

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : ZEGHLACHE Hemza

BETKA Khalid

Intitulé

**Etude Comparative Entre Différents Techniques
de Commande Appliquée sur un Système Eolien
à Vitesse Variable à Base d'une MADA**

Soutenu devant le jury composé de :

BELOUNIS Ouassila	Université M'sila	Président
ROUABHI Riyadh	Université M'sila	Encadreur
HERIZI Abdelghafour	Université M'sila	Co-Encadreur
LOUKAL Kaltoum	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018/2019



Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur. Mr **ROUABHI Riadh**, docteur à l'Université de M'SILA, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans cette thèse.*

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études et à tous les enseignants du département Génie électrique, qui ont encouragé à donner le meilleur d'eux même en j'assurant une formation aussi meilleur que possible

*Mes sincères remerciements s'adressent également à mes collègues : Mr **AMROUCHE azzeddine** et Mr **DJERIOU salim** ingénieurs au sien de sonelgaz M'Sila pour leurs conseils et leurs encouragements pour achever ce travail.*

Cette page ne serait être complète sans remercier et dédier mes meilleurs amies : A. Mefadjakh, , O. Moussa, A hellali, B. mazouz pour leur soutien moral.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de prés ou de loin à réaliser ce travail.

Mes vives salutations.



إهداء :

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلى بطاعتك .. ولا تطيب
اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. ولا تطيب الجنة إلا برويتك

الله جل جلاله

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من كلفه الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من
أحمل أسمه بكل افتخار .. أرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثماراً قد حان
قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد

والدي العزيز

إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمه

الحياة وسر الوجود

إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي .. إلى أعلى الحبايب

أمي الحبيبة

إلى النور الذي ينير ظلمة حياتي .. إلى من بوجودها أكتسب قوة ومحبة لا حدود

لها .. إلى من عرفت معها معنى الحياة

زوجتي أم أطفالي

إلى الذين تسكن صورهم وأصواتهم أجمل اللحظات والأيام التي عشتها في حياتي

إخوتي وأخواتي

زغلاش حمزة

SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES SYMBOLES	III
INTRODUCTION GÉNÉRALE	VI
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTEMES D'ENERGIE ÉOLIENNE.	
I.1. INTRODUCTION	5
I.2. HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE	5
I.3. VITESSE ET DIRECTION DU VENT.....	6
I.4. REPRESENTATION D'UNE EOLIENNE ET SON PRODUCTION	7
I.4.1 DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES ET LEUR UTILISATION	7
I.4.1.1 EOLIENNES A AXE VERTICAL	7
I.4.1.2 EOLIENNES A AXE HORIZONTAL	9
I.4.2.1 EOLIENNES LENTES	9
I.4.2.2 EOLIENNES RAPIDES	10
I.4.3 PRINCIPALES COMPOSANTES D'EOLIENNE.....	11
I.4.3.1 ROTOR	11
I.4.3.2 MAT.....	12
I.4.3.3 NACELLE.....	12
I.4.3.4 ARBRE	13
I.4.3.5 MULTIPLICATEUR	13
I.4.3.6 SYSTEME DE REFROIDISSEMENT	13
I.4.3.7 GENERATRICE (OU ALTERNATEUR)	13
I.4.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	13
I.4.5 CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE	14
I.4.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE	14
I.4.6.2 INCONVENIENTS.....	15
I.5 RENTABILITE D'UNE EOLIENNE	15
I.6 DES CRIPTIONS DES MACHINES ELECTRIQUE	16
I.6.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE FIXE.....	17
I.6.1 .1 LES AVANTAGES DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE.....	17
I.6.1.2 LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE	17
I.6.2 FONCTIONNEMENT A VITESSE VARIABLE	18
I.6.2.1 LESAVANTAGES DE L'EOLIENNES A VITESSE VARIABLE	19
I.6.2.2 LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNES AVITESSE VARIABLE	19
I.7 GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE	19
I.7.1 MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.....	20
I.7.1.1 STRUCTURE DE LA MADA.....	20
I.7.1.2 MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA.....	20
I.7.2 LES APPLICATIONS DES MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION	21
I.7.2.1 APPLICATIONS EN MOTEUR	21

I.7.2	APPLICATIONS EN GENERATRICE.....	21
I.7.3	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA.....	22
I.7.3.1	LES AVANTAGES DE LA MADA.....	21
I.7.4.2	LES INCONVENIENTS DE LA MADA.....	21
I.8	CONCLUSION.....	22

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE BASEE SUR UNE MADA.

II.1	INTRODUCTION	23
II.2	MODELISATION DE LA TURBINE ET DE SA COMMANDE	24
II.2.1	MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	24
II.2.1.1	SOURCE PRIMAIRE : le vent.....	24
II.2.1.2	CONVERSION AERODYNAMIQUE.....	25
II.2.1.3	EQUATION DYNAMIQUE DELA TURBINE.....	27
II.2.2.1	CARACTERISTIQUE DE PUISSANCE	29
II.2.2.2	COMMANDE DANS LA ZONE I (optimisation de la puissance).....	30
II.2.2.2.1	TECHNIQUES D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE (MPPT)	30
II.2.2.2.2	COMMANDE INDIRECTE DE LA VITESSE	31
II.2.2.3	COMMANDE DANS LA ZONE III (limitation de la puissance)	32
II.2.2.3.1	SYSTEME D'ORIENTATION DES PALES	33
II.2.2.3.2	REGULATION DU SYSTEMS D'ORIENTATION DES PALES « PITCH CONTROL »	34
II.2.3	RESULTATS DE SIMULATION.....	34
II.2.4	INTERPRETATIONS DES RESULTATS	35
II.3	MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION.....	35
II.3.1	HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	35
II.3.2	EQUATIONS MATHEMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (a,b,c)	36
II.3.2.2	EQUATIONS MAGNETIQUES.....	37
II.3.2.3	EQUATION MECANIQUE.....	38
II.3.3	TRANSFORMATION DE PARK.....	38
II.3.4	EQUATIONS MATHEMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE(d,q).....	39
II.3.4.1	EQUATIONS ELECTRIQUES.....	40
II.3.4.2	EQUATIONS MAGNETIQUES.....	41
II.3.4.3	EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.....	41
II.3.5	CHOIX DE REPERE DE REFERENCE DE PARK	41
II.3.6	MODELE D'ETAT DE LA MADA.....	42
II.3.7	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME.....	43
II.3.7.1	FONCTIONNEMENT MOTEUR.....	43
II.3.7.2	INTERPRETATION DES RESULTATS	45
II.3.7.3	FONCTIONNEMENT GENERATEUR.....	45
II.4	MODELISATION ET COMMANDE DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL	48
II.4.1	MODELISATION ET TECHNIQUE DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE MACHINE.	48

II.4.1.1	MODELISATION DU CONVERTISSEUR COTE MACHINE.....	48
II.4.1.2	COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION	50
II.4.2	MODELISATION ET TECHNIQUE DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU .	51
II.4.2.1	MODELISATION DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU.....	51
II.4.2.2	CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU	54
II.4.2.3	LA COMMANDE EN COURANT DU REDRESSEUR A MLI DANS LE REPERE (d,q).....	54
II.4.2.4	APPLICATION DE LA COMMANDE.....	54
II.4.3	RESULTATS DE SIMULATION DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL	56
III.4.3.1	INTERPRETATION DES RESULTATS	58
II.5	CONCLUSION	58

CHAPITRE III : ASPECT THEORIQUE DES LOIS DE COMMANDE

III.1	INTRODUCTION.....	59
III.2	COMMANDE VECTORIELLE	59
III.2.1	CLASSIFICATION DES METHODES DE COMMANDES.....	60
III.3	COMMANDE PAR MODE GLISSANT	62
III.3.1	CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT	62
III.4	CONCLUSION	64

CHAPITRE VI : APPLIQUATION DES LOIS DE COMMAND

III.1	INTRODUCTION.....	65
VI.2	COMMANDE VECTORIELLEDES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE	65
VI.3.	RELATIONS ENTRE LES COURANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES.....	66
VI.3.1	RELATIONS ENTRE LES PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES	66
VI.3.2	RELATIONS ENTRE LES TENSIONS ET COURANTS ROTORIQUES	67
VI.3.3	ETABLISSEMENT DES ANGLES NECESSAIRES AUX TRANSFORMATIONS.....	68
VI.3.4	TYPE DE REGULATEURS UTILISES	68
VI.3.5	LES DIFFERENTESTECHNIQUES DE LA COMMANDE VECTORIELLE	69
VI.3.5.1	COMMANDE DIRECTE.....	69
VI.3.5.2	COMMANDE INDIRECTE.....	70
VI.3.5.2.1	COMMANDE INDIRECTE SANSBOUCLE DE PUISSANCE.....	70
VI.3.5.2.2	COMMANDE INDIRECTE AVEC BOUCLE DE PUISSANCE	71
VI.4	RESULTATS DE SIMULATION	71
VI.4.1	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	72
VI.4.2	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME GLOBALE.....	73
VI.4.3	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	76
VI.5	APPLICATIONS DE LA COMMANDE MODE GLISSANT A LA MADA	76
VI.5.1	MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION GADA.....	76
VI.5.2	CHOIX DES SURFACES DE GLISSEMENTS	77
VI.5.3	CONDITIONS DE CONVERGENCES.....	77

VI.5.4	LOI DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT	78
VI.5.4	RESULTATS DE SIMULATION POUR UNE VITESSE FIXE	80
VI.5.5	RESULTATS DE SIMULATION DU SYSTEME GLOBALE	80
VI.5.6	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	82
IV.6	CONCLUSION	82

**CHAPITRE V : ETUDE COMPARATIVE DES TECHNIQUES DE COMMANDE
DEVELOPPEE**

V.1	INTRODUCTION	65
V.2	ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE PROPOSEES	83
V.1.1.2	POUR UNE VITESSE VARIABLE.....	85
V.2.2	COMPARAISON QUANTITATIVE.....	85
V.2.3	COMPARAISON DE LA ROBUSTESSE	87
V.3	CONCLUSION	88
	CONCLUSION GÉNÉRALE	89

BIBLIOGRAPHIE

ANNEX

CHAPITRE I

Tableau I-1 : Echelle Beaufort.....06

Tableau I-2 : Classification des turbines éoliennes.....10

CHAPITRE V

Tableau V-1 : Étude comparative des commandes développées pour le système considéré.....86

LISTE DES SYMBOLES

<i>MADA</i>	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
<i>GADA</i>	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation
<i>DFIG</i>	: Double Fed Induction Generator
<i>MAS</i>	: Machine Asynchrone
<i>MLI</i>	: modulation de largeur d'impulsion
<i>PWM</i>	: Pulse-width modulation
<i>f_r</i>	: Fréquence des grandeurs rotoriques
<i>f_s</i>	: Fréquence des grandeurs statoriques
<i>f_e</i>	: Fréquence de la porteuse
<i>a, b, c</i>	: Indices correspondants aux trois phases a, b, c
<i>max, min</i>	: Valeur maximale (minimale)
<i>SCSV</i>	: Système de commande à structure variable
<i>s, r</i>	: Indices du stator, du rotor
<i>d, q</i>	: Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature
<i>R_s, R_r</i>	: Résistances statorique et rotorique
<i>L_s, L_r</i>	: Inductances propre statorique et rotorique
<i>σ</i>	: Coefficient de dispersion
<i>T_r, T_s</i>	: Constantes de temps rotorique et statorique
<i>M_{sr}</i>	: Inductance mutuelle stator- rotor
<i>M_{rs}</i>	: Inductance mutuelle rotor - stator
<i>M_s</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
<i>M_r</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
<i>Φ_s, Φ_r</i>	: Respectivement flux statorique et rotorique
<i>Φ_{sd}, Φ_{sq}</i>	: Les flux statoriques direct et en quadrature
<i>Φ_{rd}, Φ_{rq}</i>	: Les flux rotoriques direct et en quadrature
<i>I_s, I_r</i>	: Les courants de phase statorique et rotorique
<i>I_{sd}, I_{sq}</i>	: Les courants statoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>I_{rd}, I_{rq}</i>	: Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>V_s, V_r</i>	: Tensions simples respectivement statorique et rotorique
<i>V_{sd}, V_{sq}</i>	: Les tensions statoriques directe et en quadrature
<i>V_{rd}, V_{rq}</i>	: Les tensions rotoriques directe et en quadrature
<i>θ_s, θ_r</i>	: Angles électriques statorique et rotorique
<i>W_s, W_r</i>	: Pulsations statorique et rotorique
<i>W_m</i>	: Pulsation mécanique
<i>P</i>	: Nombre de paires de poles
<i>g</i>	: Glissement
<i>P_e</i>	: Puissance d'entrée
<i>P_{Mec}</i>	: Puissance mécanique
<i>P_s</i>	: Puissance active statorique

LISTE DES SYMBOLES

P_s	: Puissance active statorique
P_r	: Puissance active rotorique
Q_s	: Puissance réactive statorique
Q_r	: Puissance réactive rotorique
S_s	: Puissance apparente statorique
S_r	: Puissance apparente rotorique
p	: Operateur de LAPLACE
cem	: Couple électromagnétique
Cr	: Couple résistant
f_m	: Coefficient de frottement visqueux
J_m	: Inertie de la machine
P_s, Q_s	: Puissances active et réactive statorique
P_r, Q_r	: Puissances active et réactive rotorique
ρ	: Masse volumique du vent
f	: Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne
V	: La vitesse moyenne du vent
J	: L'inertie totale de l'éolienne
G	: Le rapport du multiplicateur de vitesse
λ	: La vitesse spécifique de la turbine
β	: L'angle de calage des pales
λ_{opt}	: La vitesse spécifique optimale de la turbine
Ω_T, Ω_g	: La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur
C_T, C_g	: Le couple de la turbine et le couple électromagnétique
C_{Topt}	: Le couple optimal de la turbine
C_{gopt}	: Le couple optimal du générateur
f_T, f_g	: Les coefficients des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur
J_T, J_g	: L'inertie de la turbine et celle du générateur
P_T	: La puissance convertie par la turbine
R_T	: Le rayon des pales de la turbine
$C_p(\lambda, \beta)$: Le coefficient de puissance
U_c	: La tension du bus continu
I_c	: Le courant dans le condensateur du bus continu
c	: Le condensateur du bus continu
PI	: Proportionnel – Intégrale.
k_p	: Gain de l'action proportionnel du régulateur PI
k_i	: Gain de l'action intégrale du régulateur PI
s	: Surface de glissement
v_1	: Gain La surface de glissement de puissance active
v_2	: Gain La surface de glissement de puissance réactive
t	: Variable de temps
$FTBO$: Fonction de Transfer en Boucle Ouverte
$FTBF$: Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
$MPPT$: Maximum Power Point Tracking
$V.C$: Vector Control

LISTE DES SYMBOLES

<i>MPPT</i>	: Maximum Power Point Tracking
<i>V.C</i>	: Vector Control
<i>S.M.C</i>	: Sliding Mode Control
<i>PLL</i>	: Phase Locked Loop

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (éolien, solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable.

Jusqu'à présent, les cahiers des charges et les standards nationaux, n'obligeaient pas les éoliennes à rester connectées durant une perturbation de la tension normalement imposée par le réseau. Par exemple, pendant un défaut du réseau ou un brutal changement de la fréquence du réseau, une déstabilisation du système éolien de production est observée et ses protections internes la déconnectent. Cependant, avec le développement de l'énergie éolienne, les interactions entre les éoliennes et le réseau électrique doivent être prises en compte. Ceci est d'autant plus vrai que, lorsque les turbines de production éoliennes se retrouvent déconnectées du réseau, elles ne peuvent plus être utilisées par le gestionnaire du réseau pour assurer la stabilité en tension et en fréquence du réseau dans cette situation de défaut, contrairement aux systèmes classiques de production. C'est l'une des causes majeures de la perte de stabilité dans les réseaux à fort taux d'éoliens.

Avec le développement massif de l'éolien, les prescriptions techniques de raccordement de cette technologie obligeront le maintien de sa connexion lors d'incidents sur la tension du réseau électrique. L'enjeu pour le gestionnaire du réseau est de pouvoir utiliser tous les générateurs pour garantir la stabilité du système électrique et de maintenir en tout temps l'équilibre entre la production et la consommation. En effet, l'énergie doit être disponible sur le-champ quand le client en a besoin. Car les creux de tension et les coupures perturbent de nombreux appareils raccordés au réseau. Ils sont la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie. Un creux de tension ou une coupure de quelques centaines de millisecondes peut se traduire par des conséquences néfastes plusieurs heures durant.

PROBLEMATIQUE

Aujourd'hui, l'importance de la production d'énergie éolienne a conduit les gens du domaine à mener des recherches approfondies pour améliorer l'efficacité de ces systèmes par un meilleur transfert d'énergie et une bonne qualité de l'énergie produite à travers le choix d'une architecture optimale du système, et des techniques de commandes adéquates qui seront capables de compenser l'effet des perturbations paramétriques et extérieures du système. Dans ce contexte, ce présent travail de mémoire est consacré à l'étude d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone double alimentée (MADA), et où la configuration du système, le type de convertisseur ainsi que la technique de commande adoptée seront considérés.

OBJECTIF DE LA THESE

L'objectif de notre travail est de présenter une étude théorique sur les différentes structures des systèmes de production d'énergie éolienne afin de choisir la plus performante. Cette structure composée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales pour contrôler la capture d'énergie du vent pendant ses faibles et ses fortes vitesses sera étudiée. Cette machine est couplée directement au réseau par le stator et pilotée par les grandeurs rotoriques à travers deux convertisseurs bidirectionnelles MLI (modulation de largeur d'impulsion). La fonction principale de ces convertisseurs dans le système considéré est la connexion de la génératrice éolienne au réseau électrique de deux façons différentes : l'une sur le convertisseur côté réseau qui permettra le contrôle de bus continu et améliorer le facteur de puissance côté réseau ; l'autre, sur le convertisseur côté rotor qui permettra le contrôle et l'optimisation du flux énergétique généré par le stator pendant les périodes de fonctionnement de ce système. Pour ce faire, plusieurs techniques de commandes seront développées dans ce travail afin d'assurer un rendement et une qualité de production optimaux.

Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- ❖ Modélisation de la turbine éolienne et la synthèse des lois de commandes pour contrôler la capture de la puissance à une valeur maximale en dessous de la puissance nominale.
- ❖ Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un fonctionnement moteur ou génératrice.
- ❖ Modélisation des deux convertisseurs qui raccordent le rotor de la machine (MADA) au réseau.

- ❖ Synthèse d'une loi de commande appliquée au convertisseur côté réseau pour contrôler le facteur de puissance côté réseau unitaire et régler le bus continu à la valeur désirée.
- ❖ Synthèse d'une loi de commande vectorielle à base de régulateurs PI appliquée au convertisseur côté rotor pour contrôler les puissances active et réactive générées par le stator de la MADA aux valeurs désirées.
- ❖ Synthèse d'une loi de commande par mode glissant toujours pour contrôler l'échange des puissances produites au stator de la MADA.
- ❖ Le dernier objectif de ce travail consiste à faire une comparaison globale entre les deux techniques de commandes afin de mettre en évidence leurs performances.

STRUCTURE DE LA THESE

Ce travail comprend cinq chapitres, est organisé de la manière suivante.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une généralité sur l'énergie éolienne (son historique, l'évolution de son exploitation dans le monde en quelques chiffres ainsi que ses avantages et ses inconvénients). Ensuite, un rappel théorique sur les différents types d'aérogénérateurs sera donné. Une description détaillée de l'aérogénérateur à axe horizontal qui est l'objet de notre étude, de la technologie de son fonctionnement, des méthodes de sa régulation, ainsi que sa protection mécanique qui seront présentées. Aussi, les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés. Enfin, comme résultat, le choix sera porté sur la MADA qui sera l'objet d'une étude détaillée (sa structure, ses modes de fonctionnement, les configurations de son alimentation, ses applications, ainsi que ses avantages et ses inconvénients).

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation individuelle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. Nous commencerons par la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant et son alimentation rotorique (onduleur à deux niveaux) qui permettra l'application des commandes destinées au contrôle des puissances générées par le stator. Par la suite, on passera à la modélisation de la turbine et ses commandes pour maximiser et limiter la capture de la puissance pendant les faibles et les fortes vitesses du vent. Enfin, on présentera une modélisation de l'alimentation de l'onduleur qui est un convertisseur triphasé (redresseur à deux niveaux) et sa commande pour améliorer le facteur de puissance côté réseau et assurer le réglage du bus continu. Le modèle mathématique

globale obtenu sera réservé à l'application des différentes commandes pour assurer un rendement de production optimal.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les aspects théoriques des lois de commandes pour obtenir une bonne qualité d'énergie électrique produite par le système. Ces algorithmes permettront de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées; l'une des applications concerne la commande vectorielle aux moyens de régulateurs PI basée sur l'orientation du flux statorique pour linéariser le modèle de la machine et découpler le contrôle des puissances générées ; l'autre, concerne la commande par mode glissant à base des gains estimés.

Au quatrième chapitre, nous appliquons les deux techniques de commandes qui permettront de garder instantanément un bon rendement et un découplage parfait du contrôle entre les puissances générées par la MADA. Les performances de ces techniques de commandes seront justifiées par des résultats obtenus par simulation.

Le cinquième et dernier chapitre sera consacré à l'étude comparative entre les différentes lois de commandes proposées dans ce travail de mémoire afin de mettre en évidence l'efficacité et la robustesse de chacune d'elles. Cette étude est basée sur trois critères essentiels durant le fonctionnement en régime transitoire et permanent.

Finalement, le travail sera clôturé par une conclusion générale, ainsi que par des quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

CHAPITRE I

**GÉNÉRALITÉ SUR LES
SYSTEMES D'ENERGIE
ÉOLIENNE.**

I.1. INTRODUCTION

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées [1].

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours. La technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer un état de l'art sur l'énergie éolienne [1].

I.2. HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle [1].

L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, HAMMURABI, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne. Trois siècles A.J.C, L'Egyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes. Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain [1]. Ce type de moulins à vent va se répandre dans le monde arabe.

Par la suite, les croisées les ramenèrent en Orient. D'abord le système éolien est utilisés pour le pompage d'eau (POLDER), elles servirent par la suite au seizième siècle à d'autres fonctions, tel que couper le bois. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [2].

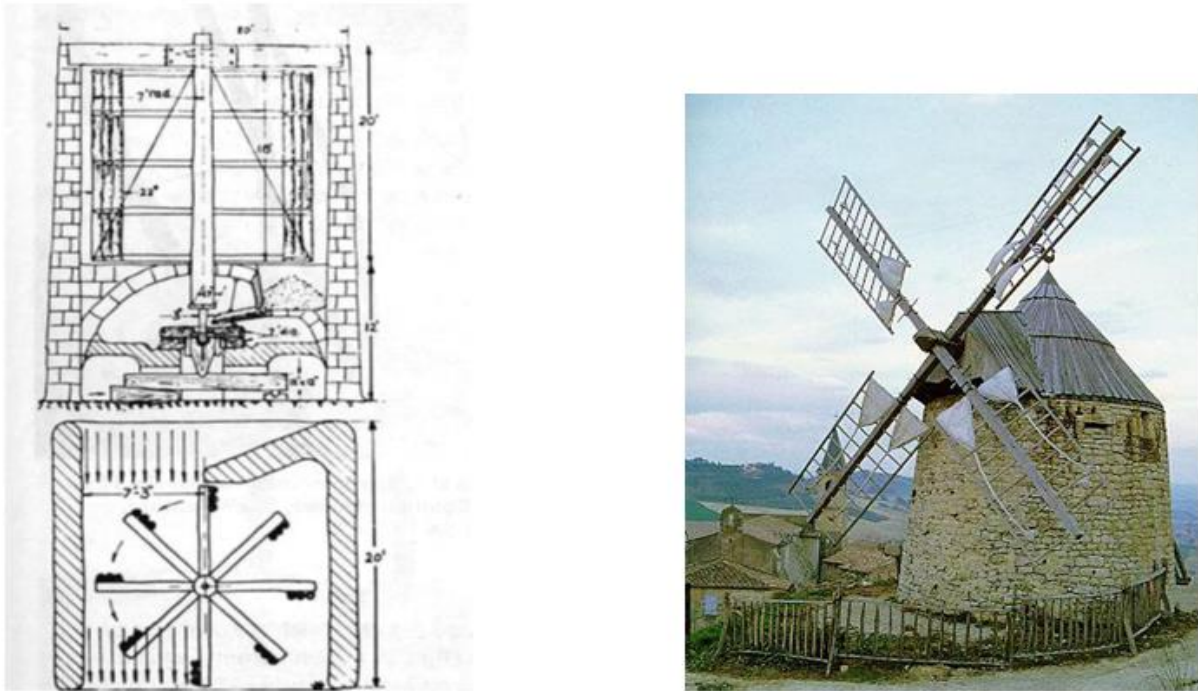


Figure I.1 : Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite) [2].

I.3 VITESSE ET DIRECTION DU VENT

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau I.1 [3].

Tableau I.1 : Echelle Beaufort

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (Km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	<1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brie	3.2 (5m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent faible	22 (13m/s)
18	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [4]

I.4 REPRESENTATION D'UNE EOLIENNE ET SON PRODUCTION

Une éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pales en rotation autour du rotor et actionnées par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'énergie électrique de catégorie des énergies renouvelables. [4]

I.4.1 DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES ET LEUR UTILISATION

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique. [4]

I.4.1.1 EOLIENNES A AXE VERTICAL

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.2) [5].

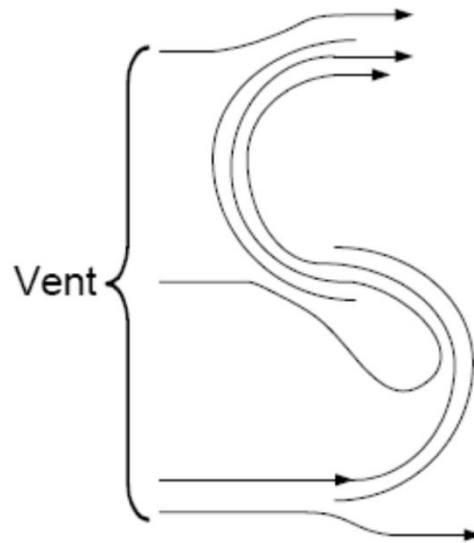


Figure I.2 : éolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.3) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) .

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [5].

