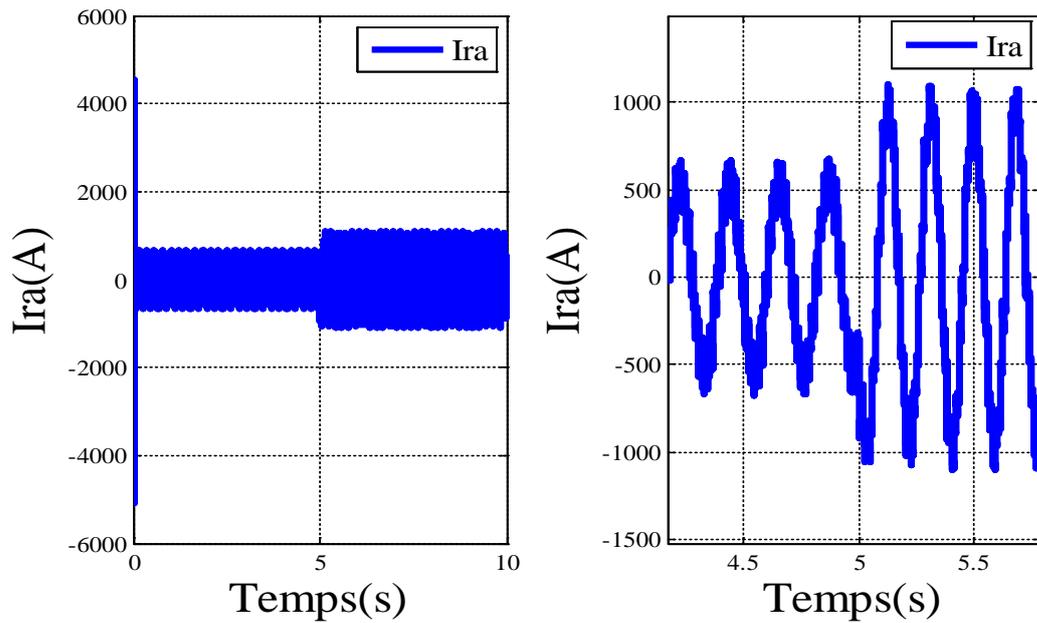


Figure IV.13 Courant rotorique.

La Figure IV.14 présente la forme de la tension du bus continu; La référence de cette dernière est réglée à 1200 V, la tension mesurée suit parfaitement la tension de référence à l'exception des conditions initiales où la boucle de régulation de tension n'a pas assez de temps pour réagir, à l'instant $t=5$ s une variation de la tension V_{dc} due au passage du mode hypo synchrone au mode hyper synchrone et la valeur instantanée de V_{dc} reste tout à fait constante aux variations de la vitesse du vent.

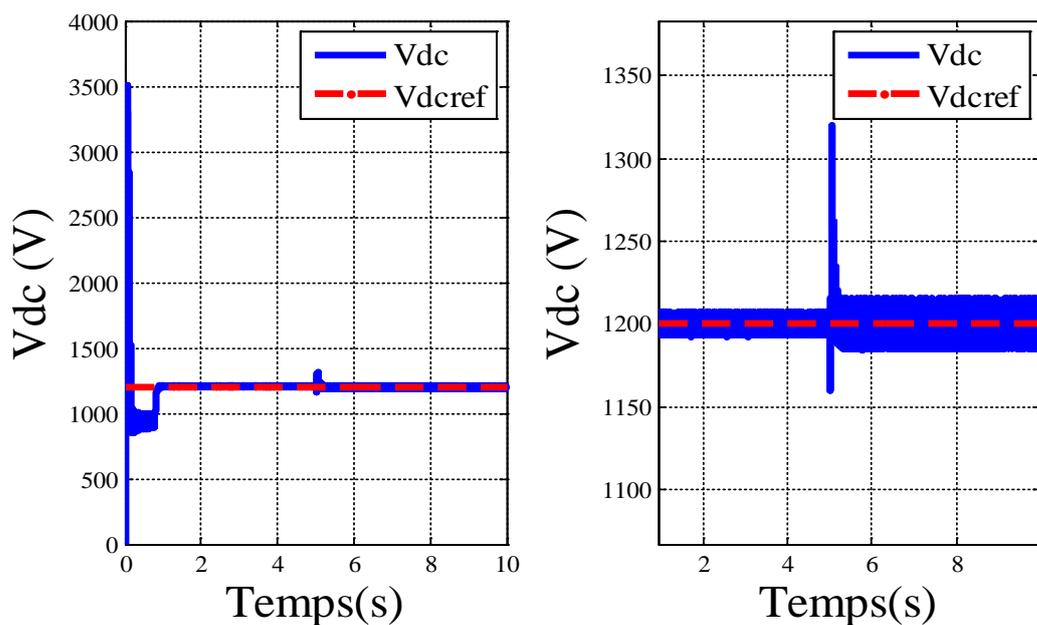


Figure IV.14 Tension du bus continu.

Les Figures IV.15 et IV.16 montrent que les puissances instantanées active et réactive délivrées au réseau suivent bien leurs références. La puissance instantanée réactive est maintenue à zéro pour avoir un facteur de puissance unitaire côté réseau, et à partir de la Figure IV.15 on peut constater que la puissance active à l'instant $t=5s$ passe d'une valeur positive ($P_g > 0$) à une valeur négative ($P_g < 0$), ce qui signifie le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper- synchrone. En analysant que la commande DPC, on constate une bonne dynamique du système et une conservation de la robustesse.

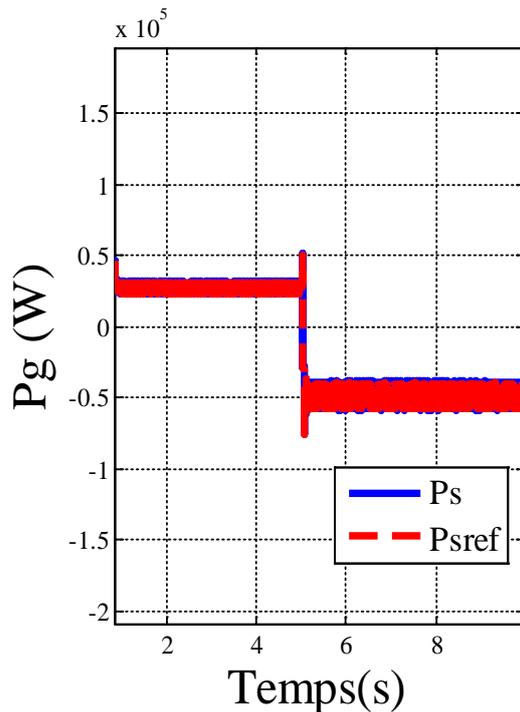


Figure IV.15 Puissance active côté réseau.

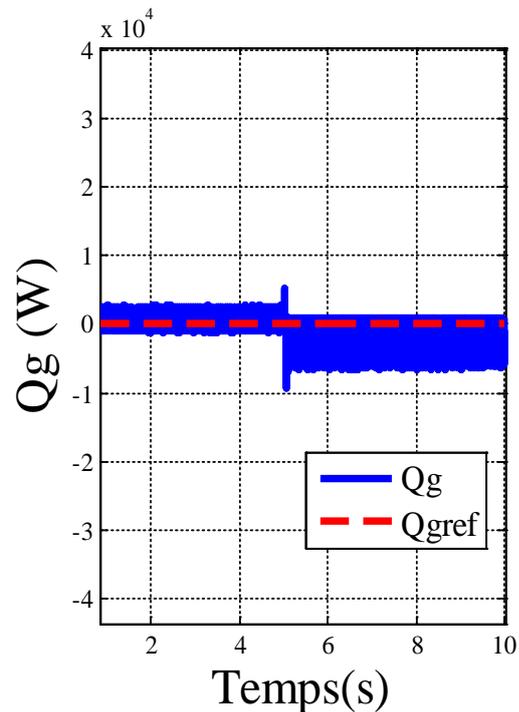


Figure IV.16 Puissance réactive côté réseau.

Les Figures IV.17 et IV.18 présentent l'évolution de la forme de la tension du réseau et du courant du filtre durant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone, de la Figure IV.18 on peut remarquer pendant l'instant ($t = 1s$ à $5s$) que le courant du filtre et la tension du réseau sont en phase, ce qui explique que la MADA absorbe une puissance active du réseau (mode hypo-synchrone), et de l'instant ($t= 5s$ à $10s$). On peut remarquer que le courant du filtre et la tension du réseau sont en opposition de phase, ce qu'explique que la MADA fournit également de la puissance active au réseau (mode hyper-synchrone).