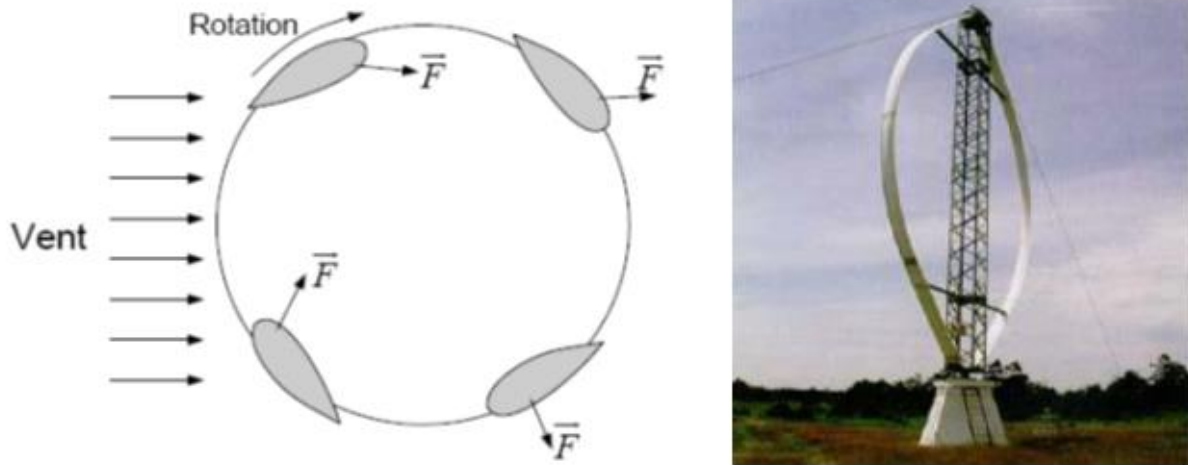


Figure I.3 : Eolienne de Darrieus. [5]

I.4.1.2 EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. [5]

I.4.2.1. EOLIENNES LENTES

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3] :

$$P=0.15*D^2*V^3 \quad (I.1)$$

La puissance (P) étant exprimée en Watts, le diamètre (D) en mètre et la vitesse (V) du vent en m/s.

I.4.2.2. EOLIENNES RAPIDES

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau I.2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [6].

Tableau I.2 : Classification des turbines éoliennes

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45 m	40 KW à 1MW
Grande	46 m et plus	1 MW

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [6].

I.4.3 PRINCIPALES COMPOSANTES D'EOLIENNE

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux: comme illustré sur la figure I.4 [6].

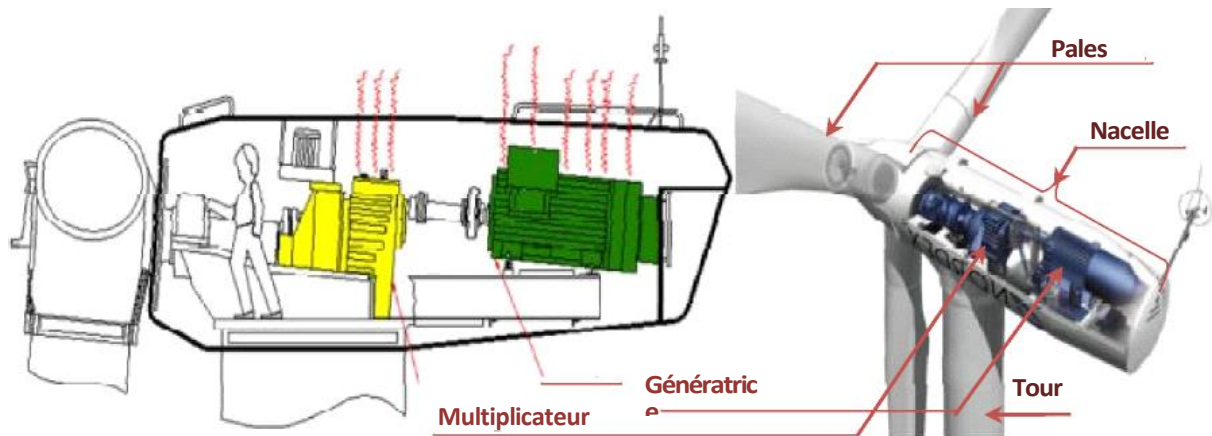


Figure I.4 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal [6]

I.4.3.1. ROTOR

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, il fait tourner le mécanisme d'entraînement construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

Le nombre de pales varie de un à trois, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, l'impact visuel et le bruit [7].

On distingue deux types de rotors :

➤ **Rotors à pas fixe**

Ils sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant une connexion directe au réseau ou à la charge sans dispositif d'électronique de puissance, c'est un mécanisme presque idéal assurant une optimisation de la vitesse disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux.

➤ **Rotors à pas variable**

Ils sont coûteux car le dispositif d'orientation des pales est dans la plupart des cas supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

I.4.3.2. MAT

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor + nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la capture de l'énergie. Le mât est généralement un tube d'acier d'une hauteur comprise

entre 60 à 100m, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau [7].

I.4.3.3. NACELLE

Elle est située en haut du mât, elle comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le générateur, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. La figure I.5 montre la nacelle et ces éléments [7].

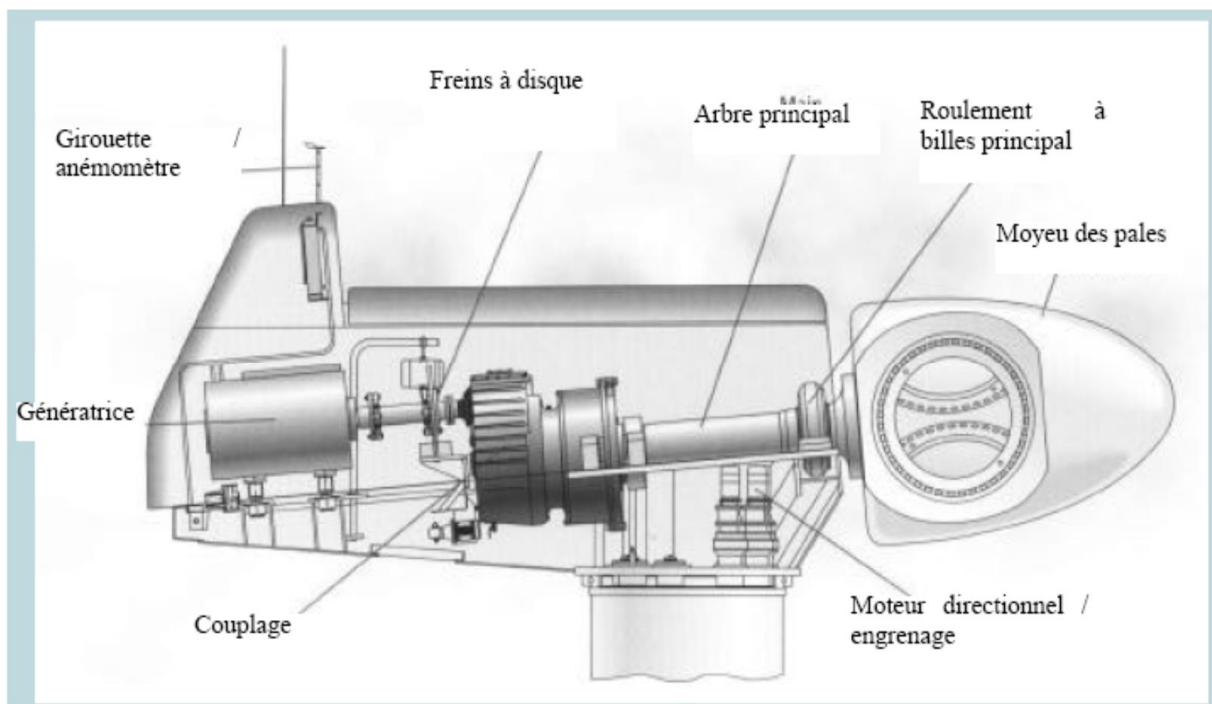


Figure I.5 : Eléments attachés à une nacelle [7].

I.4.3.4. ARBRE

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

I.4.3.5. MULTIPLICATEUR

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

I.4.3.6. SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) pour le multiplicateur.

I.4.3.7. GENERATRICE (OU ALTERNATEUR)

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

I.4.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [8].

I.4.5 CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique (figure I.6).

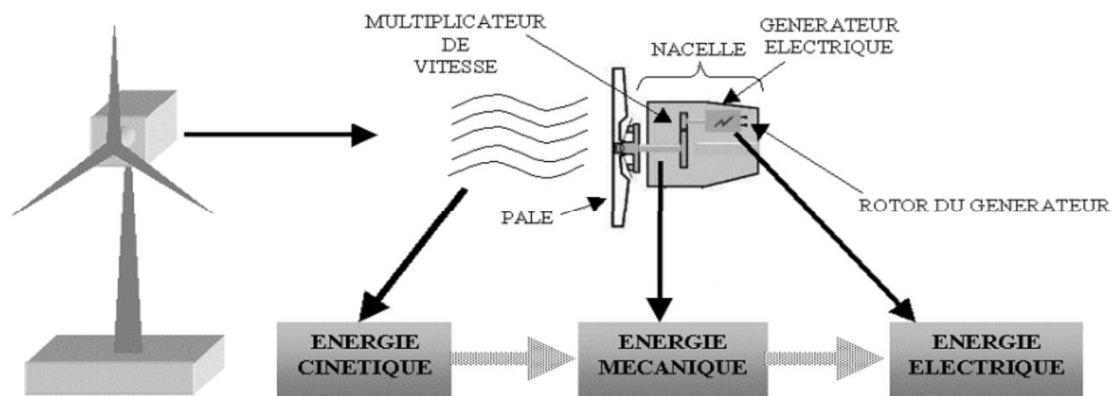


Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [8]

I.4.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

I.4.6.1 AVANTAGES

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [8].

Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂ [9].

L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [10].

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [10].

La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [11].

C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.

Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant.

I.4.6.2 INCONVENIENTS

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif [11].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [11].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [11].
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [11].

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques [12].

I.5 RENTABILITE D'UNE EOLIENNE

Les facteurs qui déterminent le coût de l'énergie éolienne sont les suivants :

- le coût initial de l'éolienne et de sa installation ;
- le taux d'intérêt à payer sur l'investissement ;
- la quantité d'énergie produite ;

Les éoliennes installées dans un endroit fortement exposée au vent produisent de l'électricité moins couteuse que les mêmes éoliennes installées dans endroit moins venté. Il est donc important de choisir l'endroit de l'installation de l'éolienne en se basant sur le facteur vitesse du vent.

Le cout de production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne dans les endroits exposée a de bon vents est quelque peu supérieur aux frais associés à une installation d'électricité, cependant les couts de l'énergie éolienne diminue chaque année, tandis que les couts de production plus traditionnelle continue d'augmenter.

Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payée par les consommateurs, Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [13]. Donc en terme global, l'énergie éolienne est l'une des énergies les moins couteuses.

Cependant, sur les sites moins ventés le cout de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classique.

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [13].

Comme il est montré sur la Figure I.7 la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années une forte croissance.

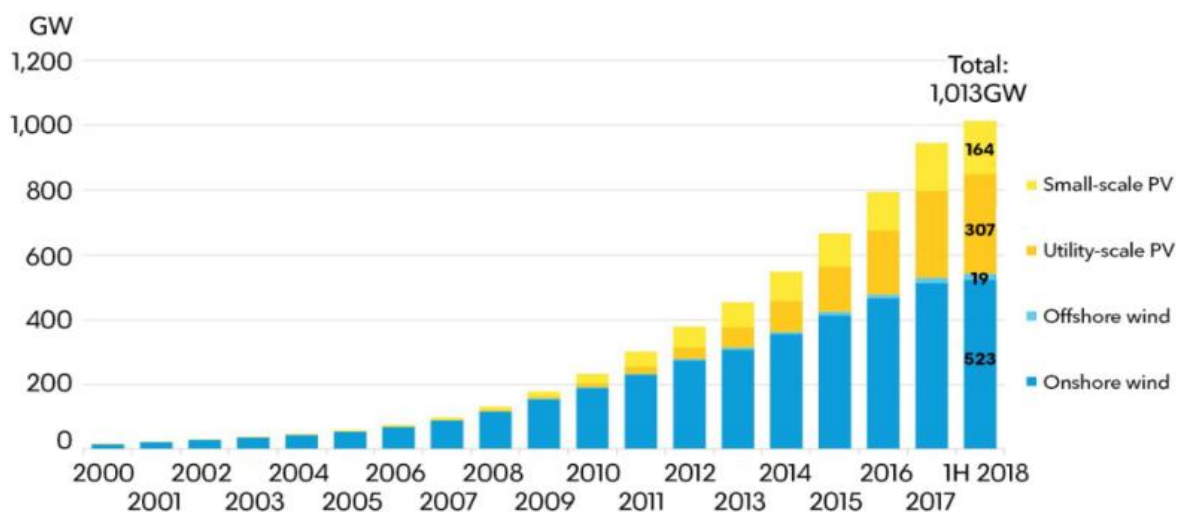


Figure I.7 : Capacité mondiale installée en GW.

I.6 DES CRIPTIONS DES MACHINES ELECTRIQUE

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de sa configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [14] :

I.6.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE FIXE

Ces éoliennes sont les premières à avoir reçue une technologie développée. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hyper-synchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique fixe est imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles.

Le contrôle de la puissance de ce type de système se fait au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique, soit par calage variable des pales de l'aérogénérateur pour s'approcher du fonctionnement synchrone. Il est doté d'un multiplicateur de vitesse pour s'adapter à la vitesse de la turbine et de la génératrice [15].

I.6.1.1 LES AVANTAGES DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE

Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont [16] :

- ☞ La simplicité d'implantation.
- ☞ L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- ☞ Une grande fiabilité.
- ☞ Un faible coût.

I.6.1.2 LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [17] :

- ☞ Une puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- ☞ Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
- ☞ Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- ☞ La perte du contrôle de la puissance réactive.
- ☞ L'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice.

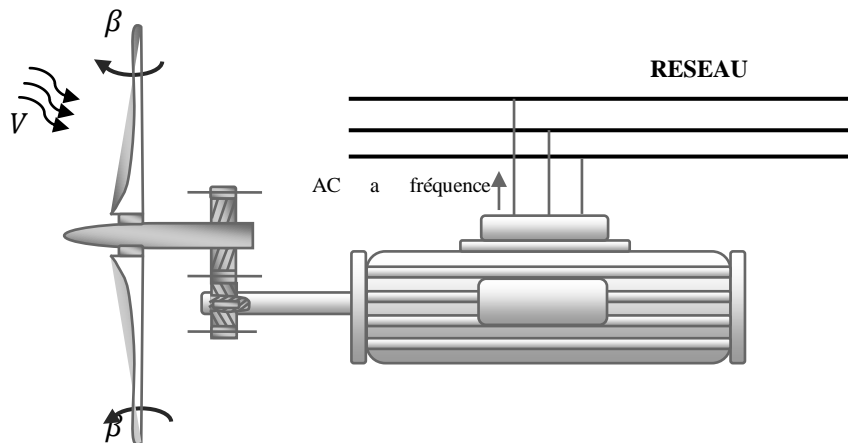


Figure I-8 : Eolienne à vitesse fixe.

I.6.2 FONCTIONNEMENT A VITESSE VARIABLE

Les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à savoir : la turbine, le générateur et le convertisseur utilisé qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générés par le générateur avec celles du réseau [18].

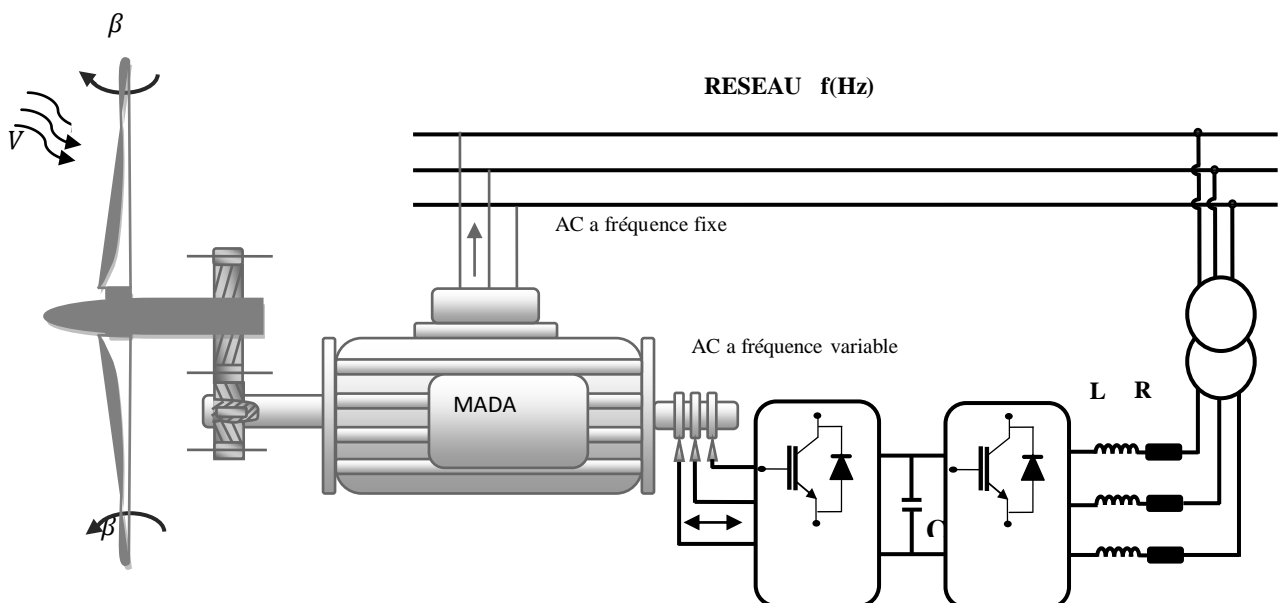


Figure I-9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

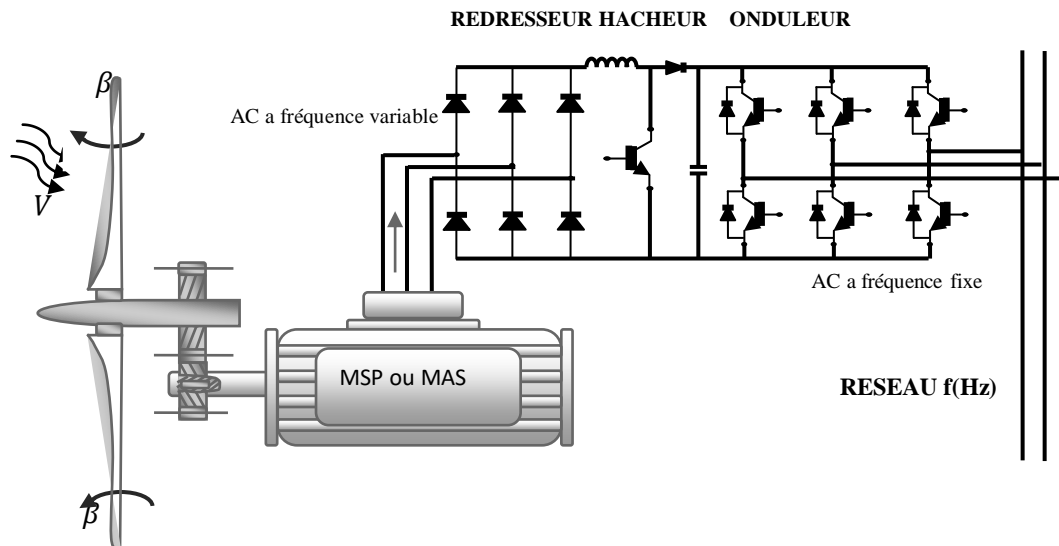


Figure I-10 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MSP ou une MAS.

I.6.2.1 LES AVANTAGES DE L'EOLIENNES A VITESSE VARIABLE

- ☞ Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- ☞ Une limitation des oscillations mécaniques.
- ☞ Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

I.6.2.2 LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNES A VITESSE VARIABLE

- ☞ Un raccordement indirect du système au réseau et son coût.
- ☞ Une grande complexité du système de puissance.
- ☞ Une perte d'énergie pendant le processus de conversion.

I.7 GENERALITE SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Il existe plusieurs types de machines électriques qui jouent le rôle de génératrice dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Ces machines exigent des caractéristiques spécifiques et leur cahier de charge varie selon le type et les dimensions géométriques. Dans ce travail en base sur la machine asynchrone à double alimentation.

I.7.1 MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone double alimentation (MADA) joue un très grand rôle dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. L'utilisation d'une telle machine exige l'insertion

d'un convertisseur entre le rotor et le réseau ce qui permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau. C'est la raison pour laquelle on trouve cette génératrice dans la production d'énergie électrique de grande puissance dans une grande gamme de vitesse du vent [19].

Dans ce qui suit, nous allons considérer en détail la structure de cette machine, les configurations les plus utilisées, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

I.7.1.1 STRUCTURE DE LA MADA

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator identique à celui des machines asynchrones et synchrones classiques. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoile dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. Le contrôle de la machine se fait par le contrôle de la puissance nominale qui circule dans le rotor à travers un convertisseur de puissance réduite et moins coûteux [20].

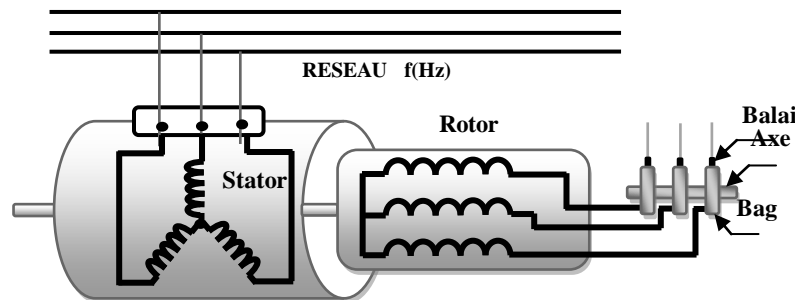


Figure I-11 : Schéma de la structure de la MADA à rotor bobiné.

I.7.1.2 MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA peut fonctionner en moteur et en générateur. La différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement mais la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA un meilleur choix pour des entraînements à vitesse variable [21].

I.7.2 LES APPLICATIONS DES MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION

Malgré la présence du système contacts glissants, la plus part des applications industrielles utilisent la MADA pilotée par le rotor aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur .L'insertion d'un convertisseur de petite dimension entre le rotor et le réseau

permet de supprimer le convertisseur entre le stator et le réseau pour les deux modes de fonctionnement. Ce dispositif devient par conséquent économique et rentable vu l'absence du besoin de consommation de la puissance réactive. Celui-ci peut même en fournir [22].

I.7.2.1 APPLICATIONS EN MOTEUR

La MADA est considérée comme une nouvelle solution pour les entraînements de fortes puissances, notamment ceux exigeant un domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de vitesse, son utilisation permet de varier la vitesse par la variation de la fréquence d'alimentation rotorique. Ce dispositif sera donc économique puisque le convertisseur du côté rotorique sera de petites dimensions.

De plus, sa commande souple lui permet des applications très vastes comme dans les laminoirs, les tractions ferroviaires, les propulsions maritimes, les véhicules électriques, les ventilateurs, les pompes, et les compresseurs.

I.7.2.2 APPLICATIONS EN GENERATRICE

Dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, la MADA est aussi une bonne solution pour la production de l'énergie électrique. L'alimentation à fréquence variable du rotor permet de générer des tensions à fréquence et amplitude fixes au stator quel que soit la vitesse de rotation de l'arbre de la machine, et permet ainsi de produire une puissance optimale extraite de l'énergie cinétique du vent et un bon rendement.

Cette application présente la MADA comme un meilleur choix par rapport aux autres machines pour la production d'énergie décentralisée à savoir :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et à vitesse variables.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.

I.7.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

La machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages des machines asynchrones et synchrones à cause de sa structure qui lui permet de fonctionner comme les deux machines [23].

I.7.3.1 LES AVANTAGES DE LA MADA

Parmi les avantages de la MADA, on peut citer :

- ☺ Une grande flexibilité et une grande précision lors des contrôles du flux et du couple électromagnétique grâce à l'accès au rotor qui offre la possibilité de contrôler ses grandeurs électriques (courant et tension).

- ☺ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse du synchronisme.
- ☺ La possibilité de fonctionner en régime dégradé grâce à la configuration des deux convertisseurs alimentant la machine.
- ☺ La possibilité de partager le courant magnétisant entre les deux armatures de la machine en fonctionnement moteur.
- ☺ La réduction des dimensions des convertisseurs statiques, et la minimisation ainsi des pertes fer de la machine et l'augmentation de son rendement.
- ☺ Le transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- ☺ Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- ☺ Le fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- ☺ La commande indépendante des puissances active et réactive.

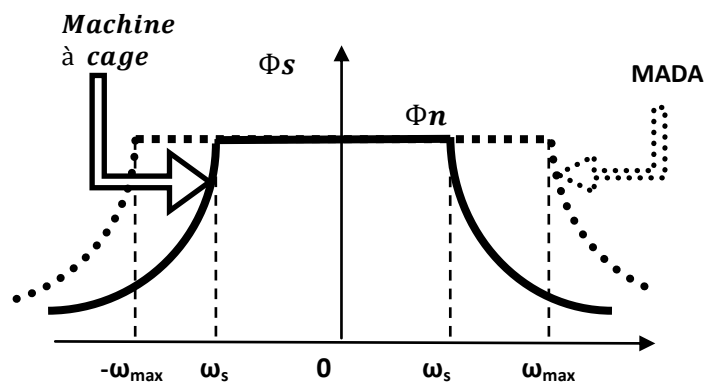


Figure I-12 : Comparaison des zones de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA.

I.7.4.2 LES INCONVENIENTS DE LA MADA

Par contre, comme dans toutes les autres machines électriques, la MADA présente des inconvénients à savoir :

- ☹ Des dimensions plus grandes que celles des autres machines asynchrones classiques. Généralement, elle est plus longue à cause du système balais-bague.
- ☹ L'utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus grand que celui des autres machines classiques.
- ☹ Le coût de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques (maintenance périodique du système balais-bague).

- ⊖ Elle est moins fiable que celle à cage à cause de la présence du système balais-bagues et le bobinage du rotor.

I.8 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, la rentabilité d'une énergie éolienne, le modèle de la machine asynchrone à double alimentation MADA et les convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens. Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation des différentes parties de l'ensemble turbine, machine asynchrone à double alimentation MADA, Multiplicateur, convertisseurs de puissance, filtre, transformateur, et le réseau.

CHAPITRE II

**MODELISATION DE LA
CHAINE DE CONVERSION
EOLIENNE BASEE SUR UNE
MADA.**

II.1.INTRODUCTION

Le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable composé d'une machine asynchrone à double alimentation, entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor aux moyens de deux convertisseurs de puissance bidirectionnelle fonctionnant en MLI est le système le plus utilisé dans la conversion d'énergie éolienne vu les avantages qu'il apporte. Dans ce chapitre, nous allons axer le travail sur la modélisation individuelle de chaque élément de cette chaîne de conversion, à savoir :

- ❖ La turbine éolienne et sa commande pour maximiser et limiter le capteur de la puissance pendant les faibles et fortes vitesses du vent.
- ❖ la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui a un stator directement connecté au réseau, et un rotor alimenté par un onduleur permettant l'application des commandes qui contrôlent les puissances générées par le stator.
- ❖ l'alimentation de l'onduleur qui semble une solution efficace pour l'amélioration du facteur de puissance côté réseau et le réglage de bus continu.

Pour ce faire, nous allons décrire les modèles mathématiques de chaque élément du système, (Figure II-1).

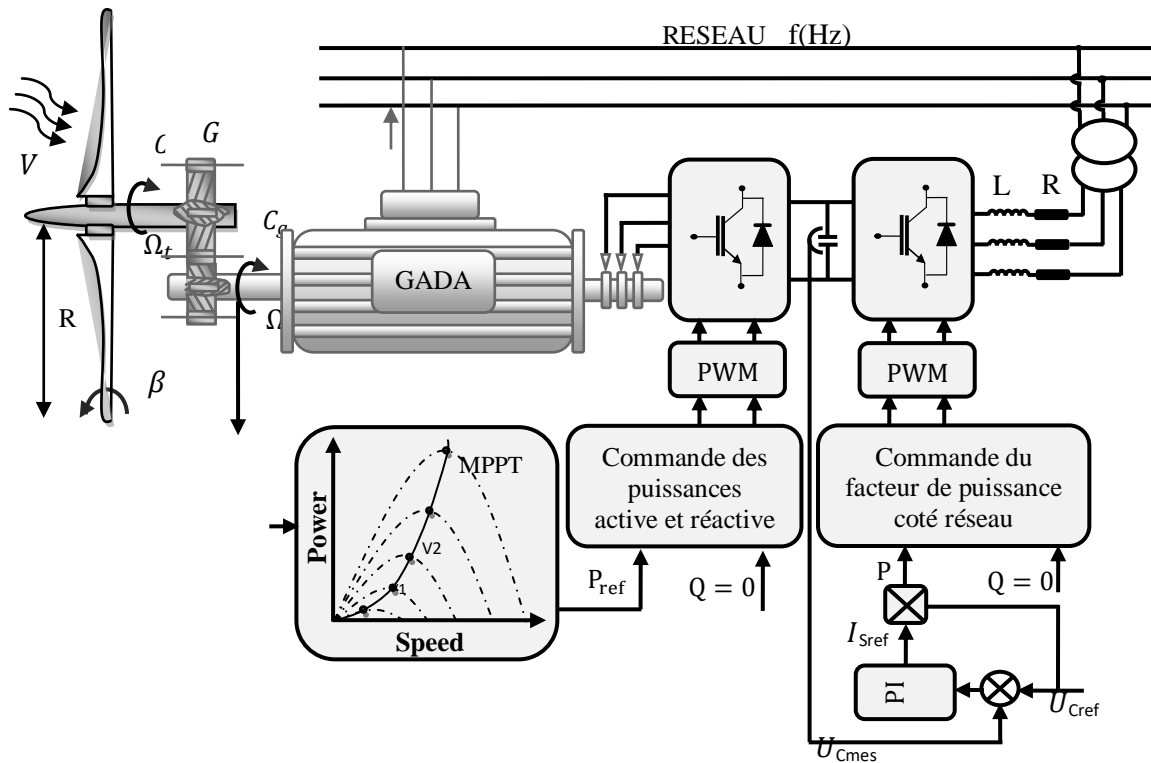


Figure II-1 : Schéma synoptique du système de conversion d'énergie éolienne et sa commande.

II.2 . MODELISATION DE LA TURBINE ET DE SA COMMANDE

Pour avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice, et améliorer l'efficacité de conversion tout en respectant les normes de la qualité d'énergie produite, on a besoin d'une modélisation précise et exigeante, et des techniques de commandes pour différentes vitesses du vent[24].

II.2.1 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales identiques de longueur R_T fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation G . Ce multiplicateur entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique, (Figure II-2) [24].

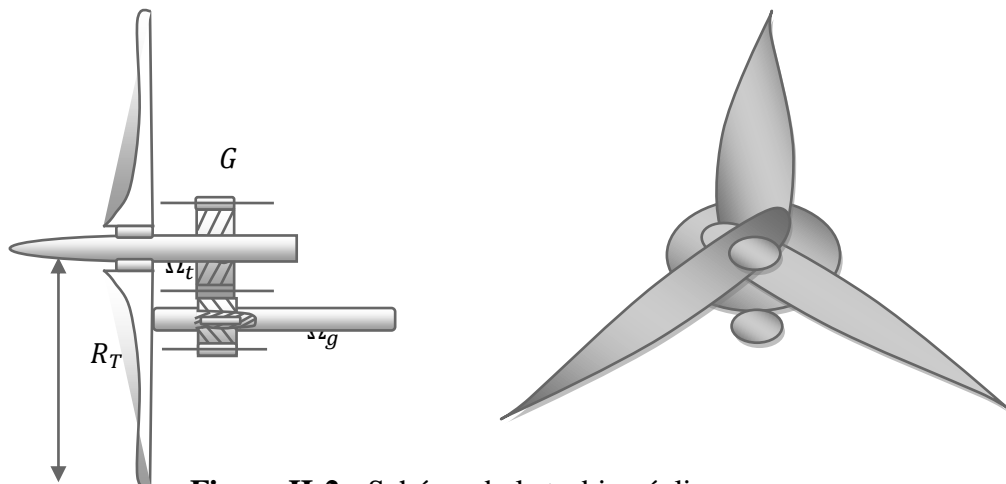


Figure II-2 : Schéma de la turbine éolienne.

II.2.1.1 SOURCE PRIMAIRE : LE VENT

L'énergie cinétique du vent est l'élément primaire et fondamental du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de déplacement de masses d'air caractérisé par une vitesse variable et une direction aléatoire. Son déplacement au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif.

La vitesse du vent en un point de l'espace $V_0(t)$ est la résultante de deux composantes ; l'une V varie lentement, alors que l'autre $V(t)$ varie en turbulence en fonction de temps. Son expression est donnée par la formule (II. 1)[24] :

$$V_0(t) = V + V(t) \quad (\text{II. 1})$$

La composante V représente trois niveaux de vitesse du vent :

$V = 6 \text{ m/s}$ Pour une faible vitesse du vent ;

$V = 12 \text{ m/s}$ Pour une vitesse moyenne du vent ;

$V = 18 \text{ m/s}$ Pour une forte vitesse du vent.

L'autre composante $V(t)$ qui varie en fluctuations (turbulences) est décrite par l'expression (II.2) :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} v(t)^2 dt} \quad (\text{II. 2})$$

Où σ_v est le coefficient de dispersion du vent.

Dans notre étude, le profil du vent appliqué possède une faible vitesse $V = 8 \text{ m/s}$. Sa variation en fonction du temps est représentée par la figure (II-3)[24].

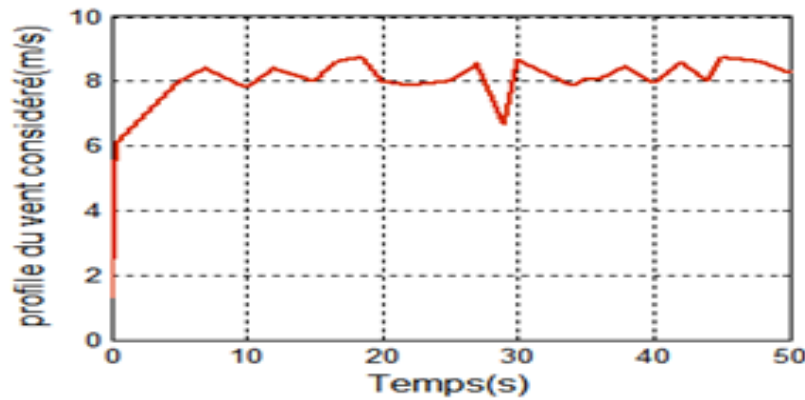


Figure II-3 : Profil du vent appliqué à la turbine.

II.2.1.2 CONVERSION AERODYNAMIQUE

On suppose que la vitesse V du vent qui traverse une surface S est constante. La puissance aérodynamique $P_{aér}$ est donnée par l'expression (II. 3) :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II. 3})$$

ρ représente la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m^3 à une pression atmosphérique normale et une température de 15°C).

La puissance P_T de la turbine selon la théorie de Betz (voir annexe) est [24],[37]:

$$P_T = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 4})$$

R_T - le rayon des pales de la turbine.

$C_p(\lambda, \beta)$ - le rendement aérodynamique de la turbine appelé souvent coefficient de puissance. C'est un coefficient spécifique à chaque éolienne qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Dans notre étude, le coefficient de puissance de la turbine utilisé est donné par l'expression (II. 5):

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II. 5})$$

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales β , (Figure II-4), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ($C_p = 0.5$) qui correspond aux valeurs optimales $\lambda = 9.2$ et $\beta = 2$. Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale [24], [25].

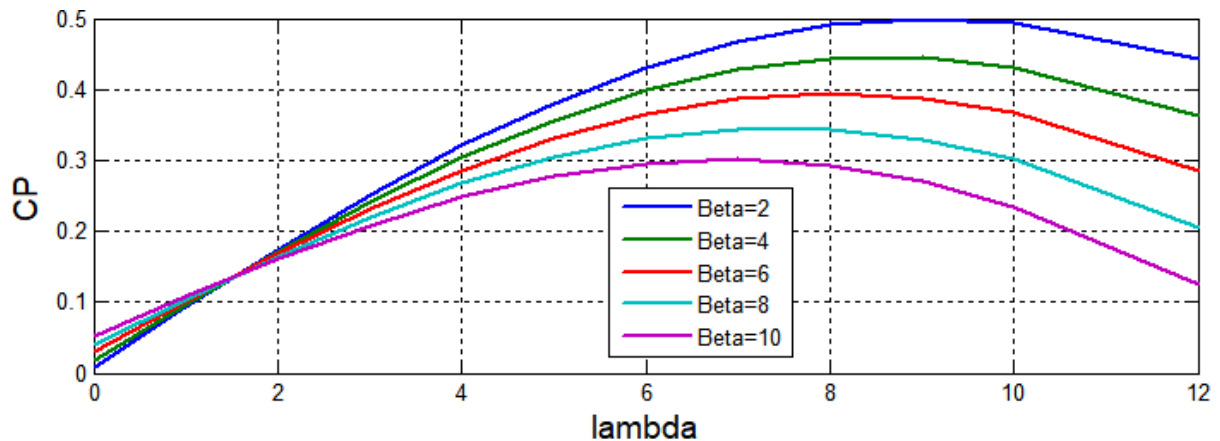


Figure II-4 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.

Une commande adaptée à ce système sera élaborée par la suite pour atteindre ce point de fonctionnement.

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire au bout de la pale de la turbine ramenée à la vitesse du vent, soit :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \quad (\text{II. 6})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple de la turbine est donc déterminé de la manière suivante :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \right) \cdot \left(\frac{R_T}{V \cdot \lambda} \right) \quad (\text{II. 7})$$

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 8})$$

En tenant compte du multiplicateur, adaptateur de la vitesse entre la turbine et la génératrice, son gain est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$G = \frac{C_T}{C_{Mec}} \quad (\text{II. 9}), \quad \text{et} \quad G = \frac{\Omega_g}{\Omega_T} \quad (\text{II. 10})$$

II.2.1.3 EQUATION DYNAMIQUE DE LA TURBINE

Le train de transmission de la puissance captée par le rotor éolien, est constitué de pales reliées au moyeu couplé à l'arbre lent est relié à son tour à un adaptateur. Cet adaptateur multiplie la vitesse de rotation de l'arbre lent est relié à un arbre rapide qui est relié à son tour à la génératrice [25]

Le modèle équivalent de masse de cette chaîne qui comprend trois masses à savoir :

- La grande masse du rotor de la turbine éolienne qui représente 90% du moment d'inertie global.
- La masse du multiplicateur qui représente 2 à 4% du moment d'inertie global.
- La masse de générateur qui représente 6 à 8% du moment d'inertie global.

Le modèle est représenté par la Figure II.5.

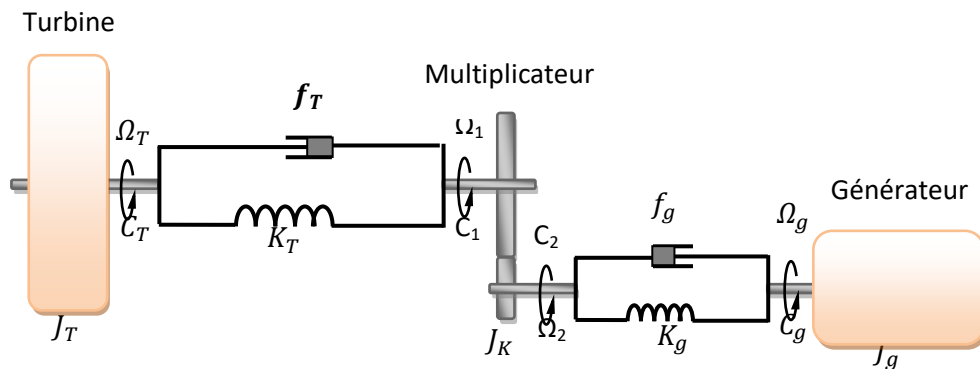


Figure II-5 : Modèle de la turbine.

En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres, nous posons les hypothèses simplificatrices suivantes [26]:

- ✓ les trois pales de longueur R_T chacune, attachée au moyeu sont supposées identiques et ont une seule masse d'une inertie J_T .
- ✓ L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celles du rotor de la turbine et de la génératrice, ce qui nous permet de la considérer comme un gain de vitesse égal à G ou un gain de couple égal à $1/G$.
- ✓ les arbres de transmissions lent et rapide sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de représenter le modèle à deux masses simplifiées comme suit :

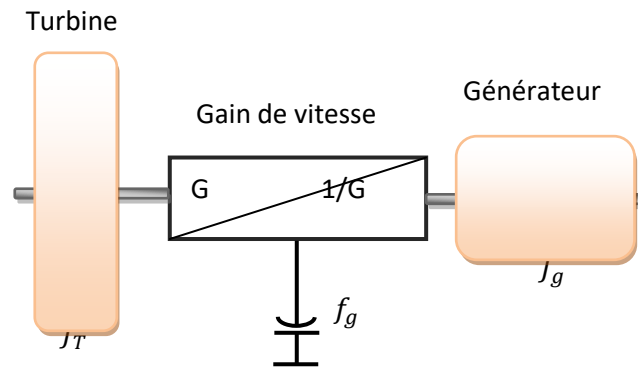


Figure II-6 : Modèle simplifié de la turbine.

Les équations mathématiques des paramètres physiques de ce modèle simplifié sont :

$$C_{Mec} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (\text{II. 11})$$

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (\text{II. 12})$$

Ou

C_T, C_{Mec}, C_g Sont respectivement : le couple de la turbine, le couple mécanique issu du multiplicateur et le couple électromagnétique généré par la génératrice ;

J_T, J_g . l'inertie de la turbine et celle du générateur ;

f_T, f_g . les coefficients des frottements visqueux respectivement de la turbine et de la génératrice ;

G - le rapport du multiplicateur de vitesse ;

Ω_g - la vitesse de rotation de la génératrice (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \qquad \frac{f_T}{G^2} + f_g = f$$

L'équation (II. 12) devient :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \tag{II. 13}$$

Ainsi, nous pouvons établir le schéma bloc de la turbine, figure (II-7).

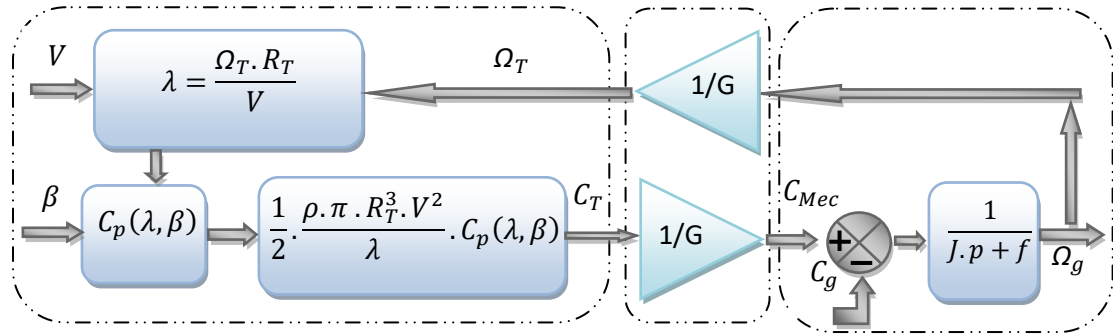


Figure II-7 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.2.2.1 CARACTERISTIQUE DE PUISSANCE

Dans la production d'énergie éolienne, chaque turbine est généralement caractérisée par une courbe qui trace la puissance convertie en fonction de la vitesse, et qui représente les différentes zones de fonctionnement pour répondre aux exigences de la commande.

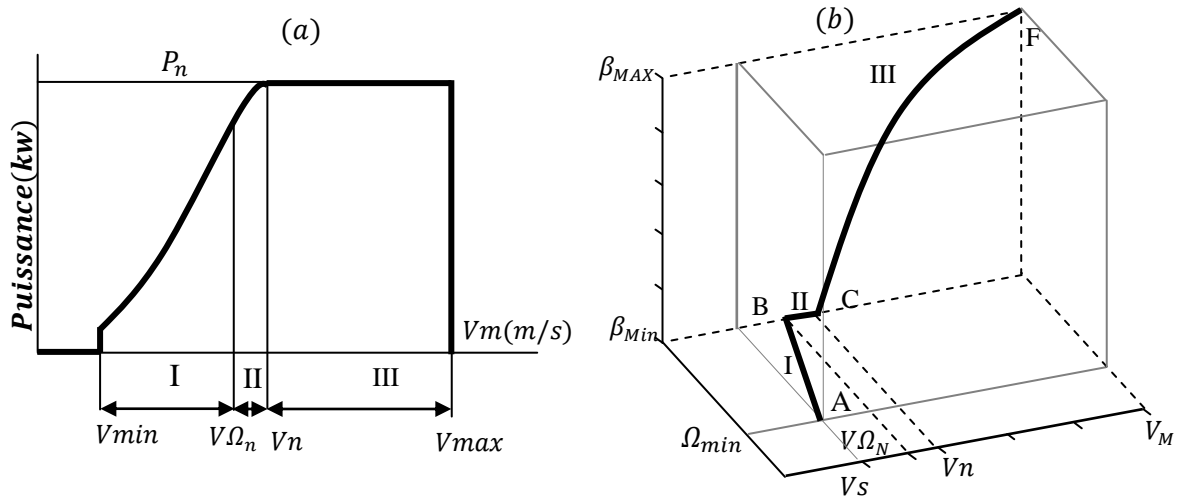


Figure II-8 : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.
 (a). dans le plan (V, P). (b). dans le plan (V, Ω, β).

Dans notre cas, la turbine est caractérisée par la courbe de la figure (II-8) qui représente trois zones de fonctionnements pour trois vitesses différentes exigeant des commandes distinctes [27].

- **Zone I** : correspond aux faibles vitesses du vent. La puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant les techniques de commandes appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking).
- **Zone II** : est une zone de transition entre la zone de charge partiel (Zone I) et la zone de charge nominale (Zone III). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits généré), qui ne nécessite pas de commande.
- **Zone III** : correspond aux fortes vitesses du vent. L'objectif dans cette zone est de limiter et maintenir la vitesse de la turbine à une vitesse qui assure une puissance égale à la puissance nominale de l'éolienne afin d'éviter les surcharges. La commande exigée est réalisée par action sur l'angle de calage des pales (Pitch Control).

II.2.2.2 COMMANDE DANS LA ZONE I (OPTIMISATION DE LA PUISSANCE)

Dans cette zone, le but de la commande est de maximiser l'énergie captée du vent pour extraire le maximum de puissance. Pour cela, les deux variables : angle de calage β et la vitesse spécifique λ doivent être maintenues à leurs valeurs optimales β_{opt} et λ_{opt} afin d'assurer un coefficient de puissance maximale (C_{pmax}). La technique utilisée dans ce cas est appelée technique *MPPT* (Maximum Power Point Tracking).

II.2.2.2.1 TECHNIQUES D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE (MPPT)

La technique MPPT est une méthode de contrôle de la puissance très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer et à maintenir la vitesse de la turbine à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Il existe deux façons pour appliquer cette technique selon le genre de la vitesse de référence qu'elle soit mesurée ou estimée.

Parmi les commandes utilisées, la commande en rapport de vitesse ainsi que la commande en puissance dites méthodes directes, ont besoin d'une vitesse de référence

mesurée qui est un inconvénient vu la difficulté d'avoir une mesure exacte et instantanée du vent. Par contre, la commande de vitesse de référence estimée dite méthode indirecte qu'on va appliquer dans notre cas est une méthode adéquate qui n'exige pas une mesure exacte, mais une simple estimation [27], [28].

II.2.2.2.2 COMMANDE INDIRECTE DE LA VITESSE

La mesure de la vitesse du vent est généralement faite par un anémomètre monté sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace sachant que le diamètre de la surface balayée par les pales est important, ce qui donne une mesure erronée de la vitesse donc une diminution de la puissance captée. C'est pourquoi, la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse et une estimation de cette dernière est souvent utilisée pour contourner ce problème [29].

La vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 14})$$

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Le couple optimal est :

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 15})$$

En remplaçant la vitesse du vent dans l'équation(II. 15), le couple optimal devient :

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_T^2 \quad (\text{II. 16})$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor :

$$C_{Topt} = k_{opt} \cdot \Omega_T^2 \quad (\text{II. 17})$$

Tel que :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (\text{II. 18})$$

En régime permanent, l'équation mécanique s'écrit sous la forme :

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (\text{II. 19})$$

En remplaçant (II. 17) dans l'équation(II. 19), l'équation mécanique devient :

$$\frac{k_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \quad (\text{II. 20})$$

Avec : $\Omega_g = G \cdot \Omega_T$

Si le couple électromagnétique C_g est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal, le couple devient un couple optimal C_{gopt} .

$$C_{gopt} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g \tag{II. 21}$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne. Le schéma bloc de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous [29].

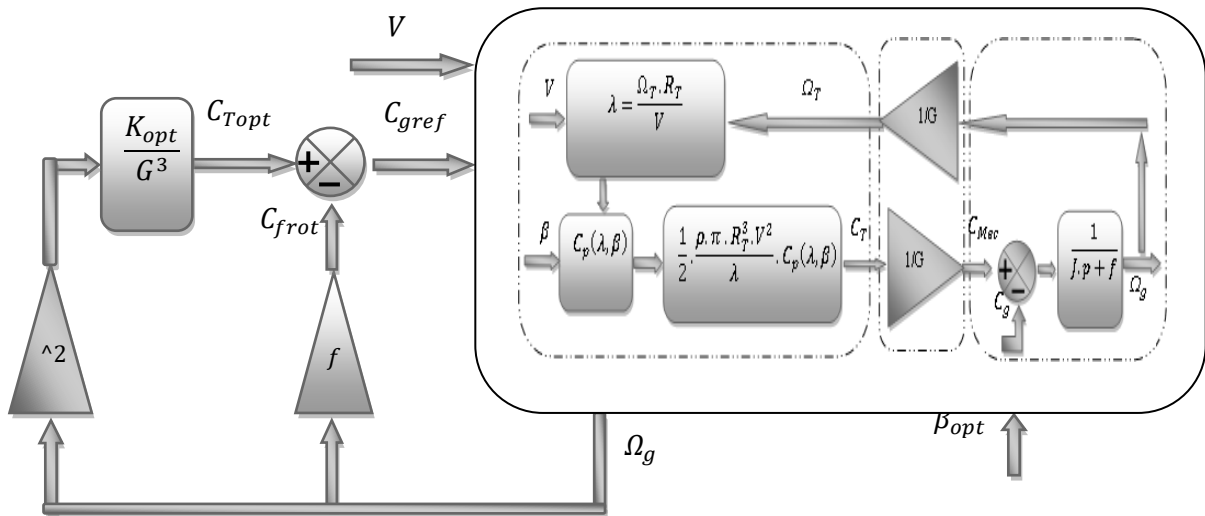


Figure II-9 : Commande indirecte de vitesse (Zone I).

II.2.2.3 COMMANDE DANS LA ZONE III (LIMITATION DE LA PUISSANCE)

Dans cette zone, la commande appliquée a pour objectif de limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale. Pour cela, nous avons deux méthodes à savoir :

- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent. Ce système est utilisé dans les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances.
- Un système d'orientation des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante. Ce système est utilisé dans les éoliennes à vitesse variable de moyennes et grandes et puissances [29].

II.2.2.3.1 SYSTEME D'ORIENTATION DES PALES

C'est un système qui joue sur l'angle β de calage des pales à une valeur de référence β_{ref} souhaitée. Le choix de cet angle est généralement utilisé pour régler la vitesse de la turbine et la puissance mécanique générée. Il existe plusieurs systèmes de réglages de l'angle de calage des pales. Ces systèmes sont, soit hydrauliques comme ceux utilisés dans les aérogénérateurs de moyennes puissances, soit des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe qui sont utilisés dans les aérogénérateurs de fortes puissances. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en faible vitesse du vent et s'inclinent pour des fortes vitesses du vent pour diminuer le coefficient de puissance [30].

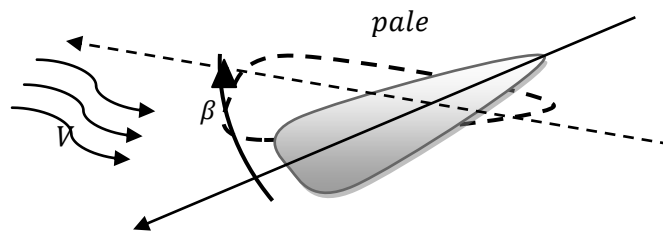


Figure II-10 : Orientation des pales.

Généralement, le système d'orientation des pales est approché par une fonction de transfert de 1^{er} ordre avec une constante de temps T_β . Lors de la modélisation de ce système, il est très important de modéliser la vitesse de variation de l'angle β qui doit être limitée aux environs de $10^\circ/s$ lors d'un fonctionnement normal et aux environs de $20^\circ/s$ pour des cas d'urgence [30,31].

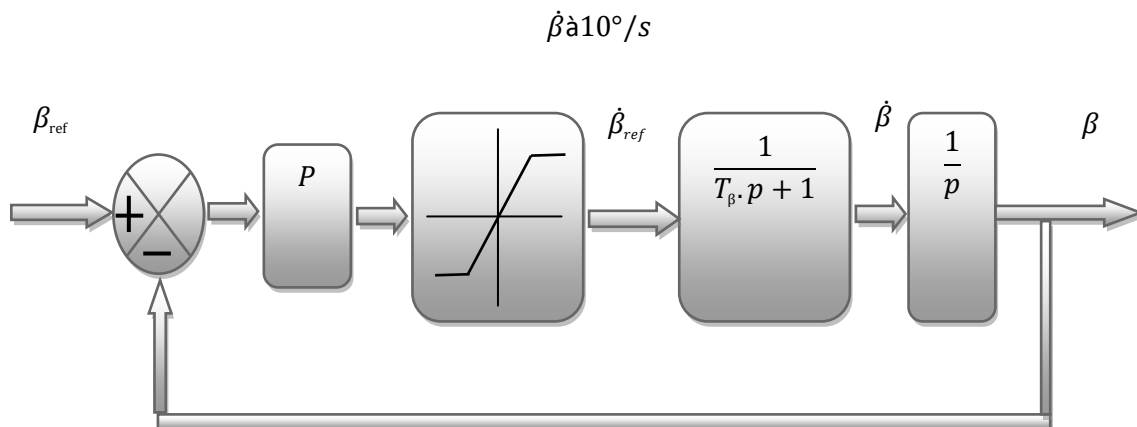


Figure II-11 : Schémas bloc du système d'orientation des pales.