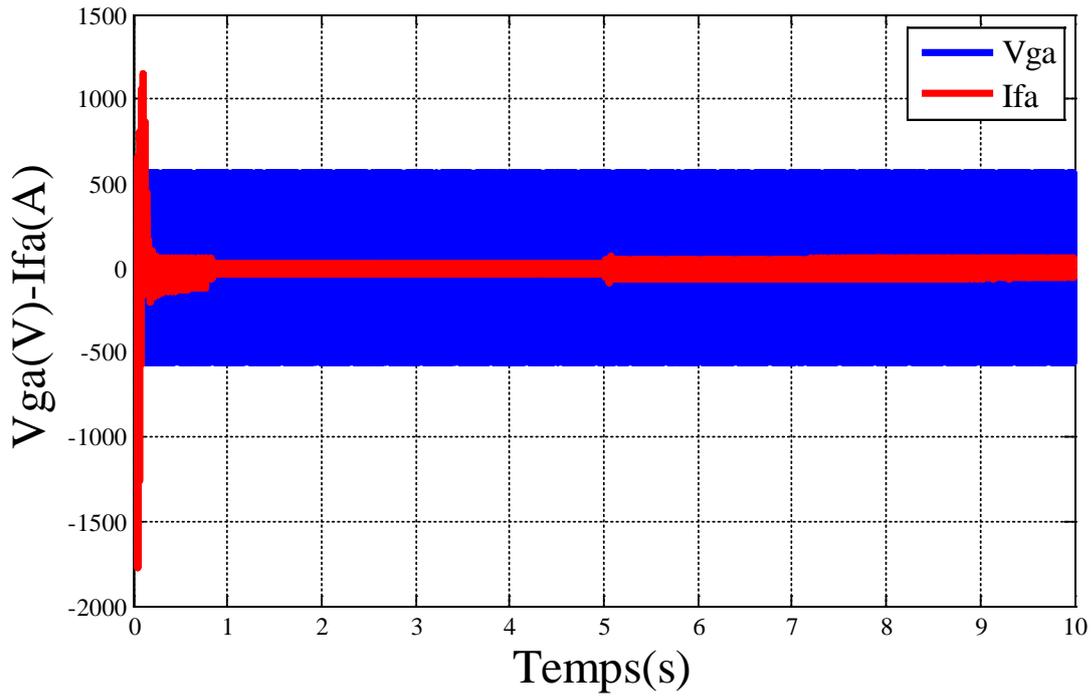


Figure IV.17 Tension du réseau et courant du filtre.

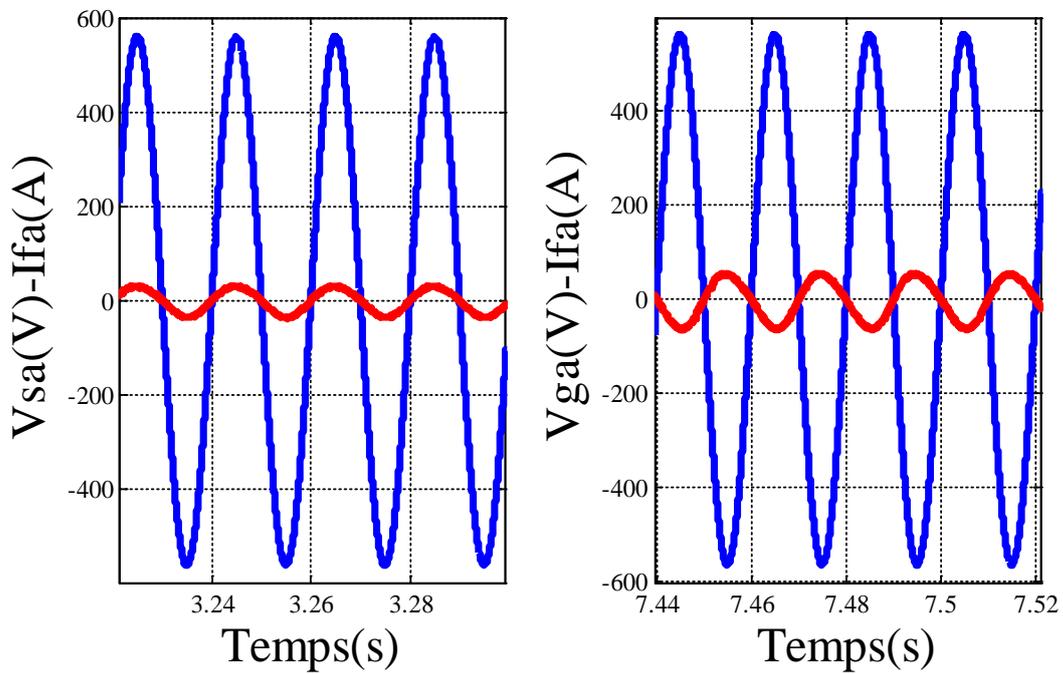


Figure IV.18 Zoom de la tension du réseau et le courant du filtre pour les deux modes hypo synchrone et hyper synchrone.

IV.7 Combinaison entre la commande vectorielle et la DPC

L'objectif de ce paragraphe est de proposer une méthode qui consiste à combiner entre la commande vectorielle de puissance (CV) et la commande directe de puissance (DPC) afin de profiter des avantages de ces méthodes. Cependant, la méthode VC-DPC est proposée pour la commande du CCM pour un système éolien à base de la MADA.

IV.7.1 Les analogies mathématiques entre CV et DPC

Dans la CV, la tension statorique est constante, les expressions des puissances statoriques active et réactive données par les équations (III.24) et (III.27) indique que la variation de la puissance statorique active est proportionnelle à la négative de la variation du courant rotorique quadrature et la variation de la puissance statorique réactive est proportionnelle à la négative variation du courant rotorique direct [32], [104] :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \Rightarrow \Delta P_s \propto -\Delta I_{rq} \quad (IV.29)$$

$$Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \Rightarrow \Delta Q_s \propto -\Delta I_{rd} \quad (IV.30)$$

D'autre part, on considère selon le principe de la DPC et d'après les équations (IV.10) et (IV.11) on peut constater que la variation de la puissance statorique active est proportionnelle à la négative de la variation de la composante du flux rotorique $|\varphi_r^r| \sin \theta_\varphi$ noté φ_T et la puissance statorique réactive est proportionnelle à la négative de la variation de la composante du flux rotorique $|\varphi_r^r| \cos \theta_\varphi$ noté φ_F , donc on peut écrire [32], [104] :

$$P_s = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| |\varphi_r^r| \sin \theta_\varphi \Rightarrow \Delta P_s \propto -\Delta \varphi_T \quad (IV.31)$$

$$Q_s = \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\varphi_s^r| \left(|\varphi_s^r| - \frac{M}{L_r} |\varphi_r^r| \cos \theta_\varphi \right) \Rightarrow \Delta Q_s \propto -\Delta \varphi_F \quad (IV.32)$$

En comparant les équations (IV.31) et (IV.32) avec les équations (IV.29) et (IV.30), nous obtenons les équations suivantes [32] :

$$\Delta \varphi_T \propto \Delta I_{rq} \quad (IV.33)$$

$$\Delta \varphi_F \propto \Delta I_{rd} \quad (IV.34)$$

Chapitre IV Commande directe de puissance (DPC) d'une chaîne de conversion

Cela signifie que les variations des composantes du flux rotorique ϕ_T et ϕ_F pour la technique DPC sont proportionnelles aux variations des composantes des courants rotoriques quadrature et direct dans le CV, respectivement. Par conséquent, il existe une analogie évidente entre les deux méthodes CV et DPC, de sorte que deux variables perpendiculaires sont responsables de la commande séparée des puissances statorique active et réactive.

IV.7.2 Principe de la méthode proposée (CV-DPC)

Nous avons montré dans le paragraphe précédent, qu'il existe une relation directe entre la commande de la puissance statorique active dans la DPC et la commande du courant rotorique quadrature dans CV. D'une autre part, la commande de la puissance statorique réactive dans la DPC correspond au courant rotorique direct dans CV. En raison de ces faits, il est possible de proposer un système de commande basé sur les bases fondamentales communes entre les deux méthodes en combinant entre DPC et CV [32].