II.2.2.3.2 REGULATION DU SYSTEMS D'ORIENTATION DES PALES « PITCH CONTROL »

Le but est de limiter et de maintenir la puissance active produite à sa valeur nominale P_{nom} afin de préserver tous les éléments de la chaîne éolienne autour de cette puissance. Une action sur l'angle de calage des pales permet de diminuer le coefficient de puissance et limiter ainsi la puissance convertie [32], [33].

Pour obtenir l'angle de référence β_{ref} , on corrige la puissance mesurée (générée) $P_{Gén}$ à celle de référence (nominale) P_{nom} en utilisant un correcteur (régulateur) de type PI, et pour obtenir la vitesse de variation de l'angle de référence $\dot{\beta}_{ref}$, on corrige l'angle de

Calage β à celui de référence β_{ref} déjà obtenu ; cette vitesse de référence $\dot{\beta}_{ref}$ sera limitée. On utilise un intégrateur $\frac{1}{p}$ pour obtenir l'angle de calage β , voir figure (II.12) [34].

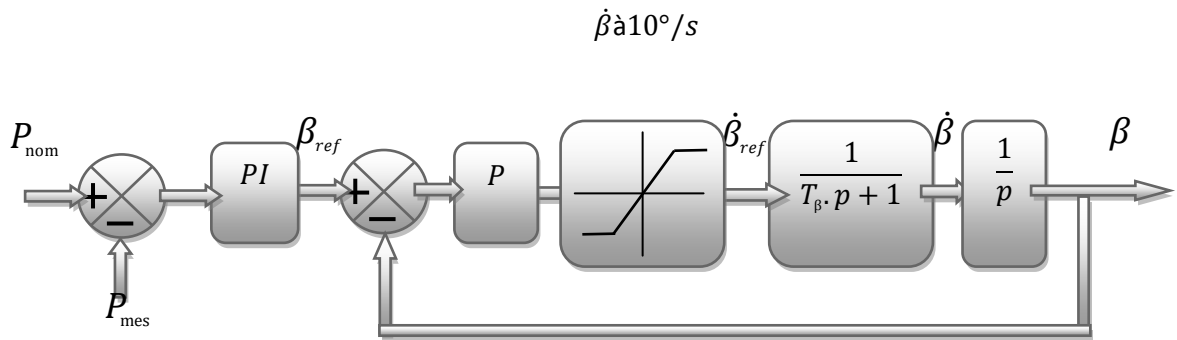


Figure II-12 : Schémas bloc de la commande de l'angle de calage des pales.

II.2.3 RESULTATS DE SIMULATION

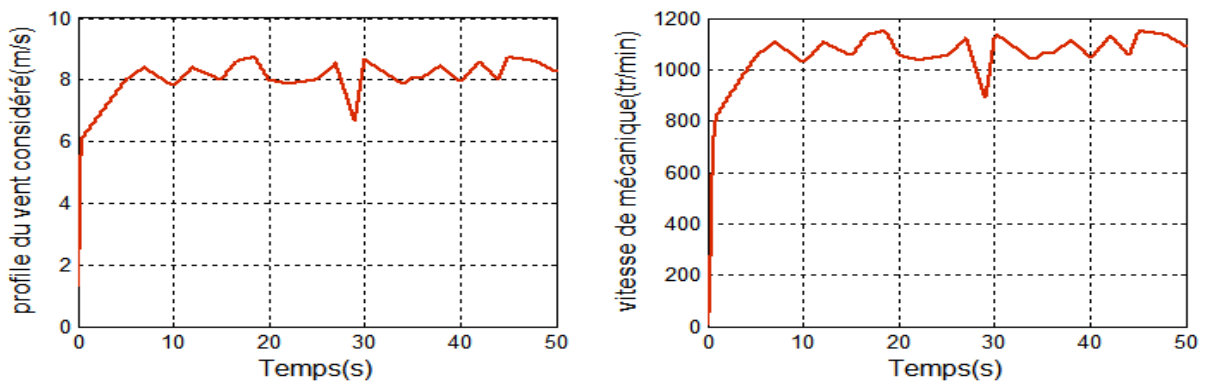


Figure II-13 : Profil du vent considéré, et la vitesse mécanique.

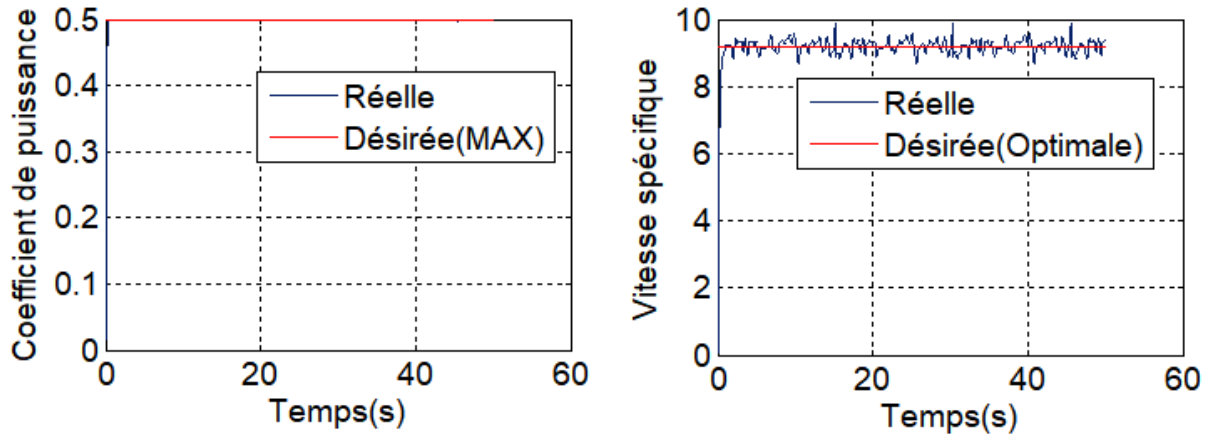


Figure II-14 : Coefficient de puissance et la vitesse spécifique.

II.2.4 INTERPRETATIONS DES RESULTATS

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité des deux commandes : sans asservissement de la vitesse du vent et pitch control. Les résultats de simulation montrent que la variation de la vitesse mécanique est adaptée à celle du vent. On remarque aussi que la vitesse spécifique suit la référence optimale imposée, et le coefficient de puissance suit le coefficient de puissance maximum souhaité. Le système d'orientation des pales a permis une limitation stricte de la puissance convertie pour bien protéger l'éolienne des éventuelles surcharges, figure (II.14).

II.3 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette machine, pour les différents régimes de fonctionnement, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle.

II.3.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Il est très difficile de modéliser la MADA vu sa structure et sa géométrie complexes, d'où la nécessité d'adopter certaines hypothèses qui permettent d'obtenir un modèle simple et le plus proche possible de la réalité. Ces hypothèses sont les suivantes [35]:

- La géométrie de la machine est symétrique, et l'épaisseur de l'entrefer est uniforme.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants. Les pertes par hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

- La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau et l'effet des encoches sont négligeables.
- Les résistances et les coefficients d'inductances propres sont constants et les enroulements ne dépendent pas de la température. Les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.

II.3.2 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (a, b, c)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. Par conséquent, elle a le même modèle que celui de la machine asynchrone à cage, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles [35], [36]

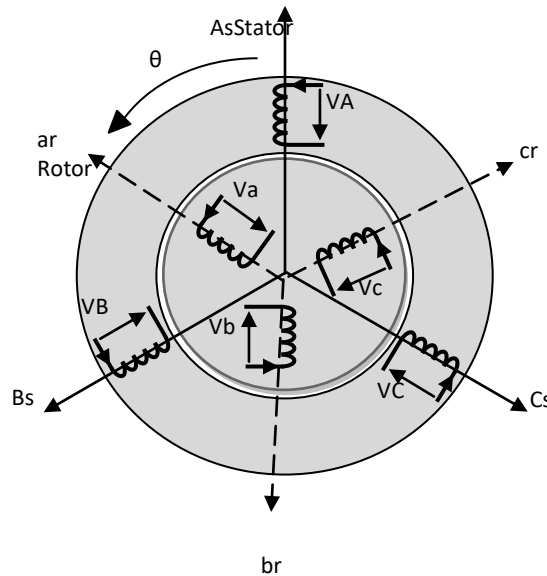


Figure II-15 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

II.3.2.1 EQUATIONS ELECTRIQUES

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont [37] :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\begin{aligned}
[V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; & [I_s] &= \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; & [\varphi_s] &= \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; & [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\
[V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; & [I_r] &= \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; & [\varphi_r] &= \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

V_s, V_r - les tensions simples statoriques et rotoriques.

I_s, I_r - les courants de phase statoriques et rotoriques.

φ_s, φ_r - les flux respectivement statoriques et rotoriques.

II.3.2.2 EQUATIONS MAGNETIQUES

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

Avec :

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

Où L_{ss}, L_{rr} sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s, M_r - les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$ - la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II. 24):

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 24})$$

M_{max} Est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.23) dans (II.22), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

II.3.2.3 EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II. 26})$$

Avec :

- C_{em} - le couple électromagnétique de la machine ;
- C_r - le couple résistant ;
- f_r - le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- Ω - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- J - l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II. 27})$$

où p - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les équations différentielles (II.25), (II.26) et (II.27) représentent le modèle de la MADA dans le repère (a, b, c) .

II.3.3 TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère (a, b, c)) à un système biphasé (repère (d, q)), et obtenir un système d'équation à coefficients constants [37].

La matrice de transformation de Park $P(\theta)$ est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

$[P(\theta)]$ permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.

θ - l'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

II.3.4 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (d, q)

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)]. [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}. [x_{dq0}]$$

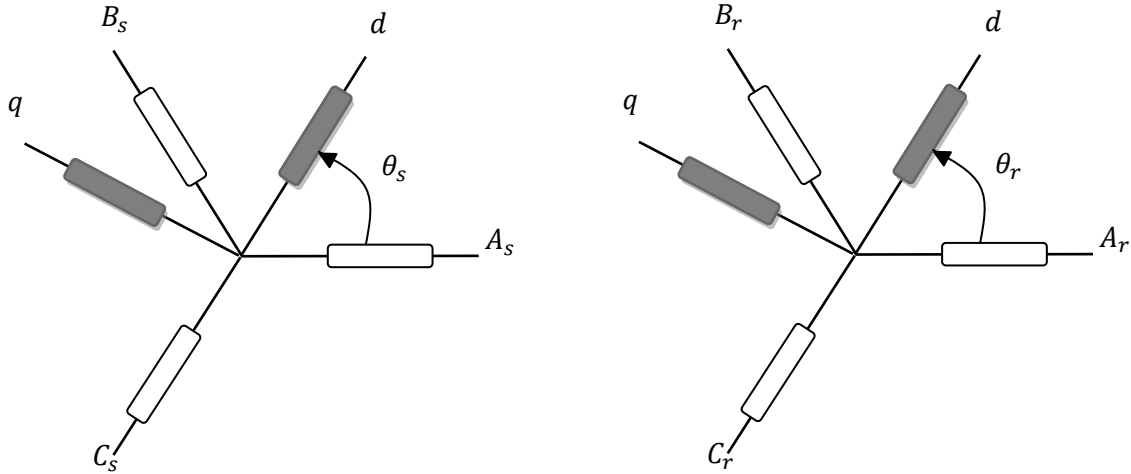


Figure II-16 : Transformation des variables statoriques et rotoriques.

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques nous donne :

$$\begin{aligned} [V_{sdq0}] &= [P(\theta_s)]. [V_{sabc}] \Rightarrow [V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}. [V_{sdq0}] \\ [I_{sdq0}] &= [P(\theta_s)]. [I_{sabc}] \Rightarrow [I_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}. [I_{sdq0}] \\ [\varphi_{sdq0}] &= [P(\theta_s)]. [\varphi_{sabc}] \Rightarrow [\varphi_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}. [\varphi_{sdq0}] \end{aligned}$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques nous donne :

$$\begin{aligned} [V_{rdq0}] &= [P(\theta_r)]. [V_{rabc}] \Rightarrow [V_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}. [V_{rdq0}] \\ [I_{rdq0}] &= [P(\theta_r)]. [I_{rabc}] \Rightarrow [I_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}. [I_{rdq0}] \\ [\varphi_{rdq0}] &= [P(\theta_r)]. [\varphi_{rabc}] \Rightarrow [\varphi_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}. [\varphi_{rdq0}] \end{aligned}$$

II.3.4.1 EQUATIONS ELECTRIQUES

En appliquant la transformation de Park dans l'équation (II.22), on obtient :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] \right] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] \right] \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

$$\begin{cases} [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [I_{sdq0}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] \right] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sdq0}] \\ [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [I_{rdq0}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] \right] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, on peut écrire [37]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} et V_{rq} : sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques et rotoriques;

I_{sd} , I_{sq} , I_{rd} et I_{rq} : sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques;

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} et φ_{rq} : sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système ;

w_s , w_r : sont les pulsations statorique et rotorique;

θ_s , θ_r : sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

II.3.4.2 EQUATIONS MAGNETIQUES

De la même manière, les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{s_{dq0}}] = [L_{ss}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{r_{dq0}}] = [L_{rr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] + [M_{rs}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

Donc, on peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Avec :

- L_r, L_s : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine;
- M : l'inductance mutuelle.

II.3.4.3 EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II. 34})$$

Avec p - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances active et réactive statoriques sont :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

II.3.5 CHOIX DE REPERE DE REFERENCE DE PARK

Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [37] :

- ✓ le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -w$ Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.

- ✓ le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où: $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = w$. Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- ✓ le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où: $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = w_s = w_r + w$. Dans ce repère, les composantes relatives de la machine sont constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

II.3.6 MODELE D'ETAT DE LA MADA

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit [37].

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (\text{II. 36})$$

$$\text{avec : } [X] = [\varphi_{sd} \quad \varphi_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^t$$

$$[U] = [v_{sd} \quad v_{sq} \quad v_{rd} \quad v_{rq}]^t$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

α, β et δ sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r}; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r}; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3] \quad (\text{II. 37})$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

II.3.7 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 4 KW pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur a été exécutée à l'aide du logiciel MATLAB. Son modèle est basé sur les équations obtenues au moyen de la transformation de Park, (repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous.

II.3.7.1 FONCTIONNEMENT MOTEUR

Les figures II-17 et II-18 montrent les caractéristiques de la vitesse, du couple et des composantes du flux statorique. Le rotor de la machine est en court-circuit.

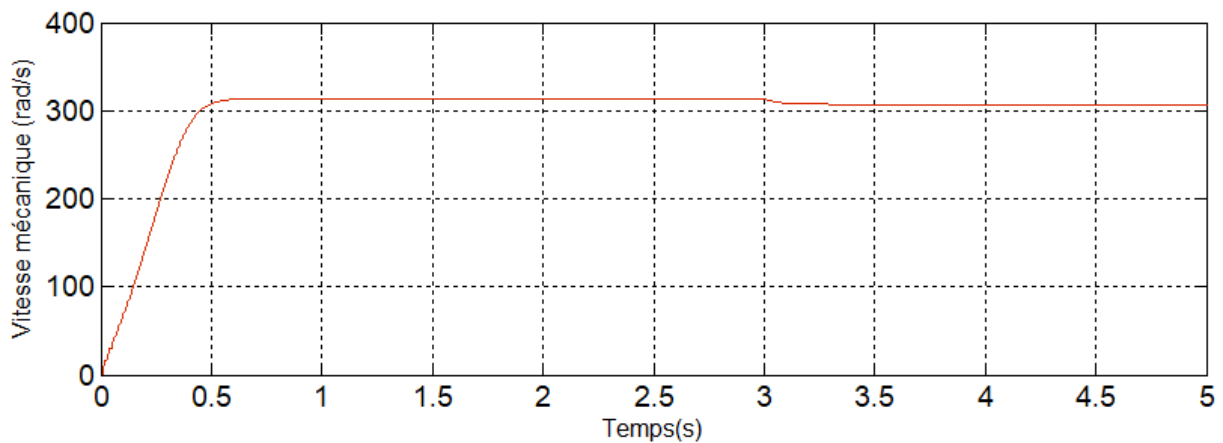


Figure II-17 : Vitesse mécanique.

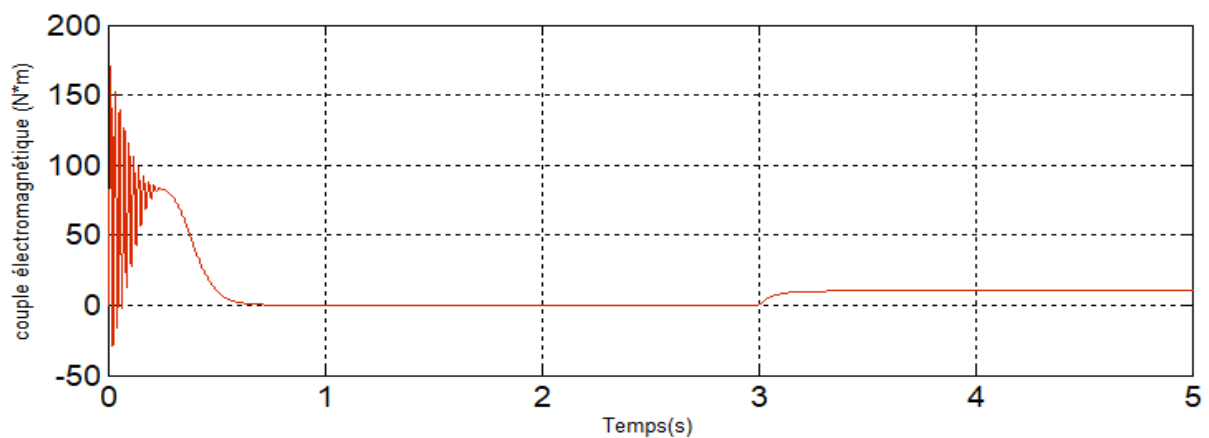


Figure II-18 : Le couple électromagnétique.

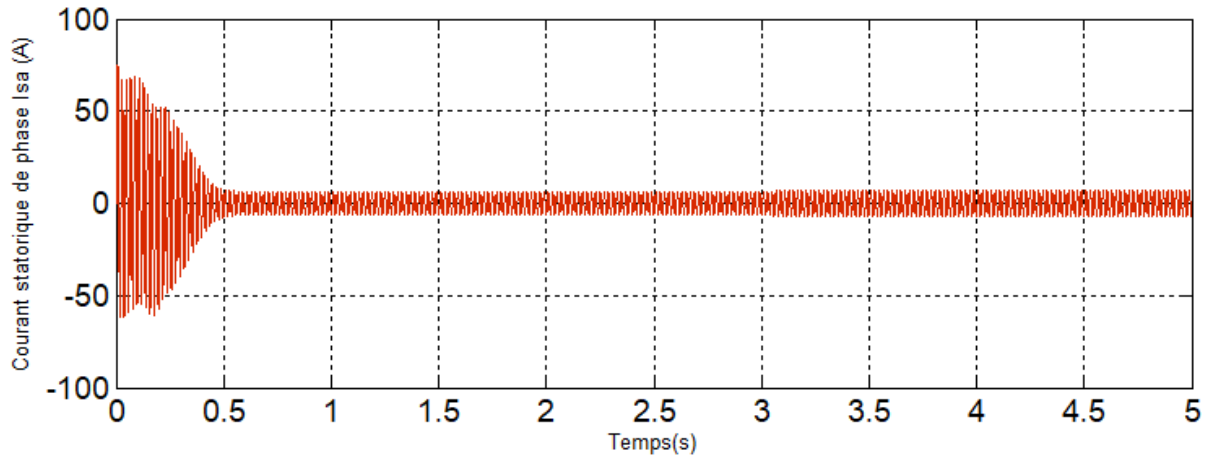


Figure II-19 : Composantes du courant statorique.

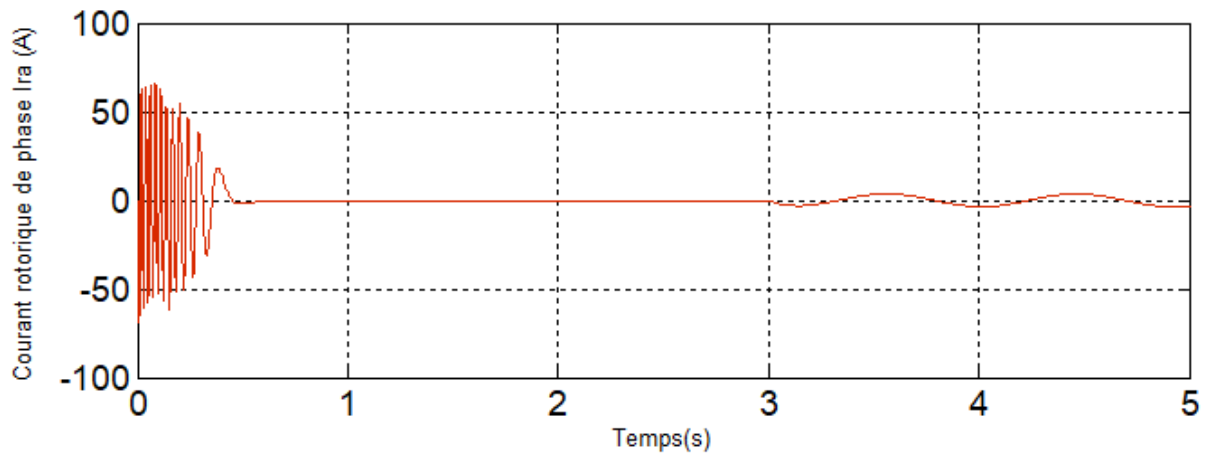


Figure II-20 : Composante du courant rotorique.

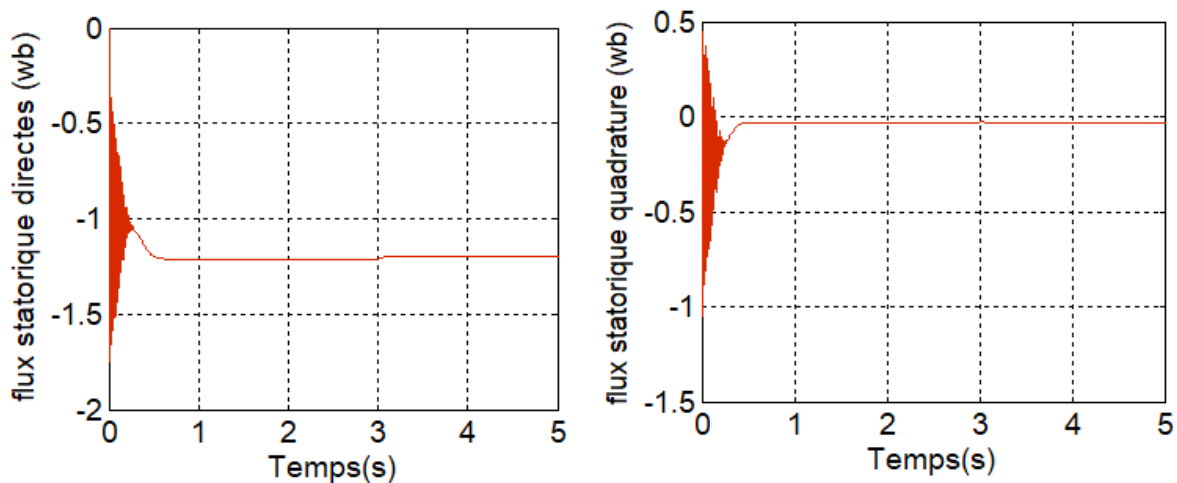


Figure II-21 : Composantes des flux statorique directe et quadrature.

II.3.7.2 INTERPRÉTATION DES RESULTATS

Initialement, la simulation s'effectue par un démarrage à vide de la machine. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine.

Dès que la machine atteint son régime permanent, sa vitesse de rotation se rapproche de la vitesse du synchronisme (un très faible glissement), (Figure II.17). Les fréquences des courants statorique, (figure II.19), et le courant rotoriques deviennent presque nulles, (Figure II.20). De plus, le couple électromagnétique (figure II.18) et les courants rotoriques se stabilisent à des valeurs proches de zéro (présence de frottements visqueux).

L'application d'un couple résistant se traduit par des augmentations du couple électromagnétique, d'amplitudes des courants statoriques et rotoriques et une diminution de la vitesse de rotation à cause du glissement qui devient plus important. La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone.

II.3.7.3 FONCTIONNEMENT GENERATEUR

La machine est entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min.

Le stator est alimenté par une source triphasée de 220V de fréquence 50Hz, alors que le rotor est alimenté par une source triphasée 12V de fréquence égale à la fréquence de rotation.

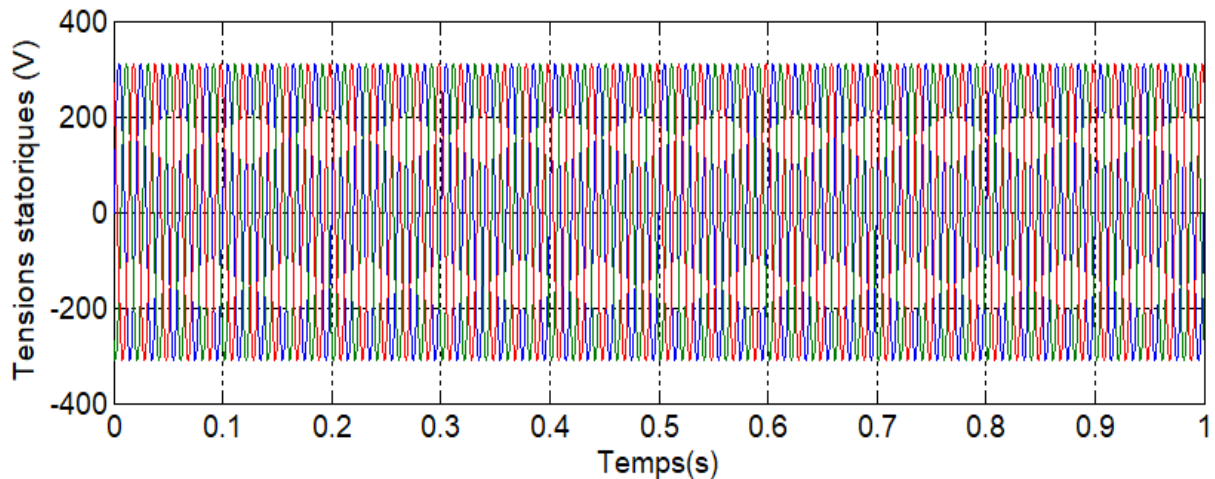


Figure II-22 : Les tensions d'alimentations au stator

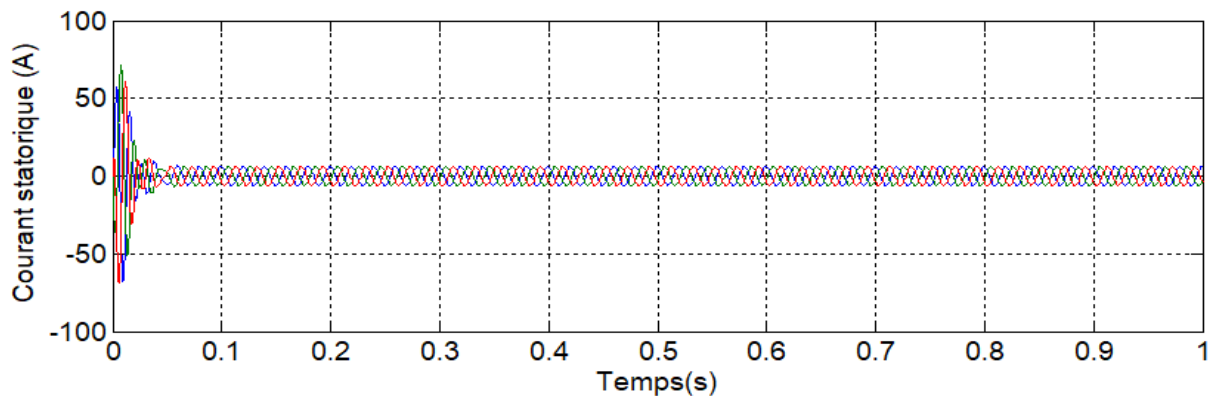


Figure II-23 : Les courants statoriques triphasés.

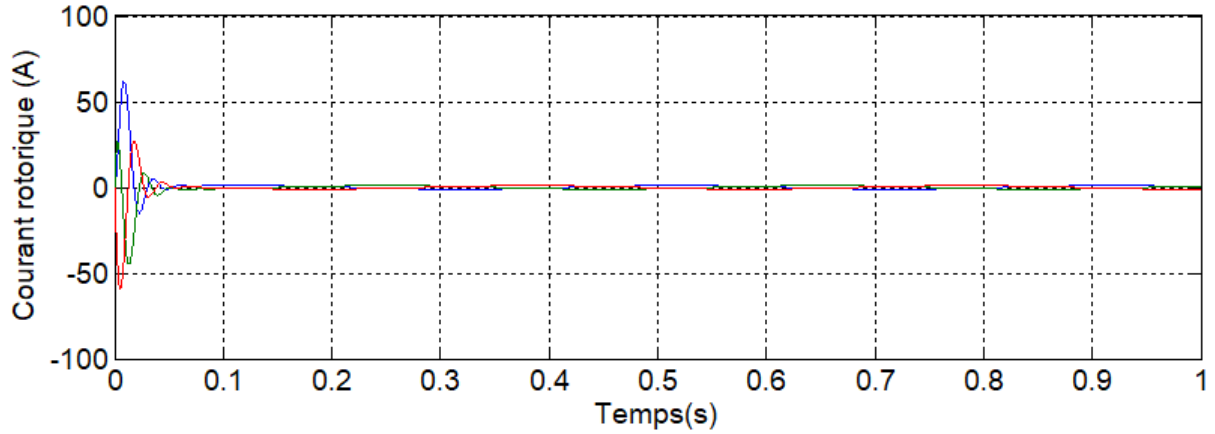


Figure II-24 : Les courants rotoriques triphasés.

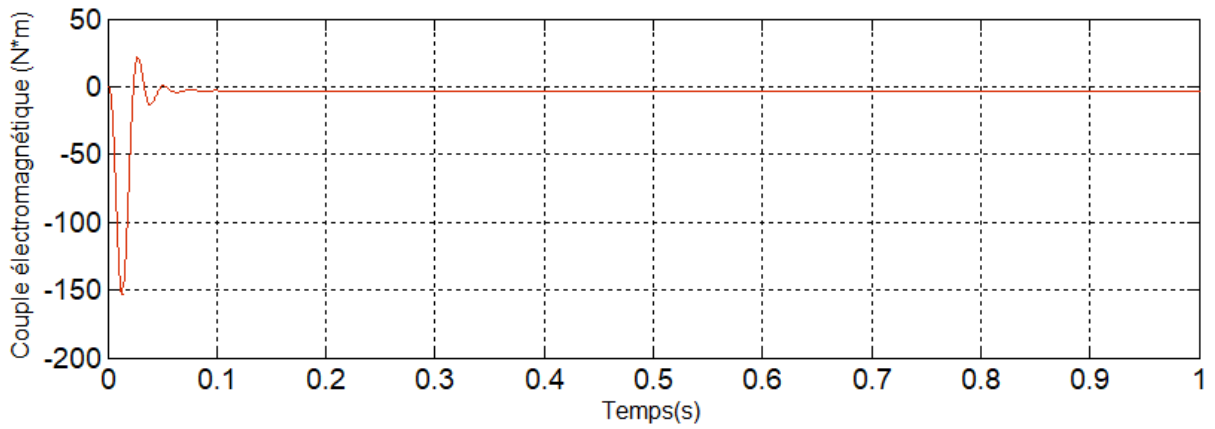


Figure II-25 : Le couple électromagnétique.

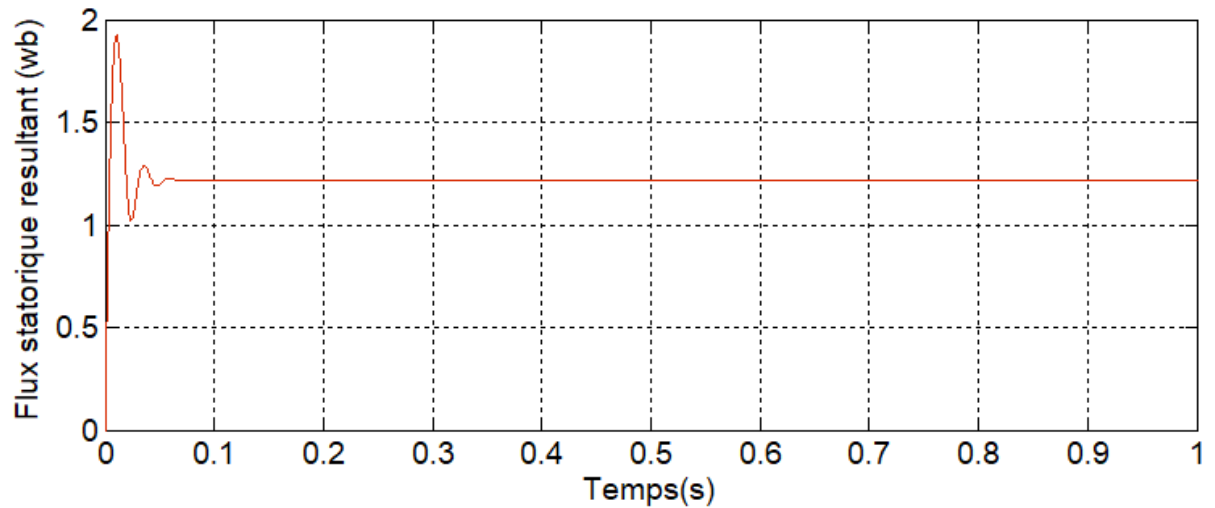


Figure II-26 : Le flux statorique résultant.

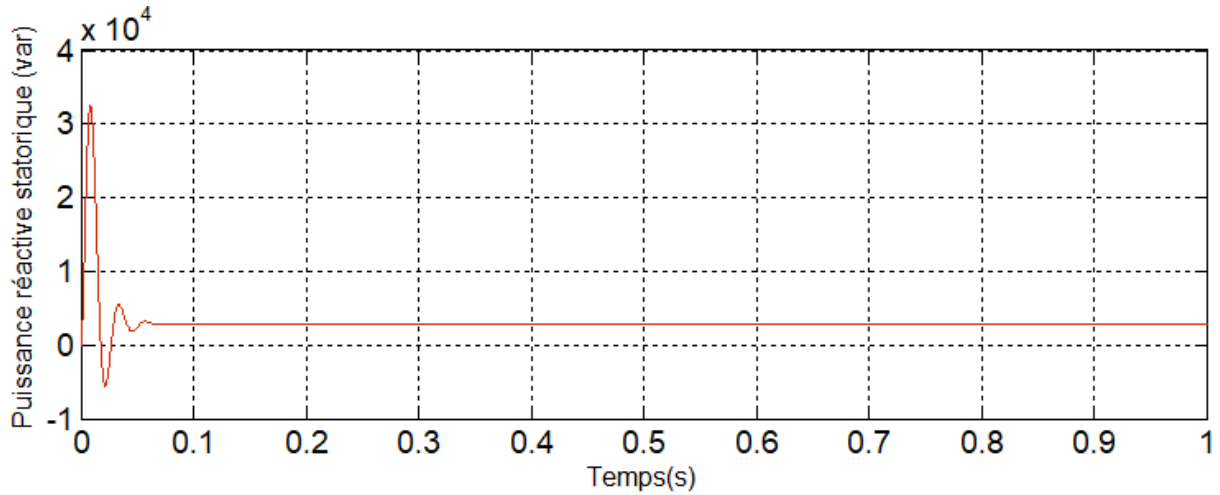


Figure II-27 : La puissance réactive statoriques.

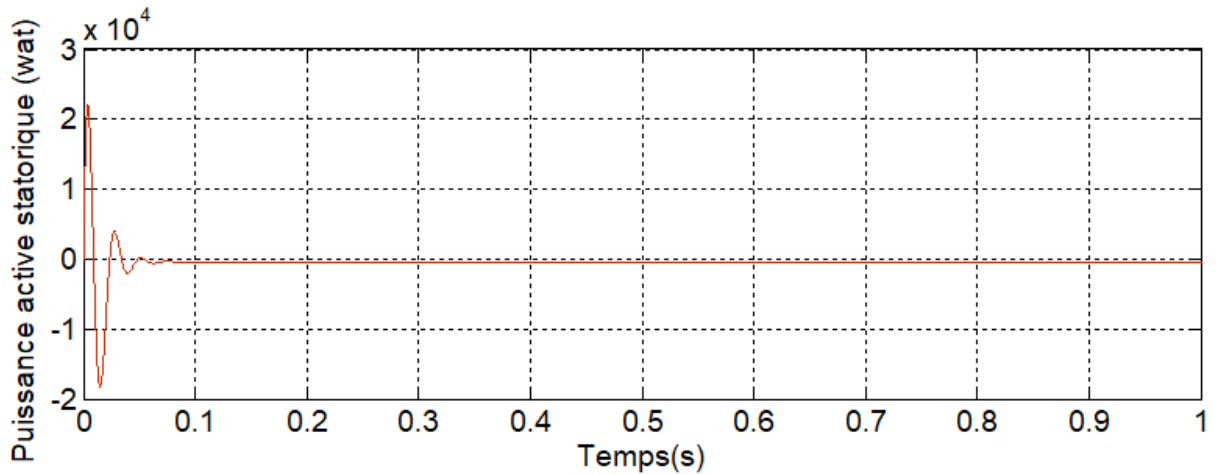


Figure II-28 : La puissance active statoriques.

II.3.7.4 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif et atteint au démarrage une valeur maximale de $-120 N.m$. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage. Après un temps égal aux environs de $0,05s$, ces courants se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de $50 Hz$.

II.4 MODELISATION ET COMMANDE DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL

Puisque notre étude est basée sur la structure de scherbius avec convertisseurs MLI présentée auparavant, les deux convertisseurs à deux niveaux bidirectionnels en puissance seront interposés entre le rotor de la machine et le réseau. L'utilisation de ce type de

convertisseurs permet d'obtenir des signaux de sortie modulés en largeur d'impulsion qui permettent de limiter les perturbations harmoniques.

Plusieurs études récentes montrent la fiabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique permet le fonctionnement en Hypo-synchrone ainsi que le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Le convertisseur est alors dimensionné pour fonctionner au tiers de la puissance nominale de la machine si le glissement reste inférieur à 30% autour du synchronisme.

II.4.1 MODELISATION ET TECHNIQUE DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE MACHINE

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable à base d'une MADA nécessitent l'utilisation d'un convertisseur statique (onduleur) qui alimente le rotor de la machine. Les principaux objectifs de ce convertisseur sont : onduler la tension du bus continu pour la fournir au bobinage du rotor, permettre l'application des commandes pour contrôler les puissances générées par le stator de cette machine et les injecter au réseau.

II.4.1.1 MODELISATION DU CONVERTISSEUR COTE MACHINE

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux. Cet onduleur est équipé de plusieurs dispositifs de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture qui peuvent être soit des transistors MOSFET ou des IGBT associés à des diodes en tête bêche.

On admet que les six interrupteurs électroniques représentés ci-dessous, figure (II. 29. A), sont parfaits, et en remplaçant chaque groupe de transistor-diode de la figure (II. 29. A) par des interrupteurs k_j avec ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), on obtient le schéma simplifié comme indiqué sur la figure (II. 29. B)[37], [38].

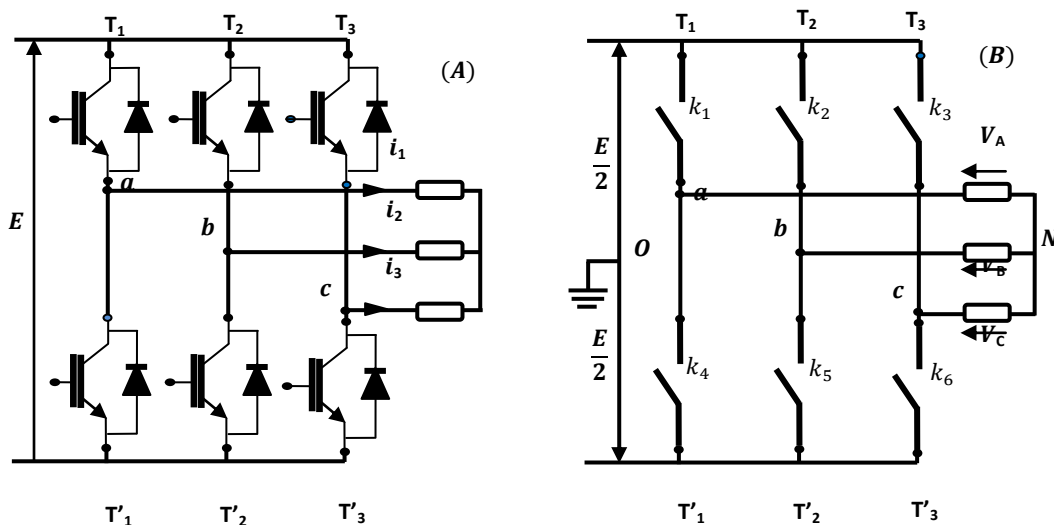


Figure II-29 : Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude, nous supposons que :

- ✓ Le couplage est du type étoile sans neutre.
- ✓ Les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminées.
- ✓ Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré.

Les équations des tensions simples aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{III. 38})$$

Par addition, on a : $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON}$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$\text{donc :} \quad V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON} = 0 \quad (\text{II. 39})$$

$$\text{d'où :} \quad V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{II. 40})$$

En remplaçant (II. 39) dans (II. 38), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II. 41})$$

On peut écrire le système (II. 41) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

Grâce à l'ouverture et la fermeture successives des interrupteurs, l'onduleur génère une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires.

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

En remplaçant (II. 43) dans (II. 42), on aura le système suivant [37] :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

Le système (II. 45) représente le modèle mathématique de l'onduleur MLI triphasé à deux niveaux.

II.4.1.2 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

L'objectif principal de la commande MLI consiste à comparer instantanément chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer à un signal triangulaire de haute fréquence que nous appellerons porteuse.

Les impulsions des commandes (S_1, S_2, S_3) de l'onduleur sont les intersections entre les ondes modulantes (de références) avec l'onde triangulaire (porteuse). La comparaison entre les ondes de références et l'onde triangulaire détermine l'état des interrupteurs du circuit de puissance (ouverture et fermeture), Figure II-30 [37].

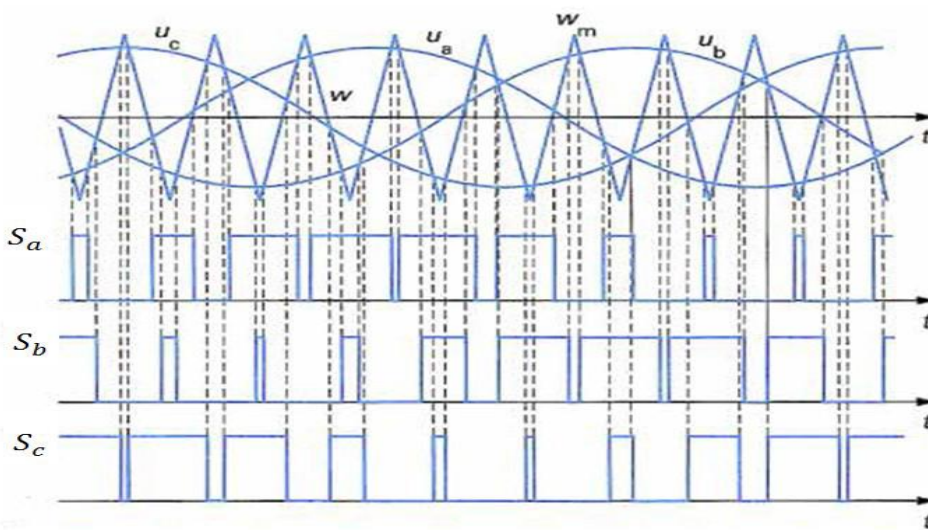


Figure II-30 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.

Cette commande est caractérisée par deux paramètres :

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

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II. 46})$$

- Le taux de modulation r qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} et celle de la porteuse U_p :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II. 47})$$

Si m est un multiple de trois nous pouvons éliminer les harmoniques d'ordre trois qui causent les majeurs inconvénients de cette technique.

II.4.2 MODELISATION ET TECHNIQUE DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU

Plusieurs topologies dans le système de conversion d'énergie éolienne utilisent le redresseur à MLI pour la connexion sur le réseau électrique. Le redresseur a la même conception que celle de l'onduleur précédemment établi. L'avantage de convertisseur côté réseau, en plus de la bidirectionnalité de puissance, permet le contrôle de la puissance active en maintenant la tension du bus continu constante, et fixer la puissance réactive de référence à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau (facteur de puissance du réseau unitaire).

II.4.2.1 MODELISATION DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU

Le convertisseur côté réseau a la même conception que le convertisseur côté machine présentée précédemment.

- L l'inductance (L) et la résistance (R) représentent l'impédance de ligne.
- V représente la tension de ligne.
- U_c la tension de sortie redressée. La figure (II.31) représente la structure d'un redresseur à MLI triphasé, qui peut être décomposé en trois parties : La source, le convertisseur et la charge [37].

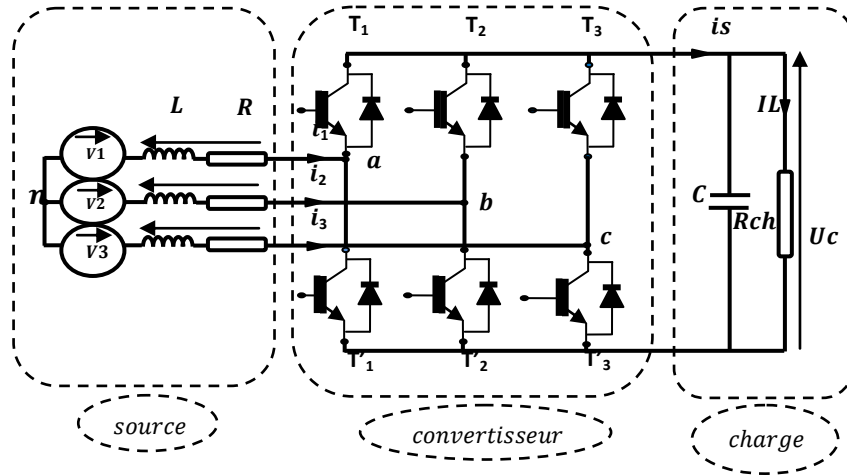


Figure II-31 : Structure du redresseur à MLI.

➤ **La source d'alimentation**

C'est une source triphasée supposée parfaitement sinusoïdale et équilibrée en série avec une résistance R et une inductance L représentant respectivement la résistance et l'inductance totales de la ligne [37], [39].

Les tensions de lignes sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = R * i_1 + L \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = R * i_2 + L \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = R * i_3 + L \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (II. 48)$$

Où V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur. Les courants de chaque phase sont donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (II. 49)$$

➤ **Partie Convertisseur**

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation (II. 42) [37]

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \tag{II. 50}$$

De plus, le courant redressé est donné par :

$$i_s = [S_1 S_2 S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \tag{II. 51}$$

➤ **Partie charge**

Cette partie est constituée d'une capacité C en parallèle avec une résistance R qui représente une charge continue. Elle est régie par les deux équations électriques suivantes [40] :

$$\begin{cases} \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_{ch}) \\ U_C = R_{ch} \cdot i_{ch} \end{cases} \tag{II. 52}$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\frac{U_C}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch} \cdot C \cdot p} \tag{II. 53}$$

A partir des relations (II. 49), (II. 50), (II. 51) et (II. 53), on peut établir le schéma fonctionnel global d'un redresseur MLI ayant comme entrée la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (S_1, S_2, S_3) et comme sortie la tension redressée U_C .

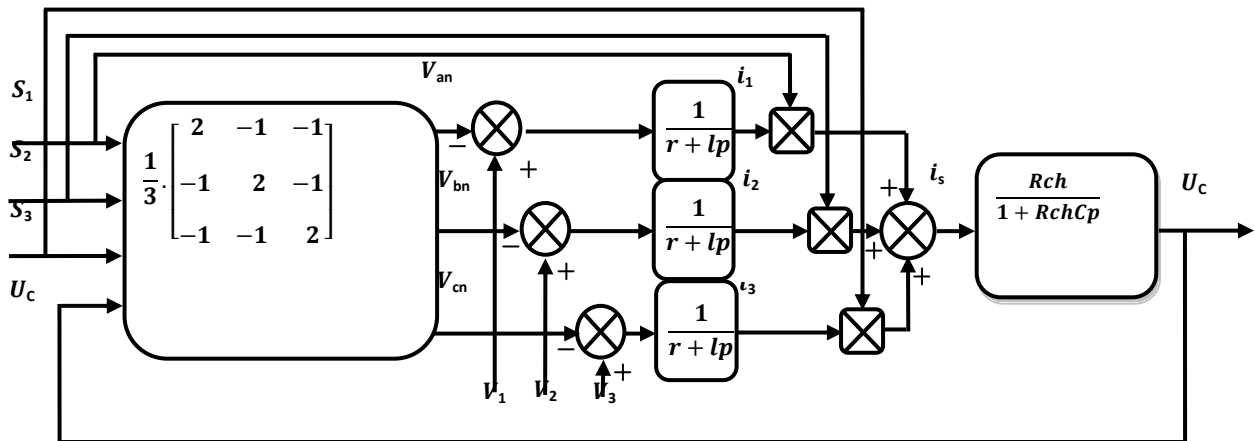


Figure II-32 : Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.

II.4.2.2 CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU

L'objectif de la commande de convertisseur côté réseau et de contrôler deux grandeurs importantes à savoir :

- ✓ Maintenir la tension du bus continu à une valeur de référence désirée. Pour accomplir cette tâche, on doit mesurer la tension de bus continu et la régler à une valeur de référence.
- ✓ Maintenir la puissance réactive de référence à une valeur nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire.

La régulation du redresseur MLI peut se faire sous la forme d'une régulation cascade. Deux boucles internes régulent les courants des phases. Une boucle externe régule la tension de capacité, (Figure II.32).

II.4.2.3 LA COMMANDE EN COURANT DU REDRESSEUR A MLI DANS LE REPERE (d, q)

Le correcteur PI n'est pas bien adapté pour commander des signaux alternatifs, la même chose pour le correcteur à hystérésis qui produit une fréquence de commutation variable. L'utilisation de ces régulateurs en triphasé nécessite plusieurs capteurs de courant et de tension. Afin d'éviter ces inconvénients, on utilise des correcteurs PI dans un repère tournant (repère d, q). La commande en courant dans ce repère est basée sur la séparation des axes l'un de l'autres, ce qui permet de les contrôler indépendamment. Cette technique de commande à l'avantage de réduire le nombre de régulateurs ainsi que les grandeurs régulées qui seront des grandeurs continues [37].

Application de la commande

Cette commande appliquée sur les tensions de lignes, est utilisée pour permettre un découplage entre le contrôle des puissances active et réactive. Les équations régissant les tensions de lignes dans le repère (d, q) sont :

$$\begin{cases} V_{pd} = V_d - R i_d - L \frac{di_d}{dt} + L\omega i_q \\ V_{pq} = V_q - R i_q - L \frac{di_q}{dt} - L\omega i_d \end{cases} \quad (\text{II. 54})$$

V_{pd} Et V_{pq} : sont les composantes des tensions à l'entrée du convertisseur.

V_d Et V_q : sont les composantes des tensions du réseau.

i_d Et i_q : sont les composantes des courants du réseau.

ω : est la pulsation du réseau.

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \cdot [V_d I_d + V_q I_q] \\ Q = \frac{3}{2} \cdot [V_q I_d - V_d I_q] \end{cases} \quad (\text{II. 55})$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 56})$$

On pose : $P_{ref} = U_{cmes} I_{red_ref}$ et $Q_{ref} = 0$.

- La tension de référence désirée du bus continu U_{cref} est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur U_{cmes} .
- Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) permet de maintenir la tension de bus continu à une valeur constante désirée, et génér le courant de référence I_{cref} .
- La puissance active nécessaire pour charger ce condensateur P_{ref} est obtenue on multipliant le courant redressé I_{red_ref} par la tension mesurée U_{cmes} .
- La puissance réactive de référence Q_{ref} sera maintenue nulle.
- Les courants de références sont obtenus à partir des tensions mesurées et des puissances de références.
- Les courants de références seront comparés avec les courants mesurés.
- Les erreurs de comparaison des courants sont réglées par des régulateurs PI qui génèrent des tensions de références qui seront comparées à leur tour avec les tensions mesurées.
- Les erreurs de comparaisons des tensions génèrent des tensions qui seront comparées à leur tour avec les tensions du filtre.
- les erreurs de comparaisons des courants génèrent des tensions de commande employées pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. Le schéma bloc de la régulation est alors représenté par la figure ci-dessous [33].