Le système de commande proposé est illustré sur la Figure IV.19, est divisé en deux parties une première partie CV, et une autre partie DPC qui sont indiqués sur le côté gauche et le côté droit de la figure, respectivement. Comme montre la Figure IV.19, le système utilise les contrôleurs des courants rotoriques quadrature et direct identiques à ceux dans CV et la table de commutation comme celle de DPC. Les commandes des courants rotoriques quadrature et direct sont générés par les régulateurs PI et comparés avec leurs valeurs mesurées. Les signaux d'erreur à la sortie des comparateurs à d'hystérésis des courants rotoriques quadrature et direct sont les entrées de la table de commutation. La troisième entrée de la table de commutation détermine le secteur à travers lequel le vecteur de flux rotorique passe. La table de commutation fournit les vecteurs de tension appropriés en sélectionnant l'état des commutateurs du convertisseur de puissance, de même que dans la DPC (Tableau IV.1), qui produit les huit vecteurs de tension y compris les tensions nulles [32].

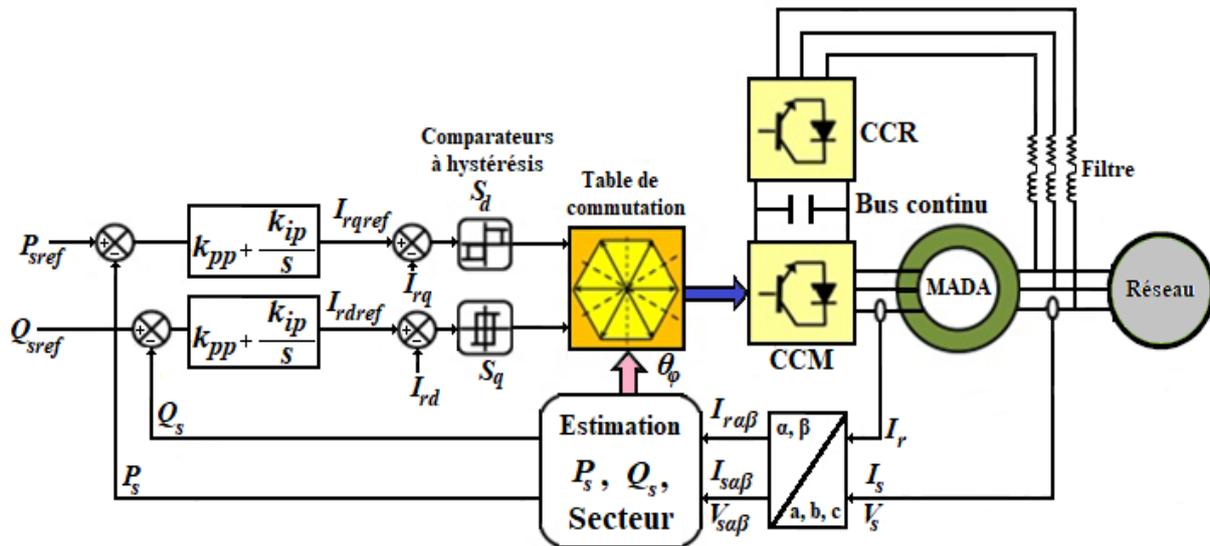


Figure IV.19 Schéma synoptique de la commande proposé (CV-DPC) pour le CCM.

IV.8 Résultats de simulation et discussions

Les résultats de simulation ont été effectués avec le logiciel Matlab/Simulink dont les paramètres de la chaîne de conversion sont donnés dans l'Annexe A pour comparer la performance de la technique VC-DPC proposée avec CV et DPC, pour cela nous avons réalisé des simulations pour deux parties.

Pour la première partie nous appliquons un profil de vent d'une vitesse constante égale à 12 m/s comme illustre la Figure IV.20.

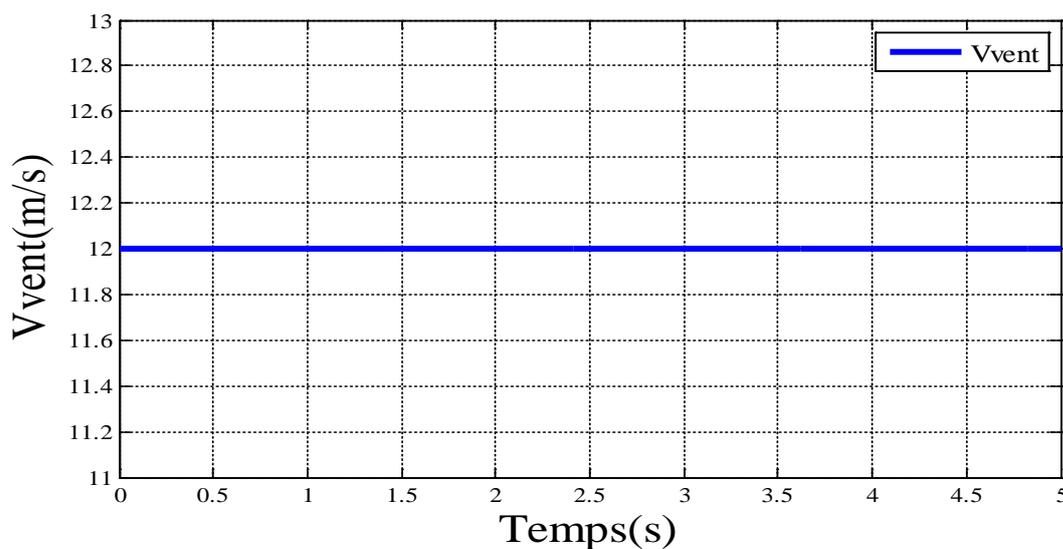


Figure IV.20 Profil de la vitesse du vent.

La Figure IV.21 montre la vitesse de référence et les vitesses mesurées de rotation de la MADA pour les trois techniques de commande (CV, DPC, CV-DPC), ces vitesses ont une valeur de 1814 tr/min, ce que signifie que la MADA tourne à une vitesse en mode hyper synchrone.

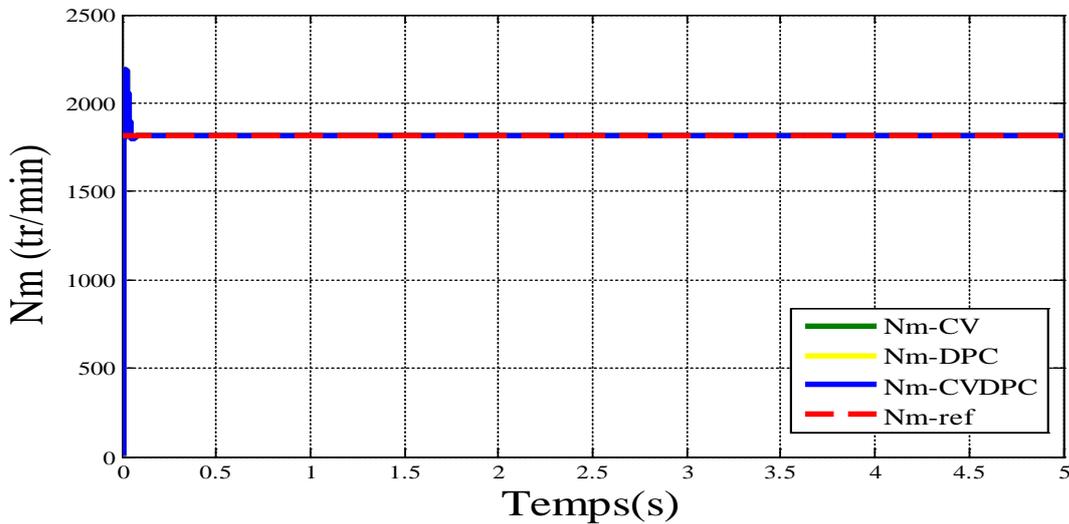


Figure IV.21 Vitesse de rotation de la MADA.

La Figure IV.22 et IV.23 montrent la puissance statorique active mesurée pour les trois commandes, et sa référence, on peut constater que la CV-DPC et la CV ont des ondulations de puissance inférieure, de d'autre part on peut dire que la DPC une ondulation nettement supérieure aux autres techniques (CV, CV-DPC).

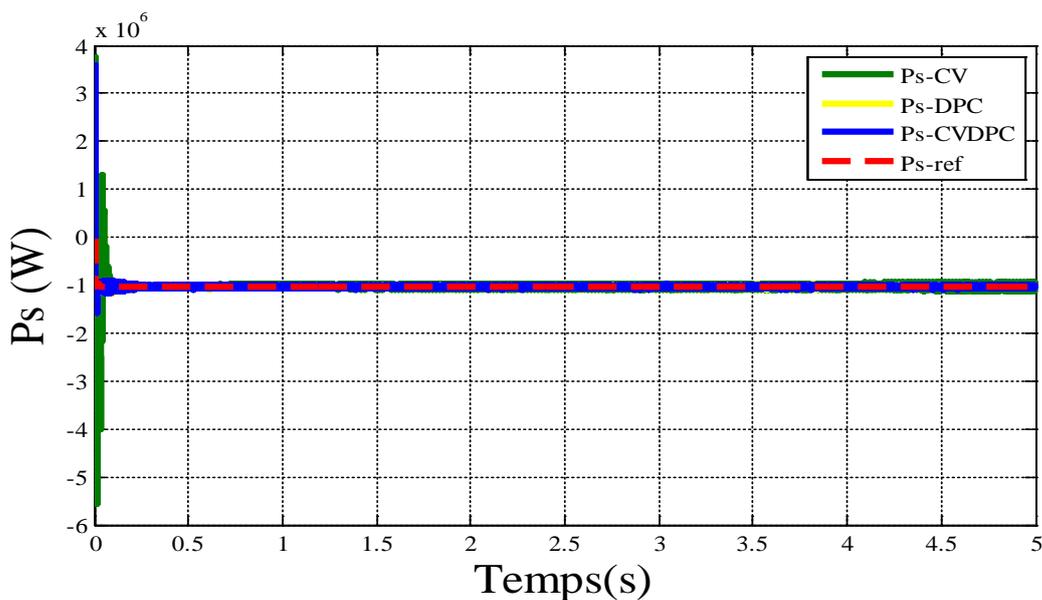


Figure IV.22 Puissance statorique active.

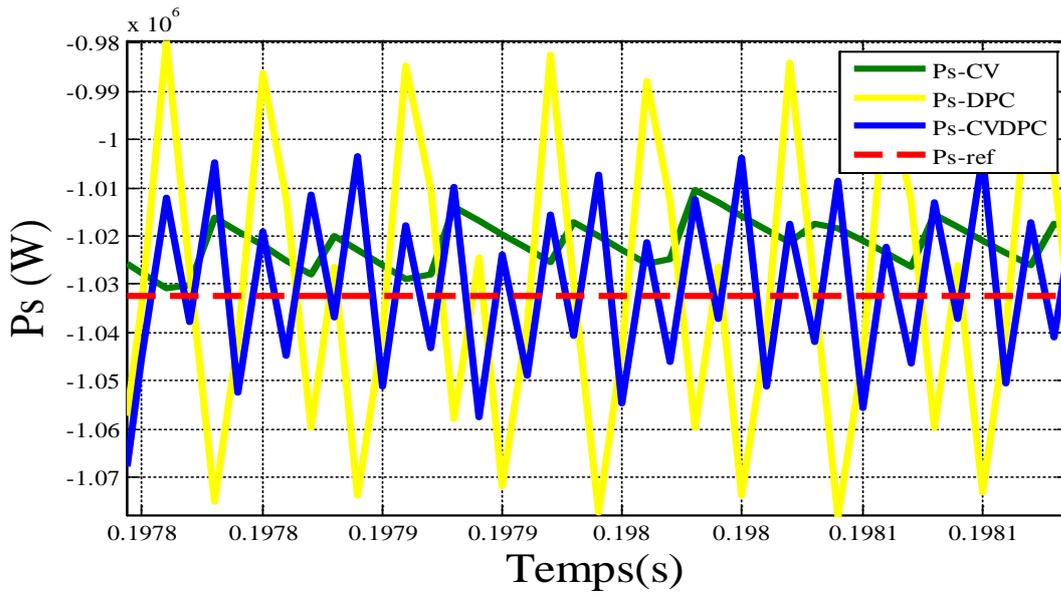


Figure IV.23 Zoom de la puissance statorique active.

La Figure IV.24 montre le courant statorique de la première phase pour les différentes techniques étudiées, on peut remarquer que les trois sont sinusoïdaux et presque identiques.

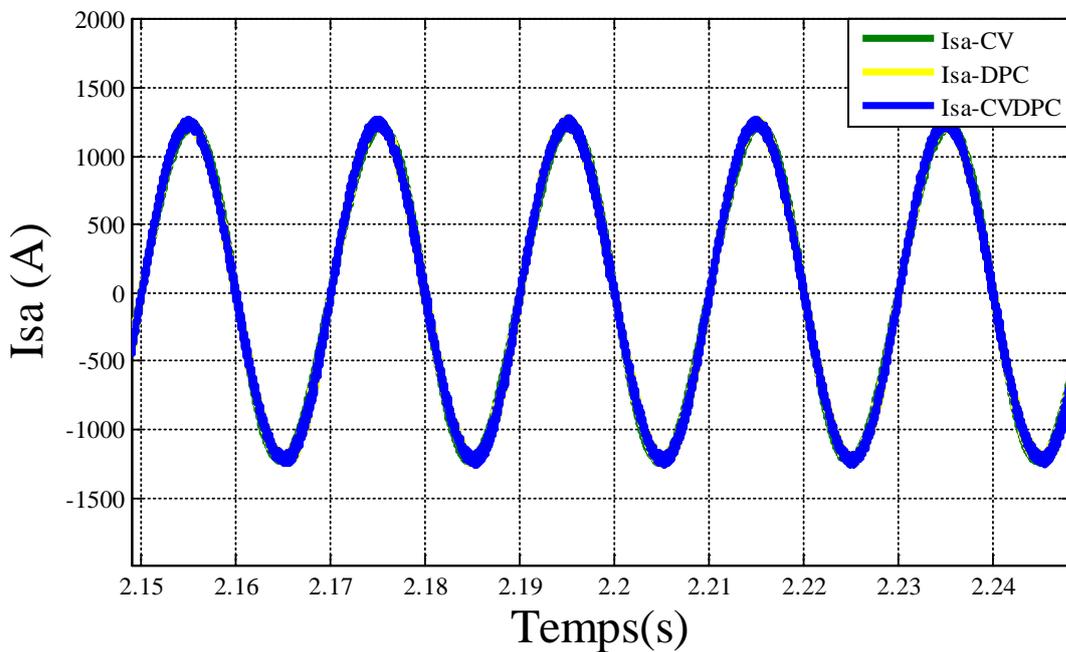


Figure IV.24 Courant statorique.

Dans la deuxième partie nous appliquons un profil de vent d'une vitesse variable comme le montre la Figure IV.25, dont la vitesse de vent passe de 12 m/s à 9 m/s, ce qui correspond à

une vitesse de rotation de la MADA qui passe d'une valeur de 1814 tr/min en mode hyper synchrone à une valeur de 1360 tr/min en mode hypo synchrone (Figure IV.26).

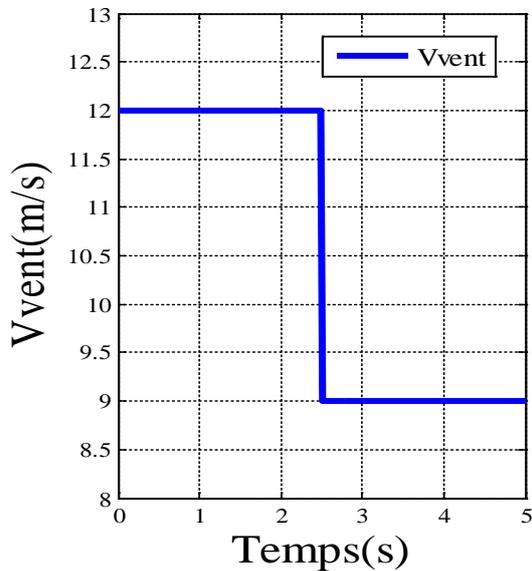


Figure IV.25 Profil du vent

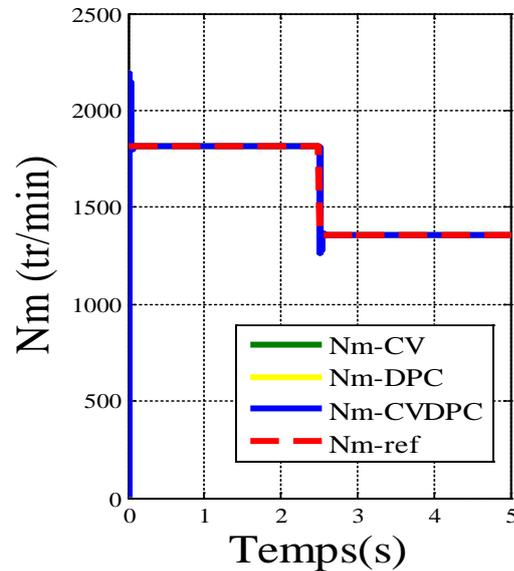


Figure IV.26 Vitesse de rotation de la MADA

La Figure IV.27 montre la puissance statorique active qui diminue d'une valeur environ de 1 MW en mode hyper synchrone à 0.4 MW en mode hypo synchrone, on peut conclure que la technique CV-DPC répond aux variations de vitesse du vent aussi rapide que celle de la CV. Cette dernière a une meilleure performance par rapport à la CV en termes de réponse dynamique.