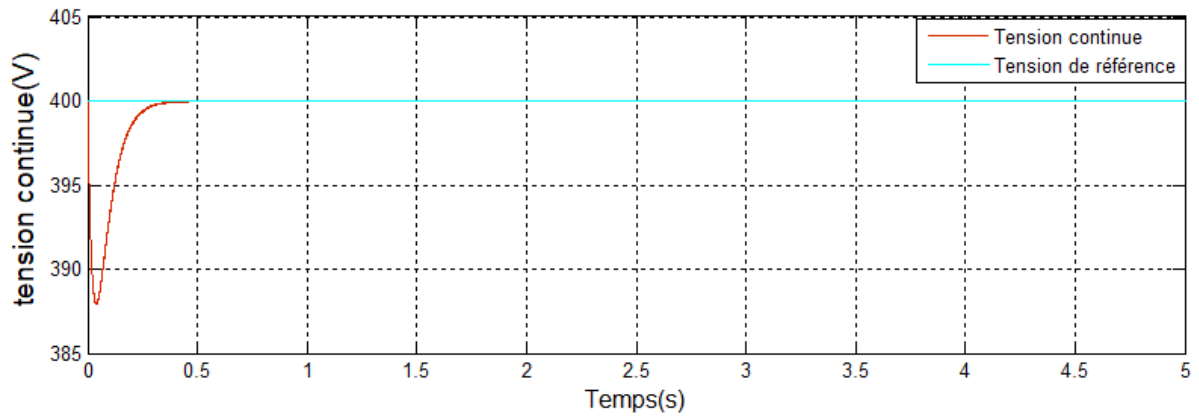


Figure II-36 : Tension du bus continu.

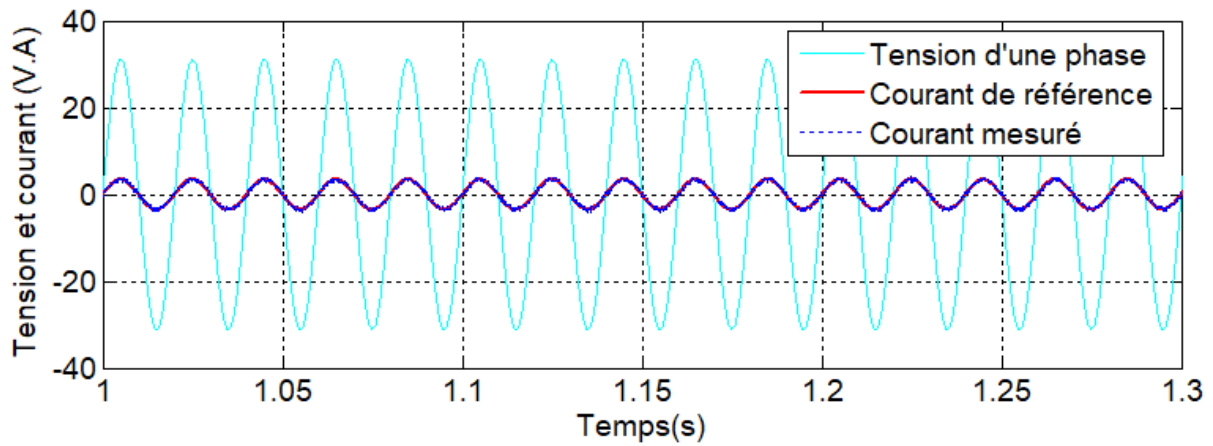


Figure II-37 : Courant et tension de ligne.

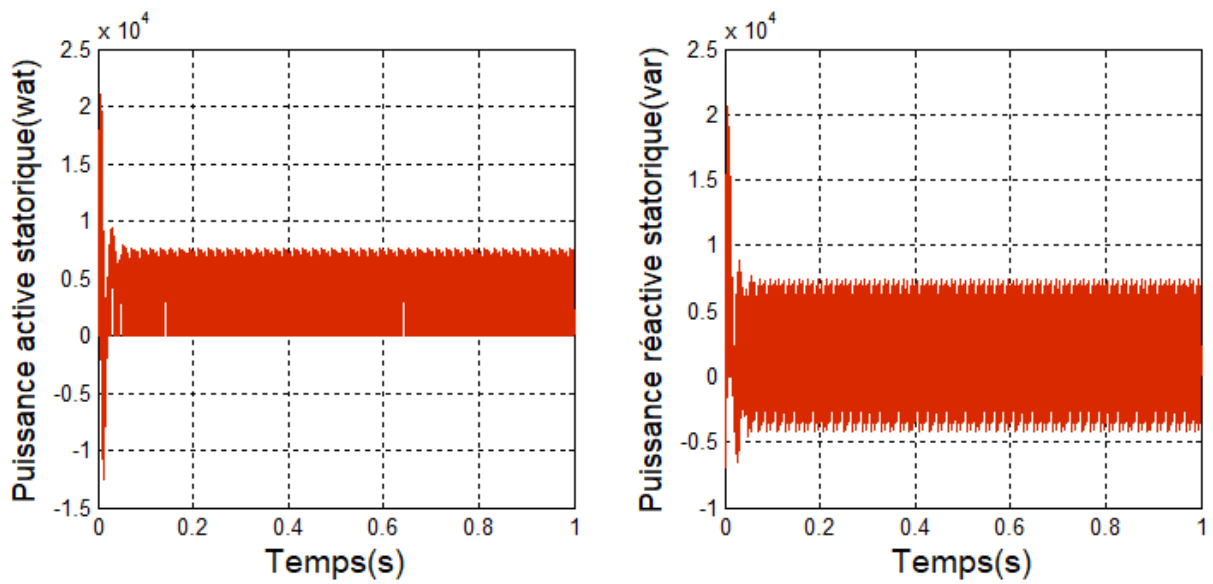


Figure II-38 : Les puissances active et réactive statorique avec convertisseur.

III.4.3.1 INTERPRETATION DES RESULTATS

On remarque que la tension de la sortie de l'onduleur a une forme d'onde périodique non sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée (Figure II-33). Il est clair que la tension continue suit l'allure de la tension de référence imposée (Figure II-34). De plus, les courants de lignes suivent parfaitement les allures des courants de références qui ont des formes sinusoïdales, et qui sont en position de phase par rapport à la tension de ligne, (Figure II-35).

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de la commande en courant dans le repère (d, q) du convertisseur côté réseau pour la réduction des harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance.

II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable séparément. Cette chaîne qui est constituée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor via deux convertisseurs de puissances bidirectionnelles fonctionnant en MLI et reliés au réseau.

Nous avons entamé notre travail par la modélisation de la turbine éolienne et ses deux commandes, la MPPT indirecte pour maximiser le capteur de puissance pendant les faibles vitesses du vent et le "pitch control" pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses du vent.

Par la suite, nous avons modélisé, dans une première étape, la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle, puis, dans une seconde étape, l'onduleur qui alimente le rotor de la MADA permettant ainsi l'application des commandes pour contrôler les puissances générées par le stator de la machine.

Enfin, on est passé à la modélisation de l'alimentation de l'onduleur qui est un redresseur triphasé, ainsi qu'à sa commande et le maintenir à une valeur constante dans le but d'améliorer le facteur de puissance du côté réseau.

CHAPITRE III

**ASPECT THEORIQUE DES
LOIS DE COMMANDE**

III.1 INTRODUCTION

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique [37]. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre nous allons traiter théoriquement Les différentes techniques de commande non linéaire et linéaire appliqué sur le système complet est sont les suivantes :

- Commande vectorielle à base des régulateurs PI.
- Commande par mode glissant à base des gains.

Le choix de ces différentes techniques de commande non linéaire n'est pas fortuit considérant les avantages majeurs qu'elles peuvent nous assurer à savoir :

1. La stabilité au sens de Lyapunov.
2. La robustesse et la dynamique de système.
3. la prise en considération de tous les non linéarités du système.

III.2 COMMANDE VECTORIELLE

Grâce au développement de l'électronique de puissance et de l'informatique, les systèmes d'entraînement à machine asynchrone (MAS) sont devenus aussi performants que ceux utilisant la machine à courant continu (MCC). La commande de ces derniers permet de réaliser de hautes performances dynamiques, essentiellement, dues à la propriété d'orthogonalité naturelle entre les commandes en flux et en couple qui deviennent découplés et contrôlables indépendamment. En effet, le courant inducteur est producteur de flux et le courant induit est producteur de couple. Cependant la présence du système balais-collecteur dans la MCC a toujours été un grand inconvénient et qui représente, désormais, son point faible en dépit de sa facilité de commande. En effet, ce commutateur mécanique limite la puissance, la vitesse et exige une maintenance importante interdisant son l'utilisation dans certains domaines hostiles. Au contrario, ces inconvénients se trouvent totalement éliminés dans la machine à induction de par son principe de fonctionnement reposant le phénomène d'induction par champ tournant sans nécessité de contact frottant entre les deux armatures en mouvement relatif. Cette qualité va dans le sens de l'amélioration de sa robustesse et de sa

fiabilité. En revanche, il demeure que cette machine est tributaire de son modèle mathématique, qui est un modèle non linéaire et fortement couplé se prêtant mal à être utilisé pour l'élaboration des lois de commandes linéaires éprouvées à l'instar de la MCC à excitation séparée. La commande vectorielle, dont la théorie est développée par Blachke en 1971, a pour but de donner à la machine à induction (même la machine synchrone) des performances similaires que celles obtenues par la MCC à excitation indépendante. Cette analogie étant réalisée pour la machine à courant alternatif lorsque son modèle, plutôt en courant, est observé dans un référentiel tournant avec le flux (flux orienté) ou simplement en considérant le référentiel lié au champ tournant. Ainsi les grandeurs du modèle deviennent totalement démodulées, i.e. continues. La figure (III.1) montre que Les composantes du courant statorique I_{ds} , I_{qs} sont des grandeurs continues analogues à I_f et I_a de la MCC. A flux constant, on fixe I_{ds} et on varie I_{qs} .

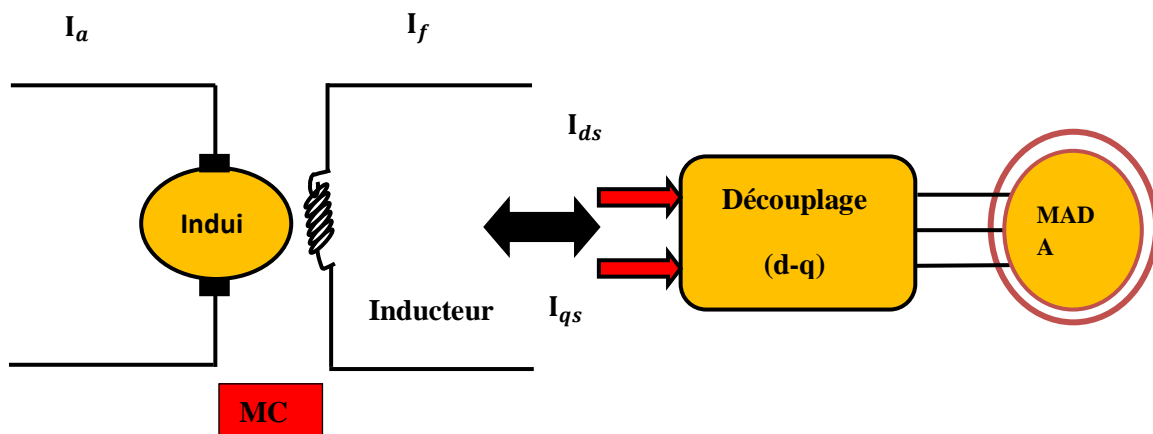


Figure III-1 : L'analogie entre le découplage de la MCC et de MAS

III.2.1 CLASSIFICATION DES METHODES DE COMMANDES

En général il y a plusieurs classifications des méthodes de commande vectorielle [37]

- a. **Suivant l'alimentation** : En considérant celle qui est donnée en tension ou celle donnée en courant.
- b. **Suivant l'orientation du flux** : On distingue trois types : orientation du flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

c. Méthode directe ou indirecte : La première méthode est réalisée par de nouvelle stratégie basée sur l'estimation du vecteur flux [37]. Quant à la deuxième méthode, elle est fondée sur le principe de la détermination de la position du flux sans avoir recours à sa connaissance directe [37]. Les méthodes directes cherchent à recueillir l'information sur la position et l'amplitude du flux au moyen de capteurs physiques de flux (Sondes de hall, Enroulement de mesures) ou moyen de capteurs virtuels par les algorithmes d'estimation. Cette dernière solution à l'avantage de préserver la standardisation de la MAS sans aucune modification. Ainsi, la machine conserve toutes ses qualités standards de robustesse, de simplicité de fabrication en plus du coût de l'installation.

Nous récapitulons ces méthodes dans la figure (III.2) suivante :

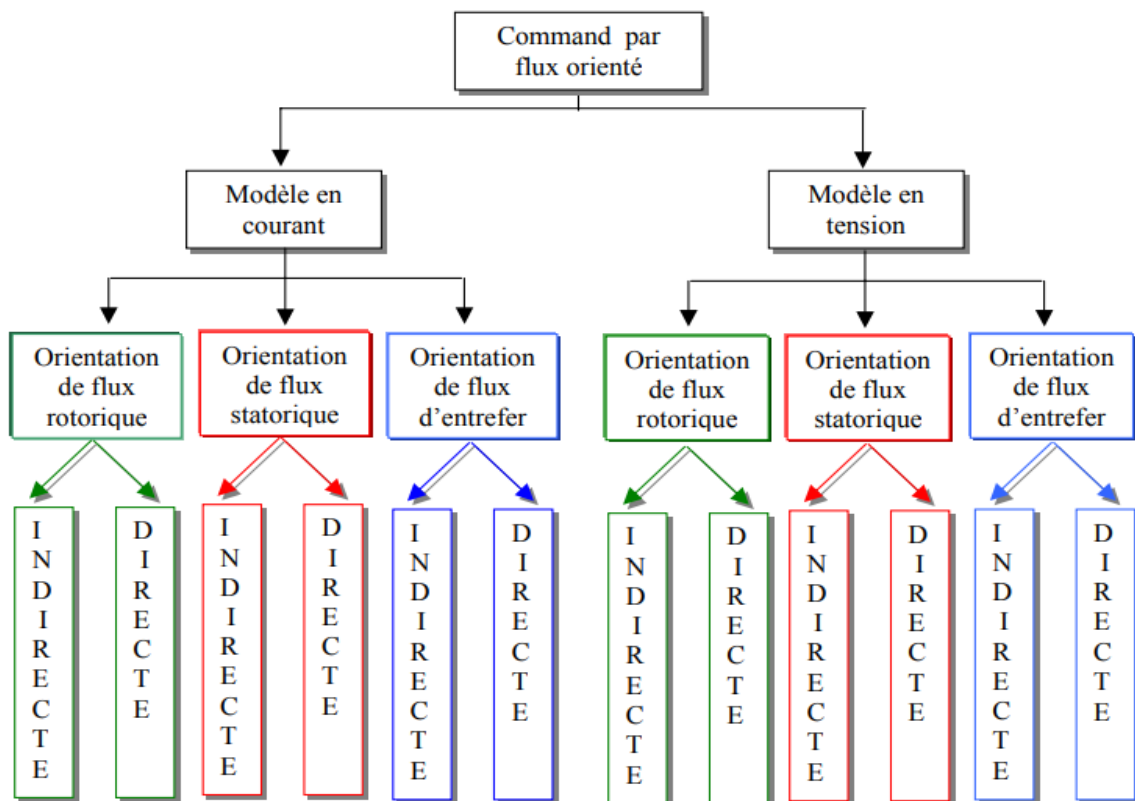


Figure III-2 : Classification des méthodes de commande par orientation de flux

III.3 COMMANDE PAR MODE GLISSANT

Le principe de la commande par modes glissants est de pousser l'état du système à atteindre en temps fini une hyper surface (dans l'espace d'état) donnée pour ensuite y rester. Cette hyper surface étant une relation entre les variables d'état du système, elle définit une équation différentielle, et donc détermine totalement la dynamique du système, pourvu qu'il reste sur cette hyper surface. L'évolution d'un système soumis à une loi de commande qui le fait rester sur une hyper surface donnée ne dépend donc plus du tout du système lui-même ou des perturbations auxquelles il peut être soumis, mais uniquement des propriétés de cette hyper surface. Le système bouclé n'est donc pas seulement robuste vis à vis des incertitudes (propres au système) et perturbations (extérieures au système), mais totalement insensible à ces incertitudes et perturbations, moyennant qu'elles puissent effectivement être rejetées par la commande. La synthèse d'une loi de commande par modes glissants consiste donc à déterminer : une hyper surface en fonction des objectifs de commande et des propriétés statiques et dynamiques désirées [38].

Pour le système bouclé. La dynamique exigée par l'hyper surface doit être compatible avec l'amplitude de commande 'utile' disponible et la dynamique du système en boucle ouverte. Dans le cas contraire, le système ne pourra pas rester sur cette surface, et la propriété d'insensibilité aux perturbations sera perdue. Une loi de commande discontinue de manière à obliger les trajectoires du système à atteindre cette hyper surface en temps fini puis à y rester en dépit des Incertitudes et des perturbations [38].

III.3.1 CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

Les systèmes à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant [38]. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure. Dans la commande par mode glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long lequel se produit est appelé mouvement de glissement

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes (Figure III.3)[39]

- **Le mode de convergence (MC) :** c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la

surface de commutation $S(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- **Le mode de glissement (MG) :** c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y) = 0$.
- **Le mode du régime permanent (MRP) :** Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [38].

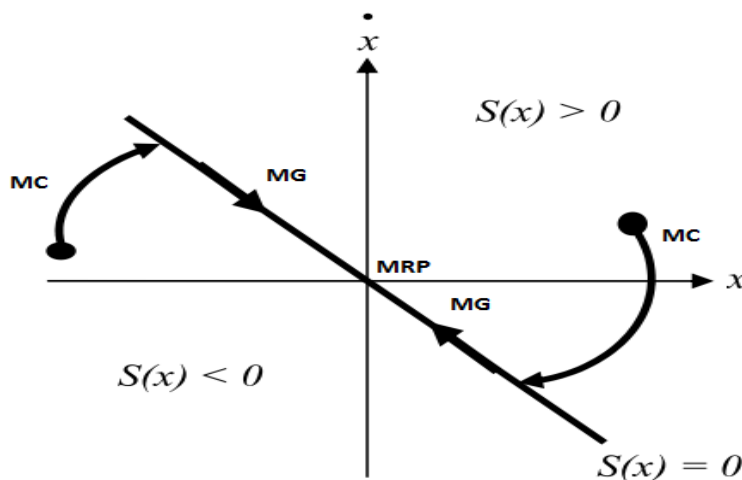


Figure III-3 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

Les deux composantes de la commande sont :

$$U = U_{\text{equivalente}} + U_{\text{attractive}}$$

$U_{\text{equivalente}}$: La commande équivalente ou nominale est déterminée par le modèle du système, dans ce cas il s'agit d'un modèle en immersion linéaire ou non linéaire. Cette partie est conçue avec la méthode de la commande équivalente, dont le principe est basé sur la détermination du comportement du système lorsqu'il est sur la surface de glissement S soit ($S=0$).

$U_{\text{attractive}}$: Le glissement est utile pour compenser les incertitudes du modèle. Il est constitué de la fonction signe "sign" de la surface de glissement, S multipliée par une constante K . La surface de glissement est définie dans l'espace d'état des erreurs afin de garantir la convergence des états du système [37].

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'aspect théorique de différentes techniques de commande pour le control du système éolienne. Sachant qu'il est un système complexe non linéaire, nous avons d'abord fait un rappel sur la commande vectoriel et la commandes non linéaires par mode glissant. Ensuite on a défini les conceptions nécessaires de cette dernière comme le choix convenable de surface de commutation et la loi de commande.

Dans le chapitre suivant, on s'intéresse à l'application des lois de commande précédentes sur le modèle de la chaine complète (MADA. Turbine. Convertisseur).

CHAPITRE VI



APPLIQUATION DES LOIS DE COMMANDE

VI.1 INTRODUCTION

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique produite par un système éolien basé sur une MADA, il faut appliquer des techniques de commandes adéquates permettant le contrôle des puissances générées par le stator de la machine à savoir : la puissance active qui sera réglée à celle de référence générée par la turbine pour assurer un meilleur rendement du système éolien, et la puissance réactive qui sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire du côté stator. Partant de là, nous proposons des commandes suivantes:

- une commande vectorielle.
- une commande par mode glissant.

Ces commandes permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive de la génératrice asynchrone double alimentation avec orientation du repère ($d-q$) suivant le flux statorique.

VI.2 COMMANDE VECTORIELLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

Dans cette commande, la machine est conçue de telle façon à ce que le flux statorique dans le repère de Park suivant l'axe q soit nul. Ce choix est justifié par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau de tension et de fréquence constante [37].

Rappelons le système d'équations différentielles (II.31) décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

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

Avec :

Un flux statorique direct constant $\varphi_{sd} = \varphi_s$. et un flux statorique en quadrature orienté $\varphi_{sq} = 0$.

Ces équations peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + w_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{VI. 2})$$

Si on néglige la résistance R_s , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée dans la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [37]:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = w_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{VI. 3})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{VI. 4})$$

VI.3. RELATIONS ENTRE LES COURANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique (équation(VI. 4)), les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques seront:

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

VI.3.1 RELATIONS ENTRE LES PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES

Dans un repère biphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{VI. 6})$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{VI. 7})$$

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadratures par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{VI. 8})$$

Il ressort de l'expression (VI. 8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ imposée par le réseau.

VI.3.2 RELATIONS ENTRE LES TENSIONS ET COURANTS ROTORIQUES

A partir du système d'équation (VI. 5), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{VI. 9})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{VI. 10})$$

En régime permanent, les dérivées des courants rotoriques biphasés s'annulent, ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (VI.11)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (VI.12)$$

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

avec :

- $\left(\frac{V_s \cdot M}{L_s} \right)$: le terme de couplage entre les deux axes;
- $g \cdot \left(\frac{M^2}{L_s} \right)$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

VI.3.3 ETABLISSEMENT DES ANGLES NECESSAIRES AUX TRANSFORMATIONS

Pour déterminer l'angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à appliquer la matrice de Concordia aux tensions statoriques pour extraire la phase θ_s que forme le vecteur de tension avec l'axe de la première phase du stator.

Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe d , nous retranchons $\frac{\pi}{2}$ de cet angle. Cette méthode est fiable si les tensions statoriques ont des fréquences stables avec peu de fluctuations pour pouvoir effectuer une mesure précise.

Le rotor forme un angle θ_m avec la phase A du stator, l'angle θ_r nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques sera donc : $\theta_r = \theta_{sn} - \theta_m$.

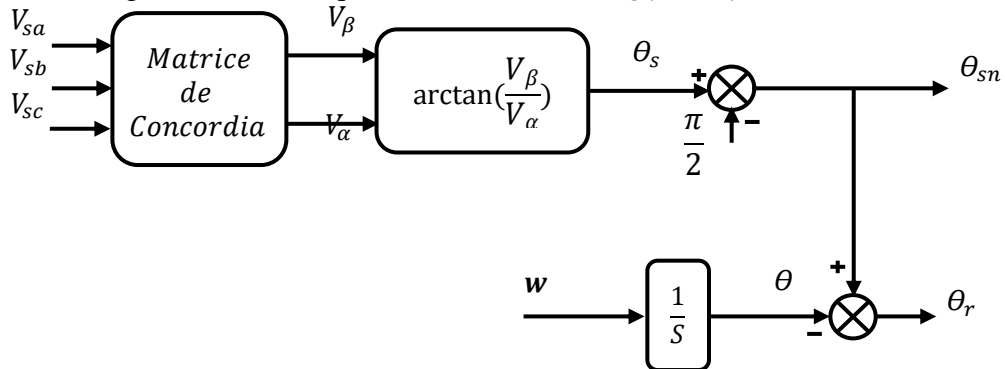


Figure VI-1 : Calcul des angles de transformations.

VI.3.4 TYPE DE REGULATEURS UTILISES

Pour la réalisation d'une commande vectorielle en puissances active et réactive de la MADA cas génératrice, Il faut utiliser des régulateurs Proportionnel Intégral (PI), à cause des avantages qu'ils apportent (rapidité, simplicité, autorisant la fréquence du MLI, etc...).

Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de références et les puissances active et réactive mesurées.

Le dimensionnement des régulateurs PI seront calculés par la méthode de compensation de façon à obtenir des performances les plus élevées possibles qui seront présentées dans (l'annexe B).

VI.3.5 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE LA COMMANDE VECTORIELLE

VI.3.5.1 COMMANDE DIRECTE

Cette technique consiste à réguler directement et indépendamment les puissances statoriques active et réactive produites à celles de références, en utilisant un seul régulateur

sur chaque axe. Les tensions de commande sont la correction des erreurs des puissances par des régulateurs PI. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante [37].

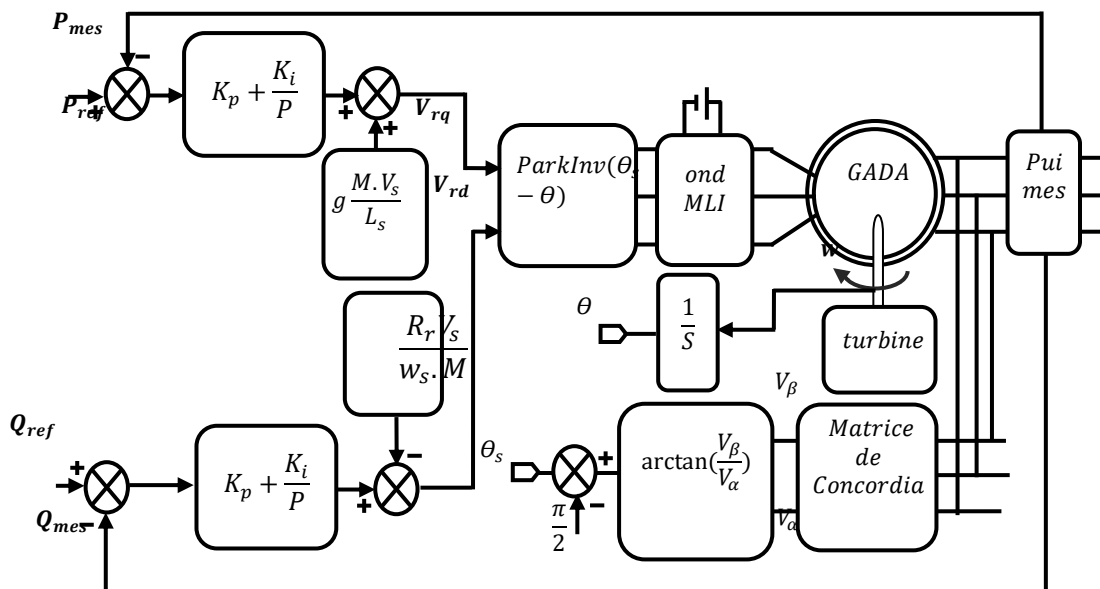


Figure VI-2: Schéma bloc de la structure de commande directe par orientation du flux statorique.