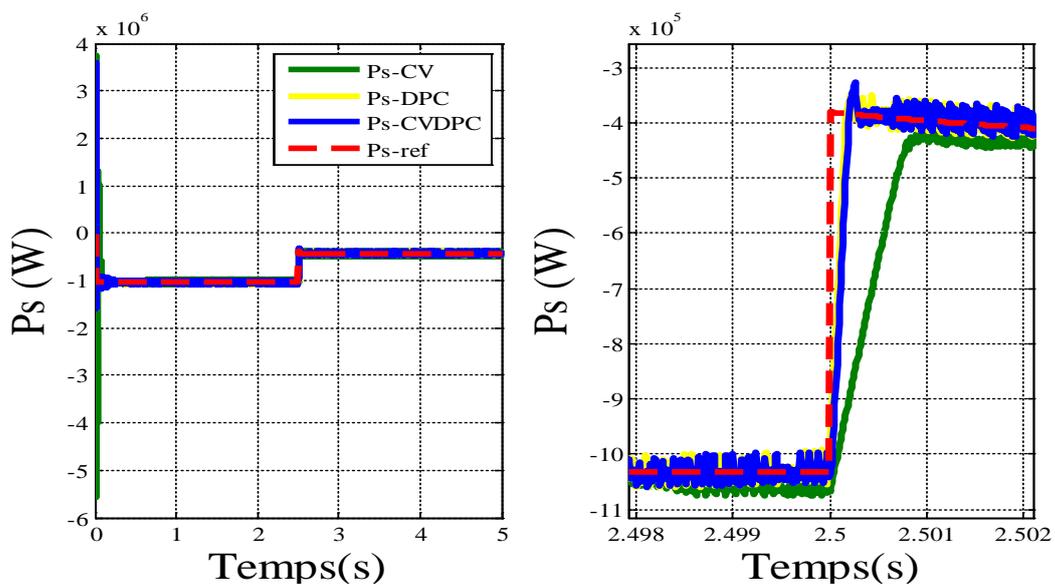


Figure IV.27 Puissance statorique active.

Afin de comparer la robustesse de la technique CV-DPC par rapport à la CV, les valeurs des paramètres ont été changées comme suit: R_r (+50%), L_s (+20%), L_r (+20%) et M (+20%), Les variations de (R_r , L_s , L_r et M) ont été testées et représentées par les Figures IV.28 et IV.29.

Les Figures IV.28 et IV.29 montrent la puissance statorique active qui diminue d'une valeur environ de 1 MW en mode hyper synchrone au 0.4 MW en mode hypo synchrone, on peut conclure que la performance de la CV est très dégradée et le système devient même instable. Pour résumer, la CV-DPC montre des bonnes performances en termes de temps de réponse et dépassement et plus robuste par rapport à la CV.

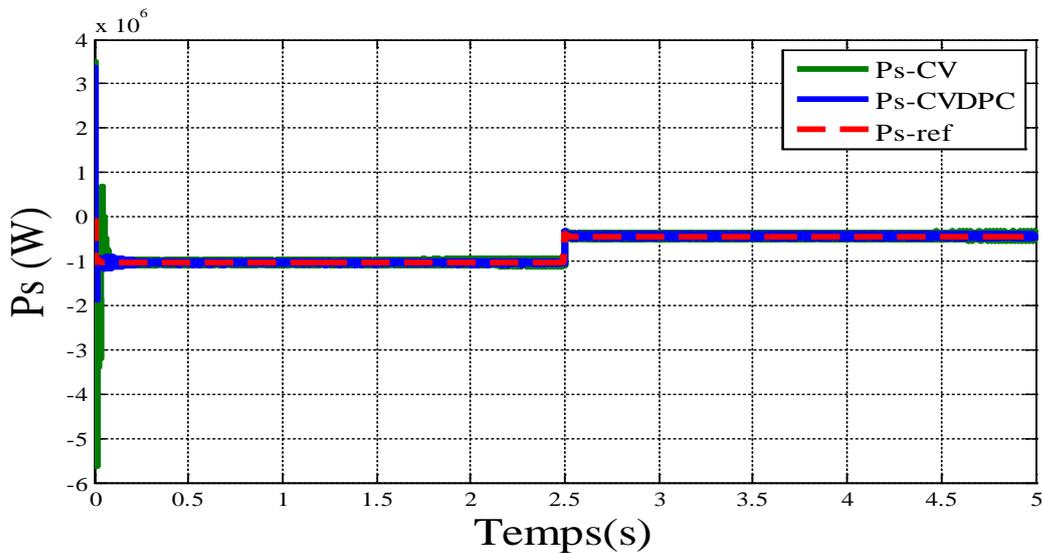


Figure IV.28 Puissance statorique active.

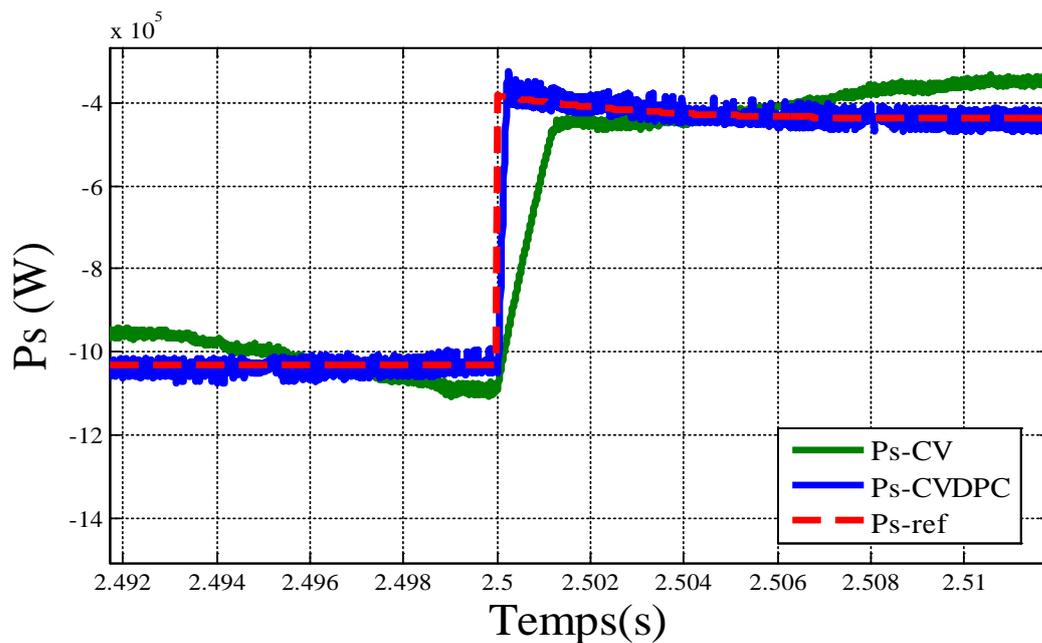


Figure IV.29 Zoom de la puissance statorique active.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit dans une première partie la stratégie de commande directe de la puissance active et réactive (DPC) du système éolien à base de la MADA de 1.5 MW.

Nous avons présenté en détail la commande directe de puissance pour le CCM, et avec un rappel pour la technique MPPT avec asservissement de vitesse par l'utilisation d'un régulateur IP, et la commande directe de puissance pour le CCR qui sont développés déjà dans le chapitre III. Nous avons présenté et analysé les résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne complète à l'aide de logiciel Matlab/Simulink pour un profil du vent avec deux vitesses du vent l'un en mode hypo synchrone et l'autre en hyper synchrone pour valider ces commandes. Les résultats de simulation montrent des bonnes performances et assurent la commande séparée de la puissance statorique active et la puissance statorique réactive.

Pour la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté en détail une technique de commande qui consiste à combiner entre la commande vectorielle de puissance et la DPC pour le CCM nommé la CV-DPC, puis nous avons fait des séries de simulation à l'aide de logiciel Matlab/Simulink pour comparer la CV-DPC au CV et DPC, les résultats de simulation montrent que cette technique donne moins d'ondulation que la DPC et d'autre part la CV-DPC donne des bonnes performances aux variations de la vitesse du vent et plus de robustesse aux variations des paramètres de la MADA par rapport à la CV.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont pour but d'étudier les stratégies de commande des systèmes de conversion éolienne basés sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA), quelques techniques de commande à savoir la technique MPPT, la commande vectorielle indirecte classique (CV) basée sur l'orientation du flux, la commande directe de puissance (DPC) et la méthode proposée qui consiste à combiner entre la CV et la DPC.

La première partie de ce manuscrit a été consacrée à des rappels sur l'énergie éolienne avec la présentation des chiffres sur la situation dans le monde, les avantages et les inconvénients, les chaînes de conversion éoliennes via les différents types de machines parmi lesquelles la MADA, a été choisie pour notre étude. Les convertisseurs statiques et une synthèse sur l'évaluation des techniques de commande des systèmes éoliens à base de la MADA.

Dans une deuxième partie les différentes parties de la chaîne sont modélisées, le modèle du vent, le modèle aérodynamique, le modèle mécanique de la turbine, le modèle dans le repère de Park de la MADA avec des résultats de simulation qui nous ont permis de valider ce modèle et le modèle de connexion de CCR au réseau électrique via un filtre.

La troisième partie, étant la commande de la chaîne de conversion à base de la MADA avec l'application de trois commandes telle que, la MPPT avec asservissement de vitesse assuré par un régulateur PI, la commande vectorielle (CV) des puissances statoriques active et réactive basée sur l'orientation du flux statorique et la DPC pour la commande du CCR. Les résultats de simulations présentés et discutés pour le mode hypo-synchrone, on peut dire que la CV présente moins d'ondulations comme avantage, mais elle a quelques inconvénients tels que la dépendance aux variations des paramètres de la MADA à cause du couplage. Les coefficients des régulateurs PI doivent être optimisés pour assurer la stabilité du système.

La quatrième partie, deux méthodes de commande pour le CCM sont abordées, dans la première partie du chapitre, l'application de la DPC pour le CCM et avec aussi la DPC pour le CCR et la MPPT avec asservissement de vitesse assuré par un régulateur IP. Les résultats de simulation sont présentés et discutés pour les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone. On peut dire que les principaux avantages de la DPC sont une réponse dynamique rapide, une robustesse aux variations des paramètres de la MADA, et un temps de calcul

réduit, et enfin une mise en œuvre simple. Cependant, elles ont quelques inconvénients y compris les ondulations de puissance importantes dues à la bande des comparateurs d'hystérésis et à des fréquences variables de commutation des convertisseurs de puissances.

Pour surmonter et surpasser les inconvénients cités, nous proposons une technique de commande consistant à combiner entre la CV et la DPC afin de profiter des avantages et éviter les difficultés de l'une ou l'autre des deux techniques (CV, DPC), la technique CV-DPC proposée présente cependant plusieurs avantages par rapport à la CV, tels que la réponse dynamique rapide, la robustesse aux variations paramétriques et une implantation simple. D'autre part elle comporte des avantages par rapport la à DPC tels que moins d'ondulations de la puissance.

Les perspectives proposées à la suite de notre étude peuvent être récapitulées :

- ✓ Les validations et les réalisations expérimentales des techniques de commande utilisées dans le cadre de cette thèse,
- ✓ L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux surtout pour les applications des fortes puissances (MW) dans une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA,
- ✓ L'étude d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA en mode autonome (isolé) pour surmonter des problèmes d'absence de tension du réseau, en cas de défaillance du réseau ou l'alimentation de l'électricité d'une zone éloignée du réseau.

Bibliographie

- [1] K. Dahech, M. Allouche, T. Damak, and F. Tadeo, Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a photovoltaic system, *Electric Power Systems Research* 143 (2017) 182–188.
- [2] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse École Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [3] A. Yousefi-Talouki, E. Pouresmaeil, B.N Jorgensen, “Active and reactive power ripple minimization in direct power control of matrix converter-fed DFIG,” *Electrical Power and Energy Systems* 63 (2014) 600–608.
- [4] B. Beltran, al. Sliding, “Mode power control of variable speed wind energy conversion systems,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, N^o. 2, pp. 551-558, 2008.
- [5] M. Mohseni, S. Islam, and M. A. S. Masoum, “Enhanced hysteresis-based current regulators in vector control of DFIG wind turbines,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 223–234, Jan. 2011.
- [6] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, "Power conversion and control of wind energy systems, " John Wiley & Sons, pp. 50 – 72, 2011.
- [7] E.G. Shehata, Gerges M. Salama, “Direct power control of DFIGs based wind energy generation systems under distorted grid voltage conditions,” *Electrical Power and Energy Systems* 53 (2013) 956–966.
- [8] V.N. Pande, U.M. Mate, Shailaja Kurode, “Discrete sliding mode control strategy for direct real and reactive power regulation of wind driven DFIG,” *Electric Power Systems Research* 100 (2013) 73– 81.
- [9] V Yaramasu, B Wu, "Model Predictive Control Of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons, pp. 35-41
- [10] Guide pratique énergie éolienne édition, Novembre 2015, ISBN 979-10-297-0130-6, Ce guide vous est fourni par : L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).
- [11] Site internet : <http://www.energies-renouvelables.org> (Dernier accès 2018).
- [12] V Qu Binh Ngo, «Algorithmes de conception de lois de commande prédictives pour les systèmes de production d'énergie», Thèse de doctorat de L'Université Paris-Saclay Préparée à Centrale Sup élec Ecole Doctorale N 580, NNT : 2017SACL031.
- [13] Global wind power statistics 2015. Technical report, Global wind energy council, 2015.
- [14] Site internet: Global wind energy council, 2016. <http://gwec.net/> (Dernier accès 2018)
- [15] Global wind energy outlook 2014. Technical report, Global wind energy council, 2014.

- [16] K Ma, L Tutelea, I Boldea, Dan M. Ionel, and F Blaabjerg, «Power Electronic Drives, Controls, and Electric Generators for Large Wind Turbines-An Overview», *Electric Power Components and Systems*, 43(12):1406–1421, 2015.
- [17] F Blaabjerg, M Liserre, and K Ma, «Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems», *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 48(2):708–719, Mar 2012.
- [18] Mohamed Terkmani, «Quelle place pour l'énergie éolienne en Algérie?», <https://www.liberte-algerie.com/dossier-economique/quelle-place-pour-lenergie-eolienne-en-algerie-259343>, le 27-11-2016 (Dernier accès 2018).
- [19] T. Ghennam, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», Thèse Doctorat Délivre Conjointement par L'Ecole Centrale de Lille et L'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, N° d'ordre: 162/2012.
- [20] Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables - CDER, <http://portail.cder.dz/spip.php?article4321> (Dernier accès 2018).
- [21] F Blaabjerg, K Ma, «Wind Energy Systems», *Proceedings of the IEEE*, Volume: 105, Issue: 11, pp. 2116 - 2131 Nov. 2017.
- [22] H. CAMBLONG, Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, Thèse N°2003-22 (2003), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, France.
- [23] A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.
- [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 1, France, 2010.
- [25] 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, Nancy 1, France, 2006.
- [26] F. Poitiers, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [27] M. Kassa Idjdarene, «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes», Thèse