VI.3.5.2 COMMANDE INDIRECTE

Cette technique est basée sur deux structures: l'une utilise une boucle régulant le courant, alors que l'autre est basée sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

VI.3.5.2.1 COMMANDE INDIRECTE SANSBOUCLE DE PUISSANCE

Cette commande ne consiste pas à réguler directement les puissances comme la commande précédente, mais elle est basée sur la régulation indirecte des courants rotoriques mesurées qui seront asservis avec les courants de références déjà déterminés par les puissances statoriques de références imposés à la machine [37].

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (VI.13)$$

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe, Ils sont identiques pour chaque axe. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure ci-dessous.

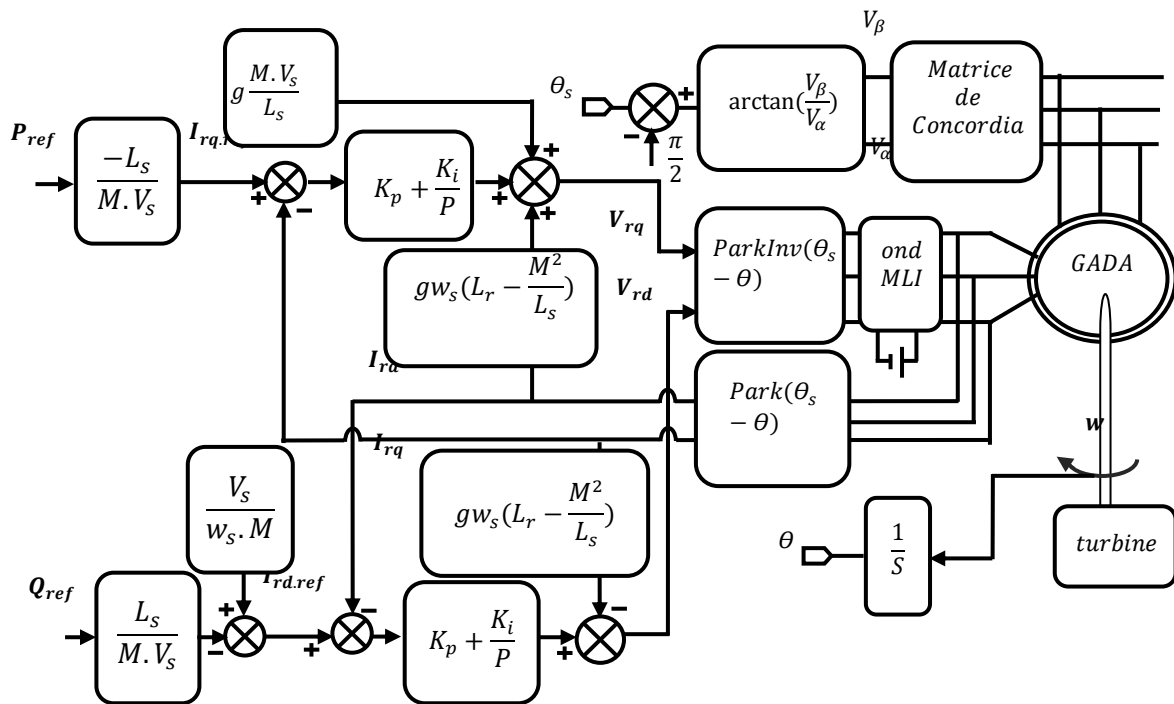


Figure VI-3: Schéma bloc de la structure de commande indirecte sans boucle de puissance.

VI.3.5.2.2 COMMANDE INDIRECTE AVEC BOUCLE DE PUISSANCE

Cette commande consiste à réguler les puissances statoriques et les courants rotoriques en cascade, pour cela nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, l’une réglant la puissance et l’autre le courant. Ce type de régulation donne une bonne dynamique et une erreur statique nulle. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante [37].

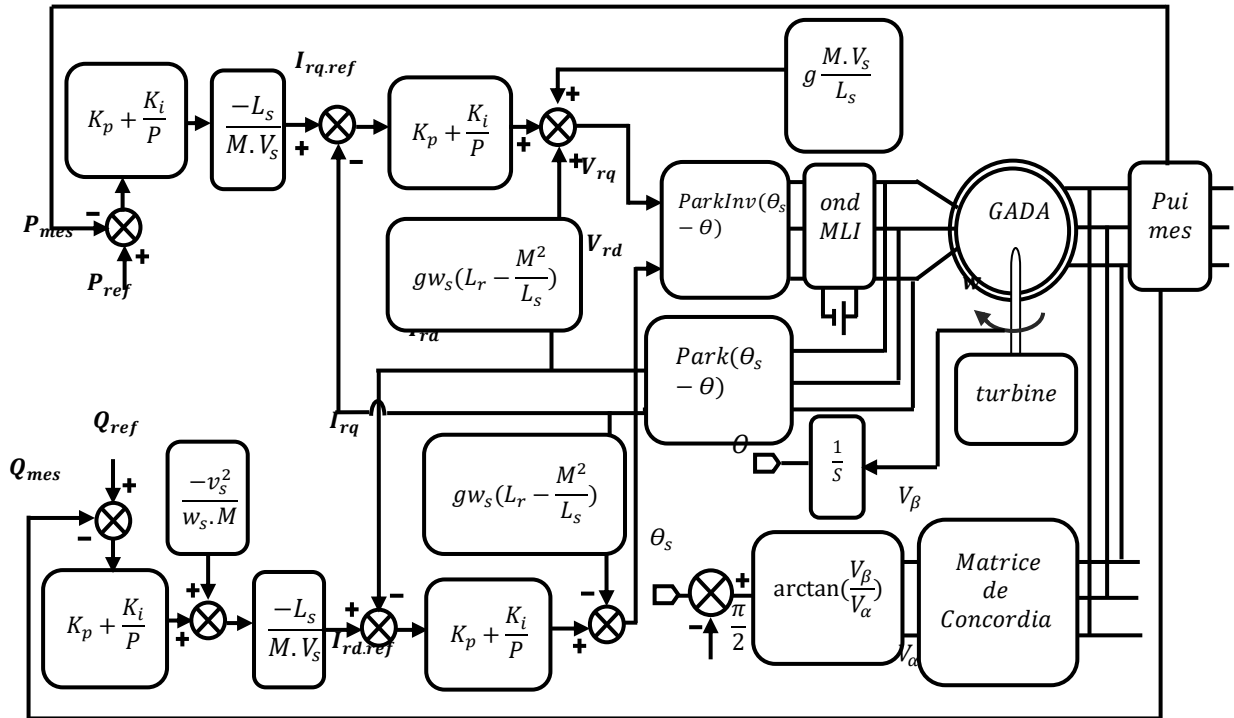


Figure VI-4 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte avec boucle de puissance.

VI.4 RESULTATS DE SIMULATION

Les figures ci-dessous montrent les performances des commandes vectorielle (indirecte sans boucle de puissance), des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

- ❖ machine connectée au réseau;
- ❖ machine entraînée à une vitesse fixe $1440 \frac{tr}{min}$;
- ❖ entre les instants $t = 1sett = 3s$: échelon négatif pour la puissance active (P_{sref} passe de 0 à $-3000W$);

- ❖ entre les instant $st = 2sett = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR).

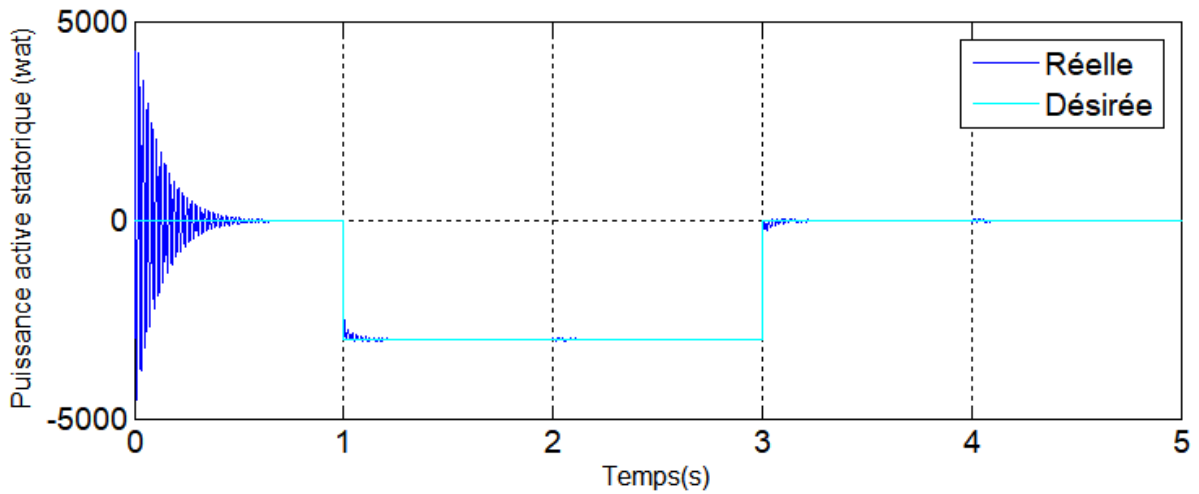


FIGURE VI-5 : Puissance active statorique

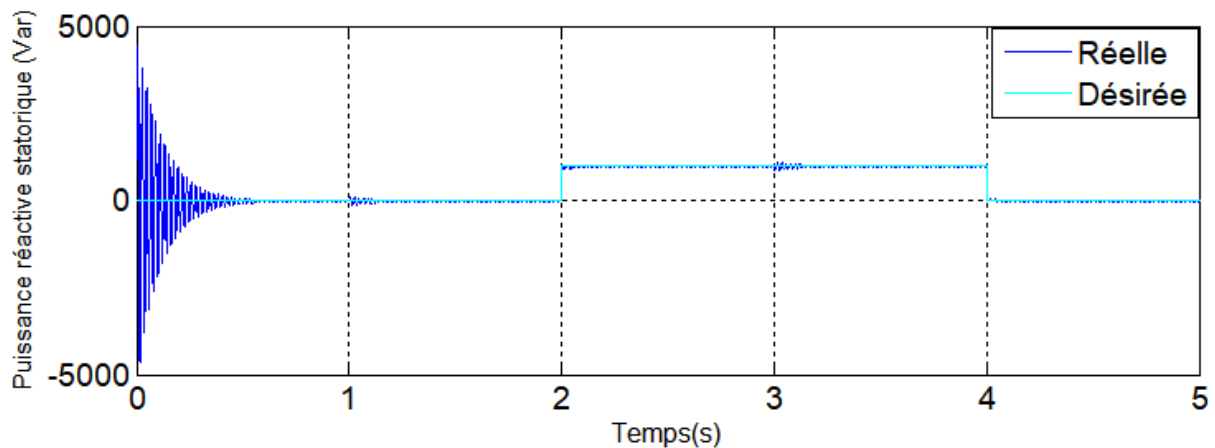


FIGURE VI-6 : Puissance réactive statorique

VI.4.1 INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après les courbes des figure VI-5 et VI-6 qui représentent les résultats de simulation, il est bien clair que la commande permettent un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique (active et réactive).

Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de la commandes arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées, et la commande vectorielle à savoir :

- ✓ une réponse rapide pour le régime transitoire et pour le changement des consignes;
- ✓ une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celle mesurées (presque nulle);

VI.4.2 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME GLOBALE

Dans le cas le plus pratique, l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor de la MADA est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. L'asservissement du redresseur est composé de deux boucles de régulation (une boucle interne pour régler le facteur de puissance côté réseau, et une autre externe pour régler la tension redressée à sa valeur de référence, (400V)).

La MADA qui est entraînée par une turbine éolienne est contrôlée par deux commandes : l'une appelée "*MPPT*", qui est une commande indirecte pour maximiser la puissance captée pendant les faibles vitesses du vent; l'autre, "*pitch control*", pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses du vent.

La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine, et la puissance réactive statorique est maintenue nulle pour garder le facteur de puissance unitaire du côté stator de la MADA.

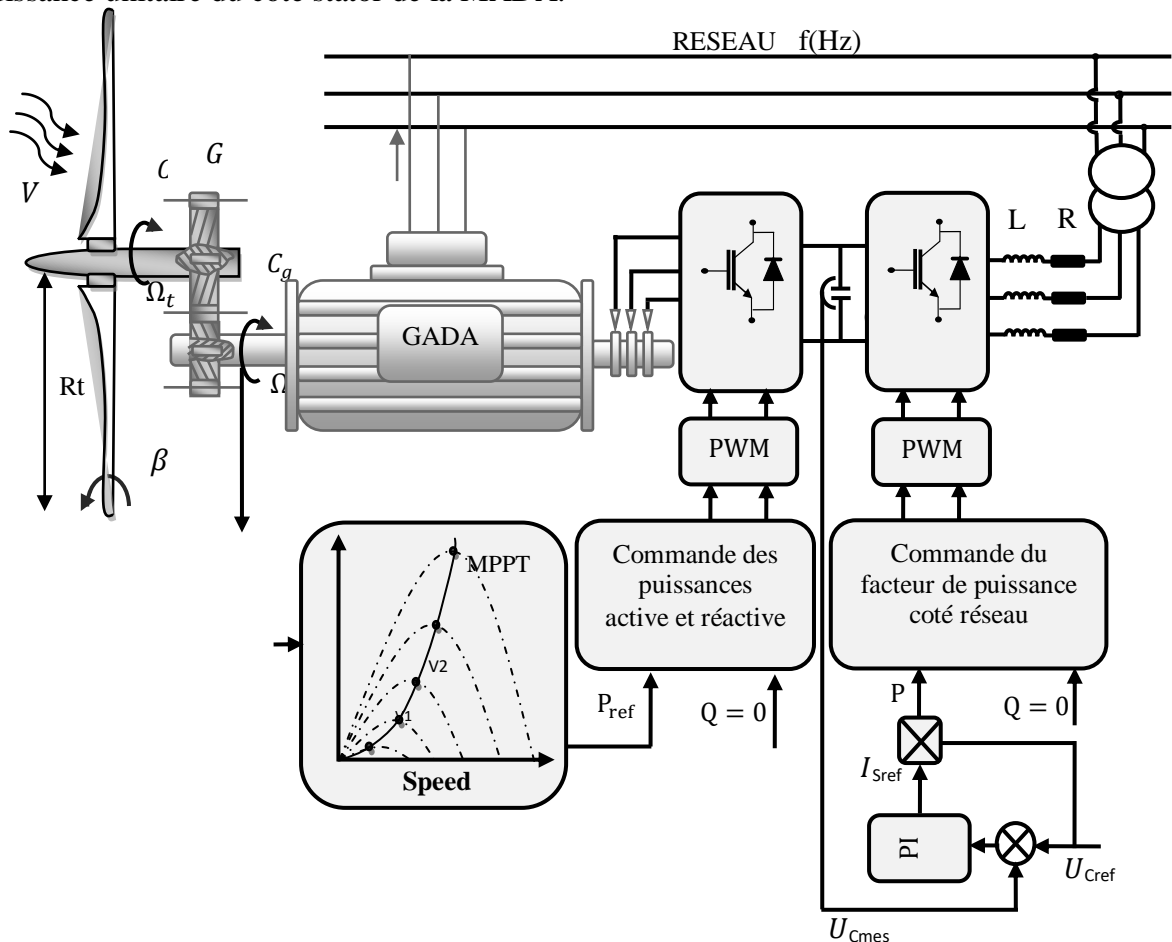


Figure VI-7 :Schéma synoptique du système (convertisseur, GADA et turbine).

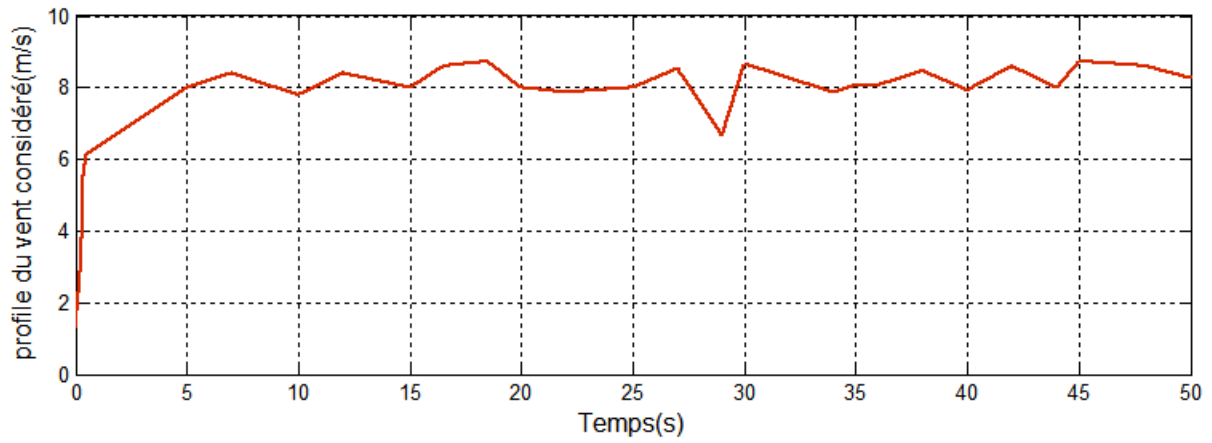


Figure VI-8 : Profil du vent appliqué.

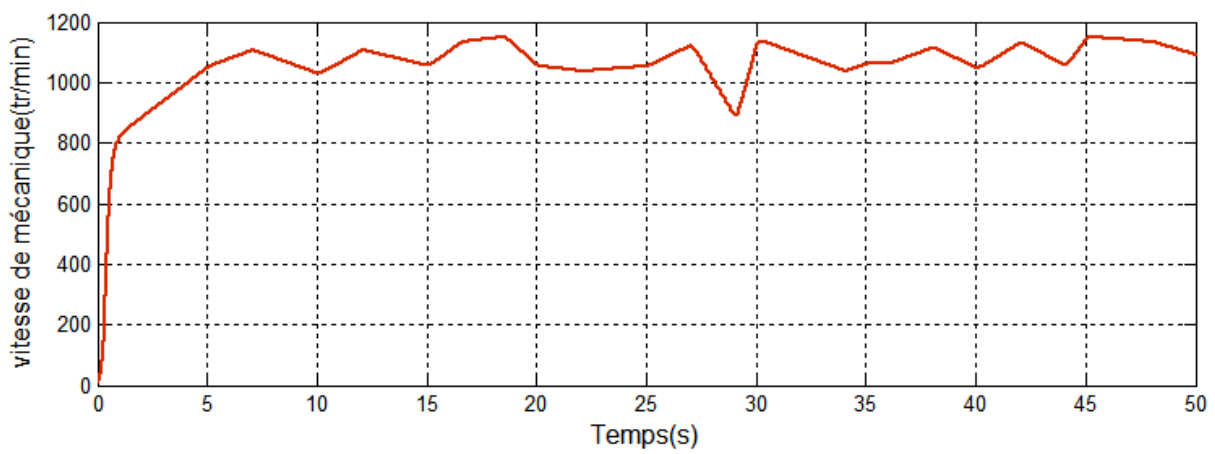


Figure VI-9 : Vitesse mécanique.

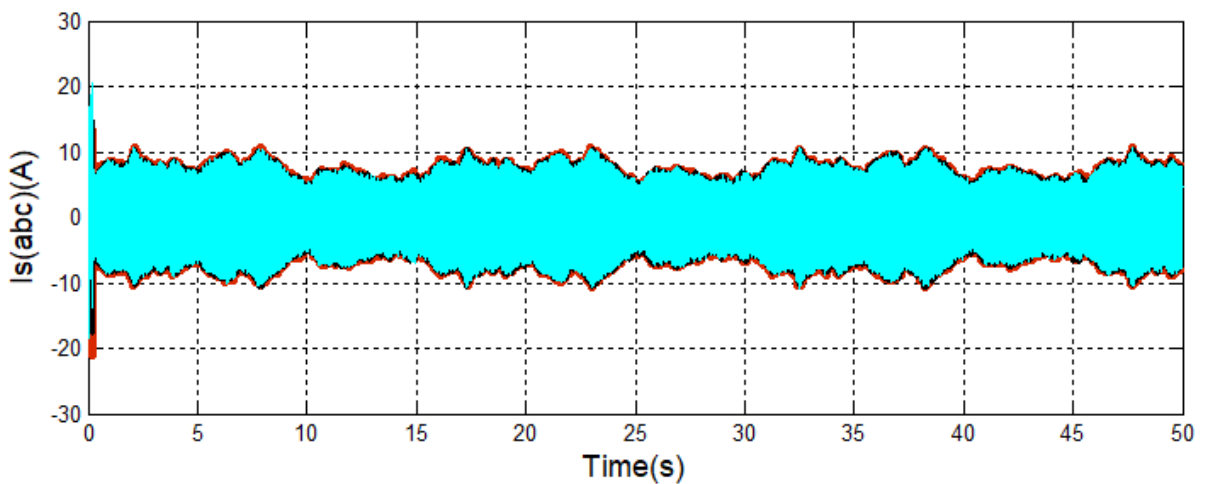


Figure VI-10 : Courant statorique.

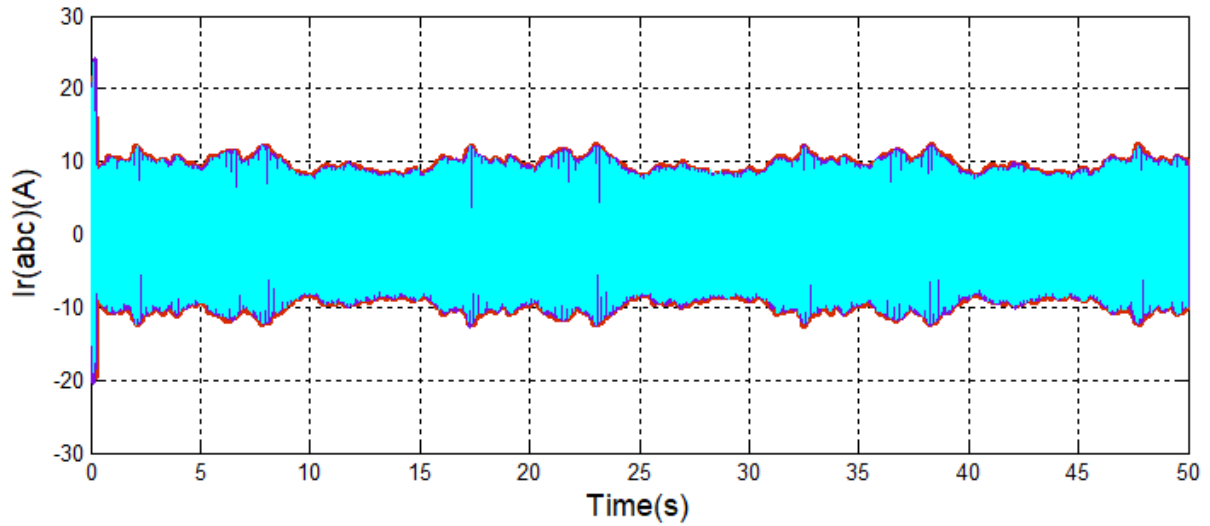


Figure VI-11 : Courant rotorique.

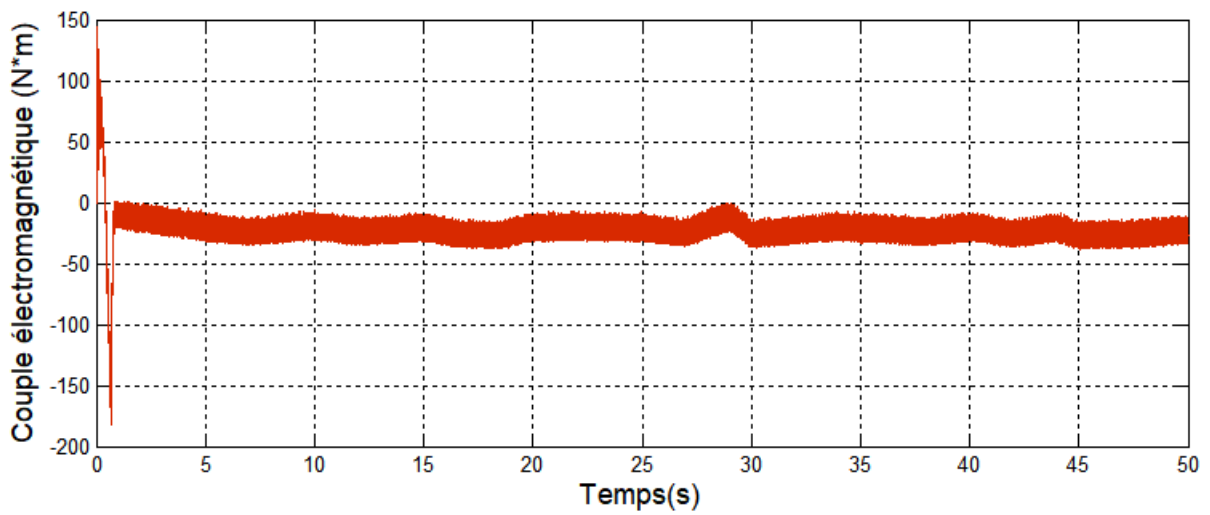


Figure VI-12: Le couple électromagnétique.

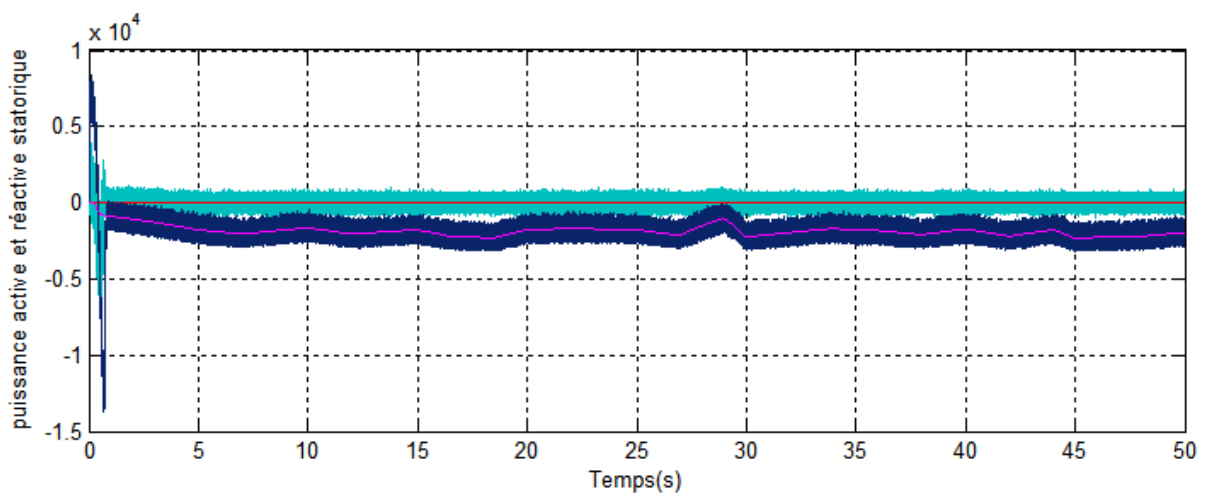


Figure VI-13: Puissances statoriques active et réactive.