- de doctorat, Université Abderrahmane MIRA – Bejaïa, Algérie et Université Lille 1, France, 2010, N° d'ordre : 40283/2010.
- [28] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007, N° d'ordre : 2519/2007.
- [29] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, L'Ecole Centrale de Lille, France, 2004, N° d'ordre : 4/2004.
- [30] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007, N°d'ordre : 4066.
- [31] S Mahmodicherati, «Direct Power Control of A Doubly Fed Induction Generator in Wind Power Systems », Thèse de doctorat, La faculté des études supérieures de l'Université d'Akron, États-Unis, 2016, ProQuest Number: 10307261.
- [32] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, E. Daryabeigi, «A combined vector and direct power control for DFIG-based wind turbines», IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 29, N° .3, pp. 767–75, 2014.
- [33] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, «Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation», Proceedings Electric Power Applications, Vol. 143, N°. 3, pp. 231–241, May 1996.
- [34] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, «Doubly fed induction generator systems for wind turbines», IEEE Industrial Application Magazine, vol. 17, no. 1, pp. 26–33, May/June 2002.
- [35] F. K. A. Lima, A. Luna, P. Rodriguez, E. H. Watanabe, and F. Blaabjerg, “Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults,” IEEE Transactions Power Electron., vol. 25, no. 1, pp. 118–130, Jan. 2010.
- [36] W. Chen, D. Xu, N. Zhu, M. Chen, F. Blaabjerg, «Control of doubly-fed induction generator to ride-through recurring grid faults», IEEE Transactions Power Electronics, Vol. 31, N°. 7, pp. 4831–4846, Jul. 2016.
- [37] D. Santos-Martin, J. L. Rodriguez-Amenedo, S. Arnaltes, «Providing ride-through capability to a doubly fed induction generator under unbalanced voltage dips», IEEE Transactions Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1747–1757, Jul. 2009.

- [38] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, «Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2776–2798, July 2013.
- [39] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, J. Rodriguez, «Overview of multi-MW wind turbines and wind parks», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, Apr. 2011.
- [40] G. Salloum, «Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, l’institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007, N° d’ordre : 2457.
- [41] S. Khojet El Khil, «Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse et Ecole Nationale d’ingénieurs de Tunis, 2006.
- [42] Y. Tang, L. Xu, «A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System», *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 472-478, July 1995.
- [43] S. El Aimani, «Practical Identification of a DFIG based Wind Generator Model for Grid Assessment», *IEEE Xplore International Conference on Multimedia Computing and Systems ICMCS '09*, 2-4 April 2009.
- [44] L. Peng, «Reconfiguration du dispositif de commande d’une éolienne en cas de creux de tension», Thèse de doctorat, l’Ecole Centrale de Lille, juin 2010, N° d’ordre : 122.
- [45] Z. Chen, J.M. Guerrero, F. Blaabjerg, “A review of the state of the art of power electronics for wind turbines”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859-1875, 2009.
- [46] J.A. Baroudi, V. Dinavahi, A.M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators”, *IEEE Int. Conf. Elec. Machine and Dr*, pp. 458-46, 2005.
- [47] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004.
- [48] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, “A review of the state of the art of power electronics for wind turbines,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, Aug. 2009.
- [49] F. Blaabjerg, K. Ma, “Future on power electronics for wind turbine systems,” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sep. 2013.

- [50] J. Rodriguez, S. Bernet, Wu Bin, J. O. Pontt, S. Kouro, "Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.
- [51] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, J. I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 57, No. 8, pp. 2553 – 2580, 2010.
- [52] S. Heier, "Grid integration of wind energy: Onshore and Offshore Conversion Systems," John Wiley & Sons, pp.119 – 187, 2014.
- [53] L.H. Hansen, P.H. Madsen, F. Blaabjerg, H.C. Christensen, U. Lindhard, K. Eskildsen, "Generators and power electronics technology for wind turbines," In *Proceedings of IECON '01, Vol. 3, pp. 2000–2005*, 2001.
- [54] G. Abad, J. Lopez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski, "Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [55] L Xu, P Cartwright. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3):750–758, Sept 2006.
- [56] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(5):691–703, Oct 1998.
- [57] M. Malinowski, M.P. Kazmierkowski, A. Trzynadlowski, "Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers", *Mathematics and Computers in Simulation* 63 (2003) 349–361.
- [58] J. A. Santisteban and R. M. Stephan, "Vector control methods for induction machines: An overview," *IEEE Transactions Education.*, vol. 44, no. 2, pp. 170– 175, May 2001.
- [59] B. Hopfensperger, D. Atkinson, and R. A. Lakin, "Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder," *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol. 146, No. 6, pp. 597–605, Nov. 1999.
- [60] S. Pererada, A. Tilli, et A. Tonielli, "Indirect stator flux-oriented output feedback control of a doubly fed induction machine," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 875–887, Nov. 2003.

- [61] H. Akagi, H. Sato, «Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system," IEEE Transactions Power Electronics, vol. 17, no. 1, pp. 109–116, Jan. 2002.
- [62] M. G. Simoes, B.K. Bose, Ronald J. Spiegel, "Design and performance evaluation of a fuzzy logic-based variable-speed wind generation system," In IEEE Transactions on Industry Applications , vol.33, no.4, pp.956–965, Jul/Aug 1997.
- [63] K. Belmokhtar, M. L. Doumbia, K. Agbossou. Modelling and fuzzy logic control of DFIG based Wind Energy Conversion Systems. In 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pages 1888–1893, May 2012.
- [64] Wang Jialong; Hyun Seung Ho, "ANN based pitch angle controller for variable speed variable pitch wind turbine generation system," In Strategic Technology (IFOST), 2011 6th International Forum on , vol. 1, pp. 443-447, 22-24 Aug. 2011.
- [65] S. Li, M. Fairbank, C. Johnson, D. C. Wunsch, E. Alonso, and J. L. Proao. Artificial Neural Networks for Control of a Grid-Connected Rectifier/Inverter Under Disturbance, Dynamic and Power Converter Switching Conditions. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 25(4):738–750, Apr 2014.
- [66] Baohua Dong, S. Asgarpour, Wei Qiao, ANN-based adaptive PI control for wind turbine with doubly fed induction generator. In 2011 North American Power Symposium, pages 1–6, Aug 2011.
- [67] S. Mohagheghi, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, Optimal Neuro-Fuzzy External Controller for a STATCOM in the 12-Bus Benchmark Power System. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(4):2548–2558, Oct 2007.
- [68] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 820–827, 1986.
- [69] S. Arnalte, J. C. Burgos, J. L. Rodríguez-Amenedo, "Direct torque control of a doubly-fed induction generator for variable speed wind turbines," Electric Power Components and Systems, vol. 30, no. 2, pp. 199–216, 2002.
- [70] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi, .Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors., IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, May/June 1998.
- [71] M. Malinowski, M.P. Kazmierkowski, S. Hansen, F. Blaabjerg, G.D. Marques, "Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 4, pp.1019–1027, Jul/Aug 2001.

- [72] R. Datta, and V.T. Ranganathan, "Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 3, pp.390–399, May 2001.
- [73] D. Zhi, L. Xu, and B.W. Williams, "Improved direct power control of grid-connected dc/ac converters," *IEEE Transactions on Power Electronics* , vol. 24, no. 5, pp. 1280–1292, May 2009.
- [74] M. Malinowski, M. Jasinski, and M.P. Kazmierkowski, "Simple direct power control of three-Phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM)," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 447–454, 2004.
- [75] M.V. Kazemi, A.S. Yazdankhah, H.M. Kojabadi, "Direct power control of DFIG based on discrete space vector modulation," *Journal of Renewable Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1033–1042, 2010.
- [76] A.L. Sergio, R. Angel, O. Estanis, "Predictive control strategy for DC/AC converters based on direct power control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 1261–1271, 2007.
- [77] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, J. Rodriguez. Predictive Control in Power Electronics and Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12):4312–4324, Dec 2008.
- [78] D. Zhi, L. Xu, B.W. Williams, "Model-based predictive direct power control of doubly Fed induction generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 341–351, Feb. 2010.
- [79] J. Hu, L. Shang, Y. He, and Z. Q. Zhu. Direct Active and Reactive Power Regulation of Grid-Connected DC/AC Converters Using Sliding Mode Control Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(1):210–222, January 2011.
- [80] J. Hu, H. Nian, B. Hu, Y. He, and Z. Q. Zhu. Direct Active and Reactive Power Regulation of DFIG Using Sliding-Mode Control Approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4):1028–1039, December 2010.
- [81] P. Mutschler, R. Hoffmann, "Comparison of wind turbines regarding their energy generation," In 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, pp. 6–11, Australia, 23–27 June, 2002.
- [82] M.V. Kazemi, M. Moradi, R.V. Kazemi, "Minimization of powers ripple of direct power controlled DFIG by fuzzy controller and improved discrete space vector modulation," *Electical Power System*, vol. 89, pp. 23-30, 2012.

- [83] R. D. Shukla, R. K. Tripathi, "A novel voltage and frequency controller for standalone DFIG based wind energy conversion system," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 37, pp. 69–89, 2014.
- [84] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators", *Renewable Energy*, Vol. 32, N°. 14, pp. 2369- 2385, November 2007.
- [85] T Ghennam, K Aliouane, F Akel, B Francois, E.M. Berkouk, "Advanced control system of DFIG based wind generators for reactive power production and integration in a wind farm dispatching," *Energy Conversion and Management*. 2015; 105: 240–250.
- [86] Y. Liu, J. Wang, "A large time scale wind velocity simulation method," in *Computer Design and Applications (ICCD)*, 2010 International Conference on, 2010, pp. V4-282-V4-286.
- [87] B Multon, O Gergaud, H Ben Ahmed, X Roboam, S Astier, B Dakyo, C Nichita., "État de L'art dans les Aérogénérateurs Électriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », ISBN 2-912154-8-1, 2002.
- [88] M. Malinowski, *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*, Thesis (2001), Warsaw University of Technology, Poland.
- [89] **Fawzi Senani**, Abderrazak Rahab , Hocine Benalla, " Vector Control and Direct Power Control of Wind Energy Conversion System based on a DFIG," *Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE)*, May 2018; 11(1).
- [90] I. Hamzaoui, et al., "Improvement of the performances MPPT system of wind generation," in *Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, 2011 Saudi International, 2011, pp. 1-6.
- [91] H. Camblong, and al. "Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers", *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 2846-2858.
- [92] Sreekumar T, Jiji K S Comparison of Proportional-Integral (P-I) and Integral-Proportional (I-P) controllers for speed control in Vector controlled Induction Motor Drive.2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems 2012.
- [93] V.N. Pande, U.M. Mate, Shailaja Kurode, "Discrete sliding mode control strategy for direct real and reactive power regulation of wind driven DFIG," *Electric Power Systems Research* 100 (2013) 73– 81.
- [94] Armand Boyette, Philippe Poure, Shahrokh Saadate, IIDirect and indirect control or a Doubly Fed Induction Generator wind turbine including a storage unit", *IECON'06* Novembre 2006 Paris (CD rom ISBN 1-4244-0136-4).

- [95] S. Li, T. A. Haskew, K. A. Williams, and R. P. Swatloski, "Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2012.
- [96] **Fawzi Senani**, Abderrazak Rahab , Hocine Benalla, " A Complete Modeling and Control for Wind Turbine Based of a Doubly Fed Induction Generator using Direct Power Control", *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 8, No. 4, pp. 1954-1962 , December 2017.
- [97] Amaia Lopez De Heredia Bermeo, " Commandes Avancées des Systèmes dédiés A L'amélioration de la Qualite de L'énergie : De La Basse Tension A la Montée en Tension", These Doctorat de L'institut National Polytechnique de Grenoble avec le « Label Europeen », le 14 novembre 2006.
- [98] Sergio Aurtenechea Larrinaga, "Predictive Control of The 2I-VSI and 3I-NPC VSI based on Direct Power Control for MV Grid connected Power Applications", Thèse doctorat Arrasate – Mondragon (Spain) 2007.
- [99] Zhou G, Wu B et Xu D (2007) Direct power control of a multilevel inverter based active power filter. *Electr Power Syst Res* 77(3–4):284–294.
- [100] Chaoui A, Krim F, Gaubert J, Rambault L DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement. *Electr Power Energy Syst* 30:476–485, 2008.
- [101] Arjang Yousefi-Talouki , Edris Pouresmaeil , Bo Norregaard Jorgensen, "Active and reactive power ripple minimization in direct power control of matrix converter-fed DFIG ", *Electrical Power and Energy Systems* 63 (2014) 600–608.
- [102] E. Tremblay, S. Atayde, and A. Chandra. Direct power control of a DFIG-based WECS with active filter capabilities. In *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 2009 IEEE, PP 1-6.
- [103] **F. Senani**, A. Rahab, F. Louar, F. Bourourou and H. Benalla, "Active and reactive power control of DFIG using PI and DPC controllers," 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Boumerdes, Algeria, 2015, pp. 1-6.
- [104] ME Zarei, B Asaei. Combined Vector Control and Direct Power Control Methods for DFIG under Normal and Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions, 4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2013). Tehran, Iran. 2013.

Annexes

Annexe A Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une MADA [20].

Paramètres de la turbine éolienne	Puissance nominale	$P_n = 1.5 \text{ MW}$
	Rayon du rotor	$R = 35.25 \text{ m}$
	Masse volumique de l'air	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$
	Gain de multiplicateur	$G = 90$
Paramètres de la MADA	Puissance nominale	$P_n = 1.5 \text{ MW}$
	Tension nominale statorique	$V_{ns} = 400 / 690 \text{ V}$
	Courant nominal	$I_n = 1900 \text{ A}$
	Fréquence nominale statorique	$f_s = 50 \text{ Hz}$
	Résistance statorique	$R_s = 0.012 \Omega$
	Résistance rotorique	$R_r = 0.021 \Omega$
	Inductance statorique	$L_s = 0.0137 \text{ H}$
	Inductance rotorique	$L_r = 0.0136 \text{ H}$
	Inductance mutuelle	$M = 0.0135 \text{ H}$
	Inertie totale de l'arbre	$J = 1000 \text{ Kg.m}^2$
	Coefficient de frottement	$f = 0.0024$
	Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Paramètres du bus continu	Capacité du bus continu	$C = 4400 \mu\text{F}$
	Tension du bus continu	$V_{dc} = 1200 \text{ V}$
Paramètres du filtre	Résistance du filtre	$R_f = 2 \text{ m}\Omega$
	Inductance du filtre	$L_f = 5 \text{ m}\Omega$
Paramètres du réseau	Tension du réseau	$V_g = 400 / 690 \text{ V}$
	Fréquence du réseau	$f_s = 50 \text{ Hz}$

Annexe B La transformation de Park tournant

La transformation de Park tournant est obtenue avec l'utilisant des transformations Concordia permettant la conservation de la puissance ($abc-\alpha\beta$), puis une rotation ($\alpha\beta-dq$).

$$[X_{dq}] = p(-\theta) \cdot T_{32}^t [X_{abc}] \quad (\text{B.1})$$

B.1 Transformation abc - $\alpha\beta$

$$[X_{\alpha\beta}] = T_{32}^t \cdot [X_{abc}] \quad (\text{B.2})$$

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Avec :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} : \text{La matrice de Concordia conservant la puissance.}$$

B.2 Transformation $\alpha\beta - dq$

$$[X_{dq}] = p(-\theta) \cdot [X_{\alpha\beta}] \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Avec :

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} : \text{La matrice de rotation.}$$

Publications du doctorat

Conférences Internationales

- [C1] **F. Senani**, A. Rahab, F. Louar, F. Bourourou and H. Benalla, "Active and reactive power control of DFIG using PI and DPC controllers," 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Boumerdes, Algeria, 2015, pp. 1-6.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7416841/>
- [C2] **F. Senani**, A. Rahab, H. Benalla, "Modeling and Control of Active and Reactive Powers with DC-Link control for Variable Speed Wind Turbine based on DFIG," 2^{ème} Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb (CISTEM'16) 26-28 Octobre, Marrakech, Maroc, 2016.
IN CISTEM 2016 Proceedings

Reuves Internationales

- [J1] **F. Senani**, A. Rahab, H. Benalla, "Modeling and control of active and reactive powers of wind energy conversion system in variable speed based on DFIG," Revue des Energies Renouvelables Vol 18 N°4 (2015) 643 – 655.
<https://www.cder.dz/spip.php?article2610>
- [J2] **Fawzi Senani**, Abderrazak Rahab , Hocine Benalla, "A Complete Modeling and Control for Wind Turbine Based of a Doubly Fed Induction Generator using Direct Power Control," International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 8, N°. 4, pp. 1954-1962, December 2017.
<http://iaescore.com/journals/index.php/IJPEDS/article/view/10091>
- [J3] **Fawzi Senani**, Abderrazak Rahab, Hocine Benalla, "Vector Control and Direct Power Control of Wind Energy Conversion System based on a DFIG," Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE), Vol. 11, N°.1, May 2018.
<http://electroinf.uoradea.ro/index.php/volumes-2/jeee-vol-11-nr-1-may-2018.html>