VI.4.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

En premier lieu, les résultats de simulation qui sont illustrés par la figure VI.9 montrent que l'allure de la vitesse mécanique générée par la turbine est semblable à celle du profil du vent appliqué à la turbine,

Les résultats des figures VI.10 et VI.11 représentent les courants statoriques et rotoriques respectivement pour la commande. Les observations sont similaires à celles faites précédemment pour le cas des puissances active et réactive.

Le résultat de figure VI.12 représente le couple électromagnétique. La figure VI.13, on voit que les allures des puissances actives et réactive statoriques générées par la machine suivent bien les allures de références.

VI.5 APPLICATIONS DE LA COMMANDE MODE GLISSANT A LA MADA

La commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation est une commande robuste qui résout beaucoup de problèmes liés aux incertitudes et aux variations du système à régler. L'objectif de ce travail est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.

VI.5.1 MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION GADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère (d, q) . Le modèle d'état est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{VI. 14})$$

❖ **Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques**

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (VI.15)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (VI.16)$$

❖ **Equations des dérivées de courants rotoriques**

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \left(V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \right) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (VI.17)$$

VI.5.2 CHOIX DES SURFACES DE GLISSEMENTS

La puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d . Pour contrôler la puissance, on prend $n = 1$.

Les expressions de la surface de contrôle des puissances active et réactives sont:

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (VI.18)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (VI.19)$$

VI.5.3 CONDITIONS DE CONVERGENCES

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles.

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt}(I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt}(I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (VI.20)$$

Lorsque les conditions de convergences sont satisfaites, les puissances active et réactive tendent exponentiellement vers leurs valeurs de références, et pour suivre ces valeurs, il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

Le mode glissant est réalisé à condition que la relation d'attractivité de Lyapounov soit inférieure à zéro; c'est à dire $s(X) \cdot \dot{s}(X) \leq 0$

VI.5.4 LOI DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT

L'algorithme de commande est défini par les relations :

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (VI. 21)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (VI. 22)$$

avec : V_{rq}, V_{rd} : les tensions de commandes;

$V_{rq-Equi}, V_{rd-Equi}$: les tensions de commandes équivalentes;

$V_{rq-attr}, V_{rd-attr}$: les tensions de commandes de commutations.

❖ Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance active, on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (VI. 23)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{s}(P) = (\dot{i}_{rq}^{ref} - \dot{i}_{rq}) \quad (VI. 24)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références \dot{i}_{rq}^{ref} et \dot{i}_{rq} par leurs expressions données par les équations (VI. 32) et (VI. 33), on obtient :

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot \left(V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (VI. 25)$$

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (VI. 26)$$

$$\dot{s}(P) = -v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (VI. 27)$$

$$-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) = -v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (VI. 28)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (VI. 29)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (VI. 30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \end{array} \right. \quad (VI. 31)$$

❖ Contrôle de la puissance réactive

De la même manière que précédemment, pour contrôler la puissance réactive on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient :

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (VI.32)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{s}(Q) = (\dot{I}_{rd}^{ref} - \dot{I}_{rd}) \quad (VI.33)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références \dot{I}_{rd}^{ref} & \dot{I}_{rd} par leurs expressions données par les équations (VI.32) et (VI.33), on obtient :

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (VI.34)$$

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (VI.35)$$

$$\dot{s}(Q) = -v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (VI.36)$$

$$\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) = -v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (VI.37)$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) - (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (VI.38)$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (VI.39)$$

$$\begin{cases} V_{rd-Equi} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} \\ V_{rd-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \end{cases} \quad (VI.40)$$

Les équations (VI.31), (VI.40) permettent d'établir un schéma bloc de commande par mode glissant appliqué à une génératrice asynchrone double alimentation, figure (VI-14).

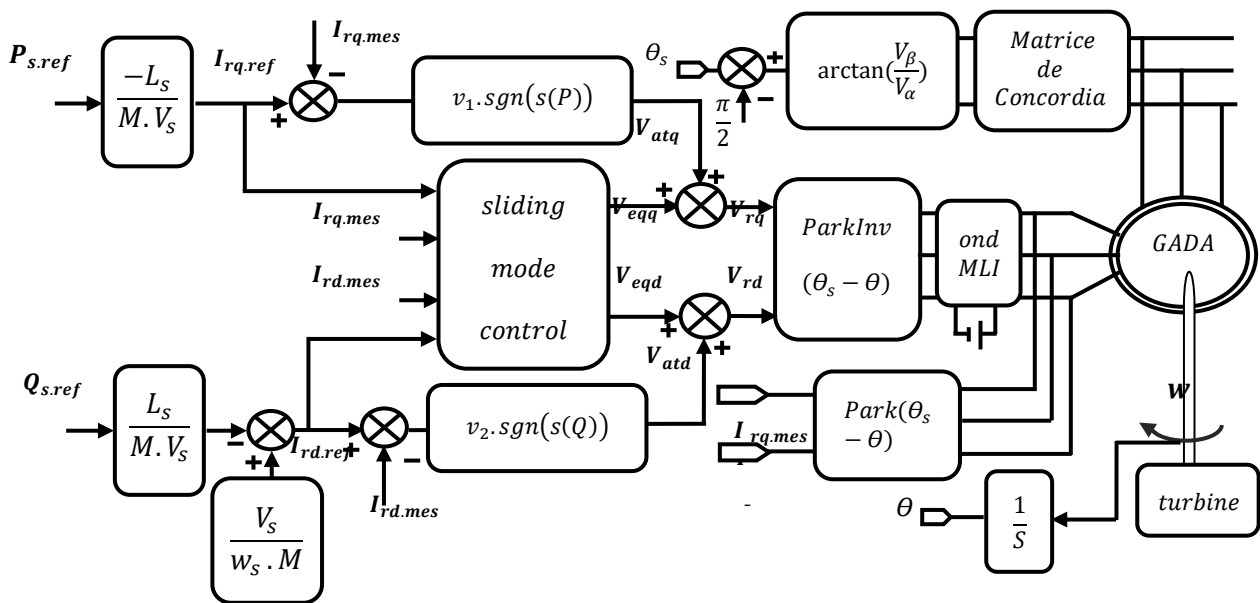


Figure VI-14 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

VI.5.4 RESULTATS DE SIMULATION POUR UNE VITESSE FIXE

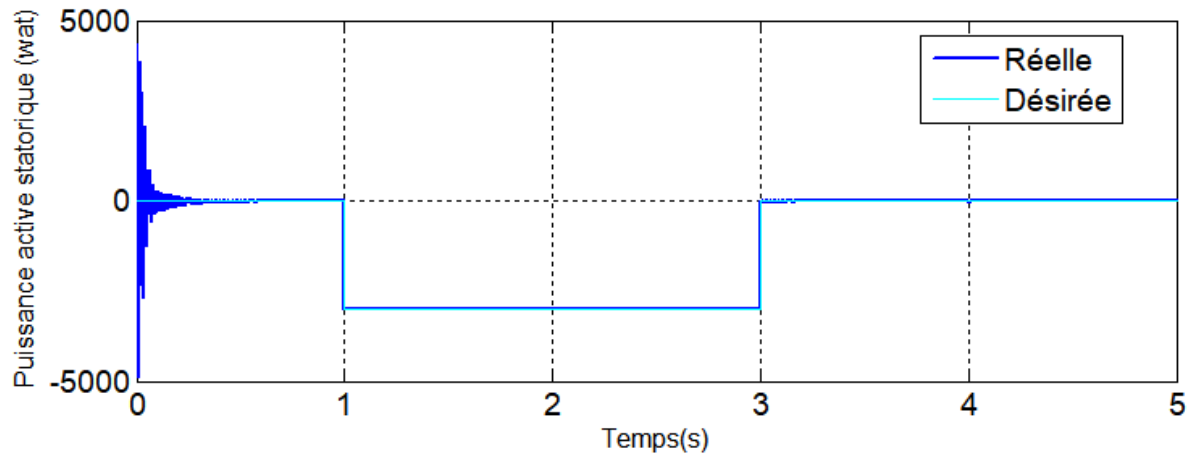


Figure VI-14: Puissance active statorique

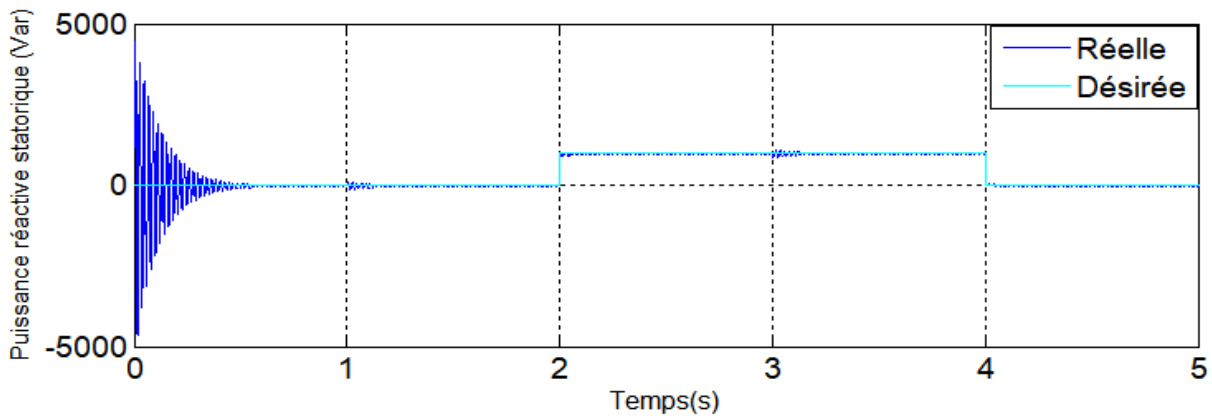


Figure VI-15 : Puissance réactive statorique

VI.5.5 RESULTATS DE SIMULATION DU SYSTEME GLOBALE

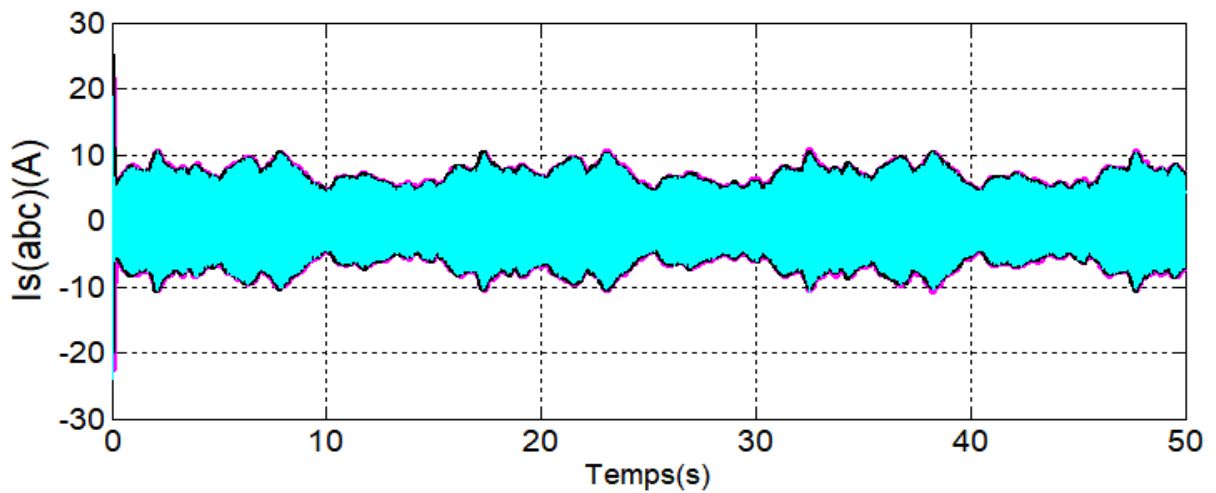


Figure VI-16 : Courant statorique.

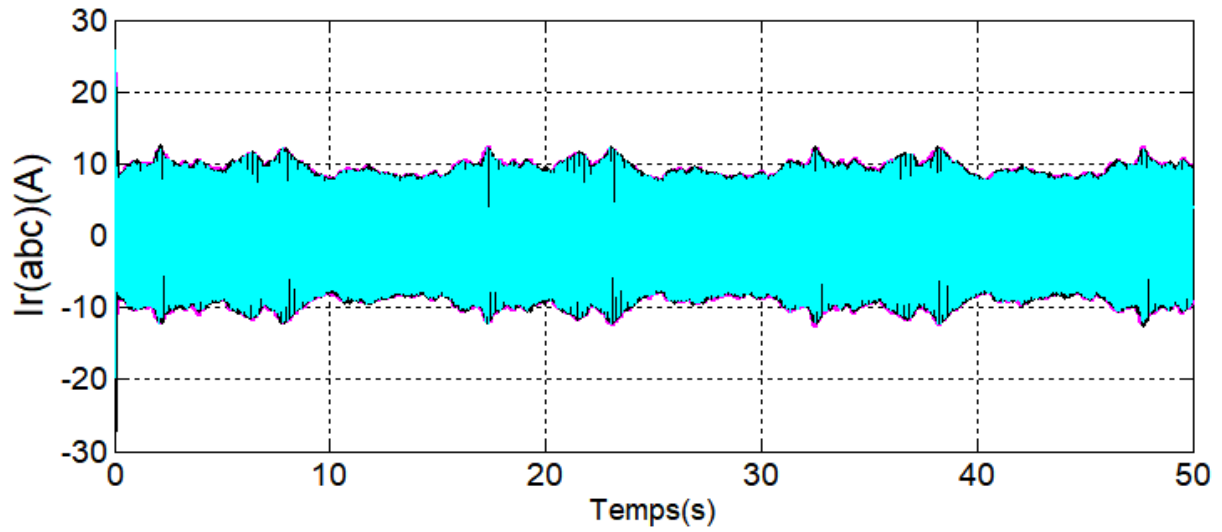


Figure VI-17 : courant rotorique .

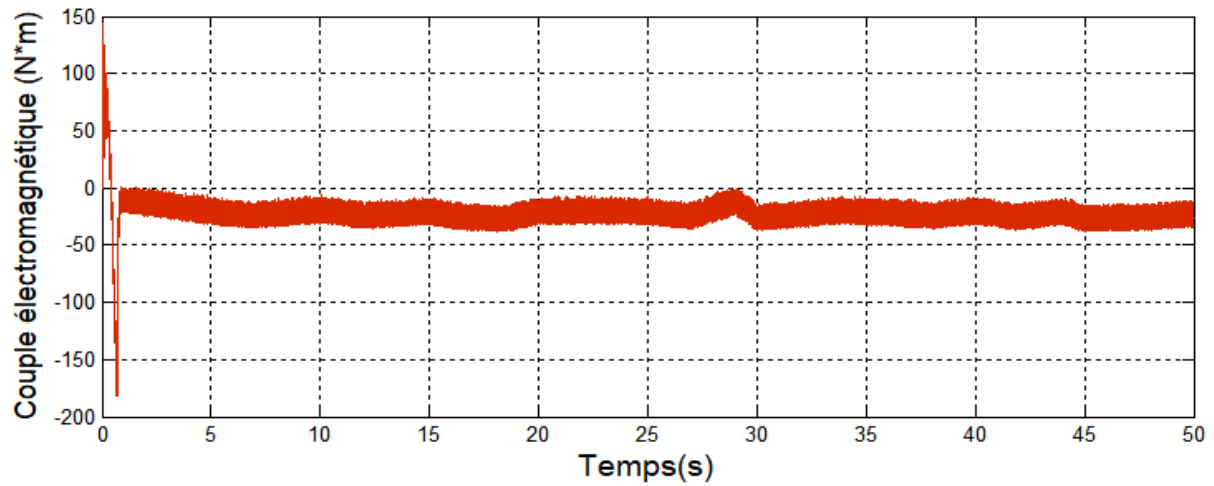


Figure VI-18 : Le couple électromagnétique.

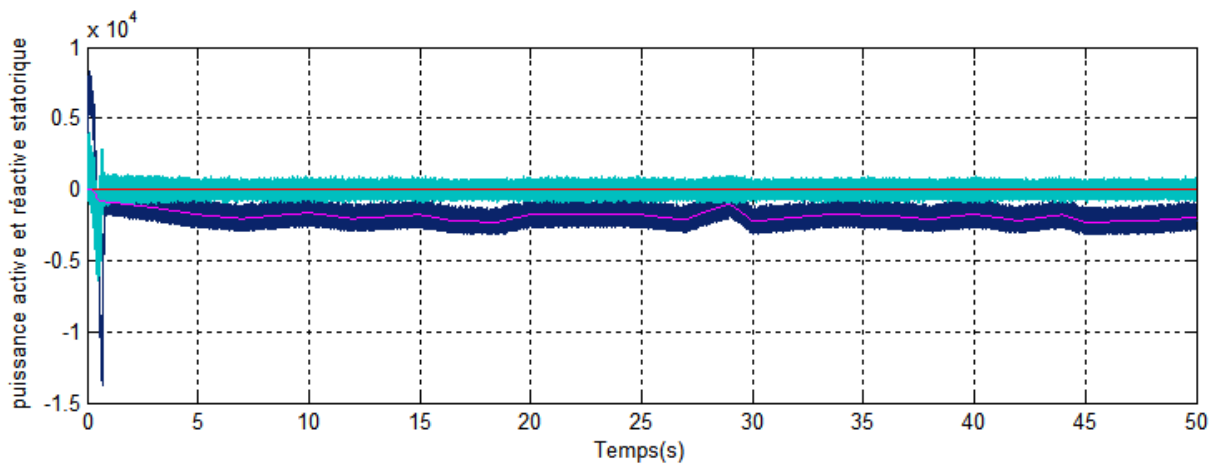


Figure VI-19: Puissances statorique active et réactive.

VI.5.6 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les figures VI.14 et VI.15 représentent les allures des puissances active et réactive statoriques générées par la machine suivent bien les allures de références dans cette commande; les résultats obtenus sont mieux caractérisés à savoir :

- ✓ un temps de réponse plus faible dans le régime transitoire;
- ✓ un dépassement minimum des allures des puissances;
- ✓ moins d'oscillations et de perturbations des valeurs de puissances active et réactive qui regagnent rapidement leurs allures de références.

Les résultats des figures VI.16, VI.17 et VI.18 représentent respectivement les courants statorique ,rotorique et le couple électromagnétique ,pour la commande .

Les résultats de simulation qui sont illustrés par la figure VI.19 montrent que l'allure des puissances actives et réactive statoriques générées par la machine suivent bien les allures de références.

IV.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons appliquons deux techniques de commande différentes pour contrôler indépendamment l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la machine et le réseau dans un système éolien. En premier lieu, nous avons présenté l'application de la commande vectorielle sur ce système en utilisant un régulateur proportionnel intégral. Cette commande est basée sur l'orientation du flux statorique pour simplifier le modèle de la machine et découpler la régulation des puissances générées. On a choisi la commande indirecte sans boucle de puissance d'une part sa simplicité de mise en œuvre, ainsi que la possibilité du contrôle et de limitation des courants afin de protéger le bobinage rotorique de la machine.

En deuxième lieu, nous avons présenté l'application de la commande par mode glissant sur le même système à savoir: sa conception (choix de la surface de commutation et la loi de commande) et leurs commandes.

CHAPITRE V

**ETUDE COMPARATIVE DES
TECHNIQUES DE COMMANDE
DEVELOPPEES.**

V.1 INTRODUCTION

Pour examiner les deux différentes lois de commandes développées et synthétisées sur le système de production d'énergie éoliennes considéré dans ce document, nous allons présenter une étude comparative entre ces différentes techniques. Cette étude a été reprise dans les mêmes conditions.

V.2 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE PROPOSEES

Le but dans cette partie est de réaliser une comparaison entre les deux commandes que nous avons appliquées dans les chapitres précédentes. Cette comparaison est réalisée à partir d'une série de tests que nous avons effectués durant les fonctionnements transitoire et permanent du système [37] :

- Le premier test que nous avons réalisé est basé sur les variations de consignes des puissances active et réactive, soit aléatoire avec la variation de vitesse du vent, soit comme des échelons alors que la machine est entraînée à vitesse fixe, cette comparaison est dite : comparaison qualitative pour les variations extérieures.
- Le second test que nous avons défini comprend deux critères; l'un en fonction de la commande appliquée, qu'on peut considérer comme un critère énergétique, l'autre en fonction de l'erreur statique des puissances. Cette comparaison est dite : comparaison quantitative.
- Le dernier test que nous avons effectué consiste à faire varier les paramètres de la machine utilisée, car, en réalité, ces derniers sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques tels que (la saturation des inductances, l'échauffement des résistances, etc..). Cette comparaison est dite : comparaison de robustesse.

V.2.1 COMPARAISON QUALITATIVE

V.2.1.1 POUR UNE VITESSE FIXE

Cette comparaison est basée sur l'observation des résultats de simulations obtenus par l'application des deux techniques de commandes développées sur le système. Les consignes des puissances active et réactive proposées sont données sous formes d'échelons alors que la machine est entraînée à vitesse fixe. Cet essai est réalisé dans les mêmes conditions à savoir:

- Machine entraînée à une vitesse fixe 1440 tr/min .
- Introduction d'un échelon de puissance active de $P_{sref} = -3000W$ entre les instants: $t = 1s$ et $t = 3s$.
- Introduction d'un échelon positif de puissance réactive $Q_{sref} = 1000 \text{ VAR}$ entre les instants: $t = 2s$ et $t = 4s$.
- la période d'échantillonnage et le temps de simulation sont fixes.

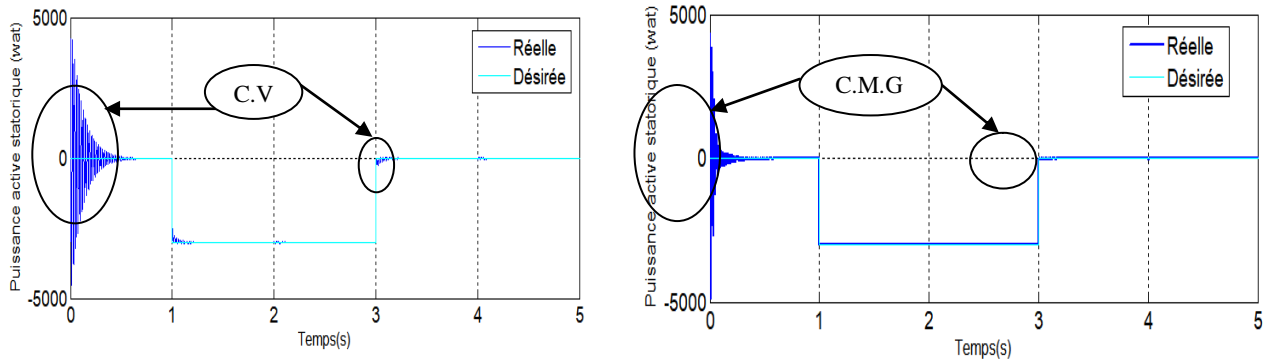


Figure V-1 : Puissance active statorique pour les deux commandes.

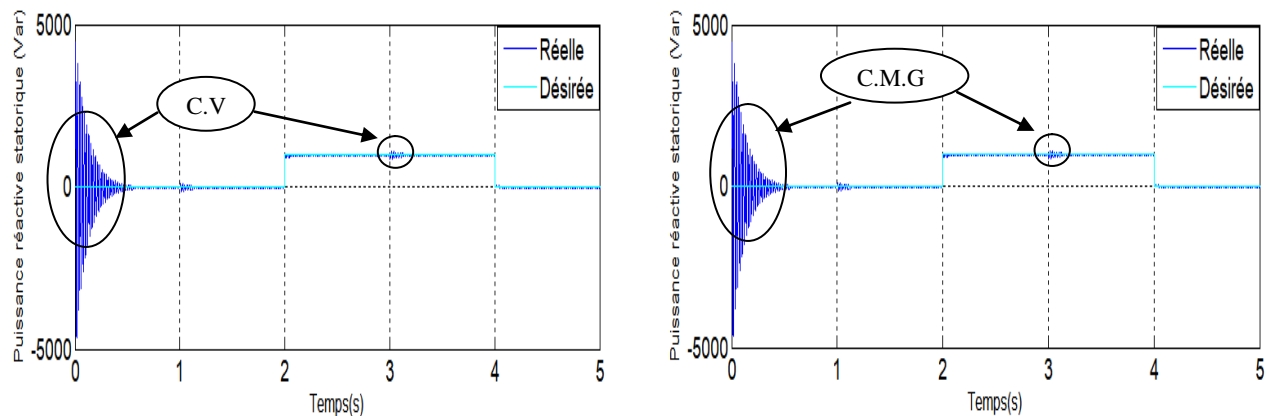


Figure V-2 : Puissance réactive statorique pour les deux commandes.

Dans les figures précédentes, on voit clairement l'évolution temporelle des résultats de simulation obtenus pour la variation des puissances générées avec une vitesse constante. Cela nous permet alors d'effectuer une comparaison entre les deux commandes : vectorielle (C.V), mode de glissement (C.M.G)

L'observation des résultats de simulation montre que les puissances active et réactive suivent leurs nouvelles références dans les deux types de commandes; cependant, le temps de réponse, le dépassement et les oscillations des grandeurs réglées, ainsi que la convergence exponentielle des erreurs pour le régime transitoire et le changement des consignes sont différents.

On remarque que la commande par mode glissant présente des meilleures valeurs de ces derniers sont les valeurs obtenues lors de l'application, qu'on peut considérer comme la commande la plus performante et la plus efficace par rapport au vectoriel.

V.1.1.2 POUR UNE VITESSE VARIABLE

Dans ce cas, la machine est couplée directement au réseau par le stator et pilotée par les grandeurs rotoriques à travers deux convertisseurs bidirectionnels MLI, et entraînée par une turbine à calage variable des pales. La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine, alors que la puissance réactive statorique est maintenue nulle pour garder le facteur de puissance unitaire du côté stator de la MADA. Le temps durant lequel les mesures ont été effectuées est de 50s.

Les perturbations induites par l'onduleur ne permettent pas de distinguer la différence entre les commandes développées dans le régime permanent; Cependant cette distinction est observable en régime transitoire, et où les résultats de simulation montrent que les grandeurs réglées convergent vers leurs valeurs de références dans les deux types de commandes avec un temps de réponse et un dépassement différents. On constate une absence de dépassements importants et une convergence rapide vers sa valeur de référence (temps de réponse plus faible) dans le cas de la commande par mode glissant.

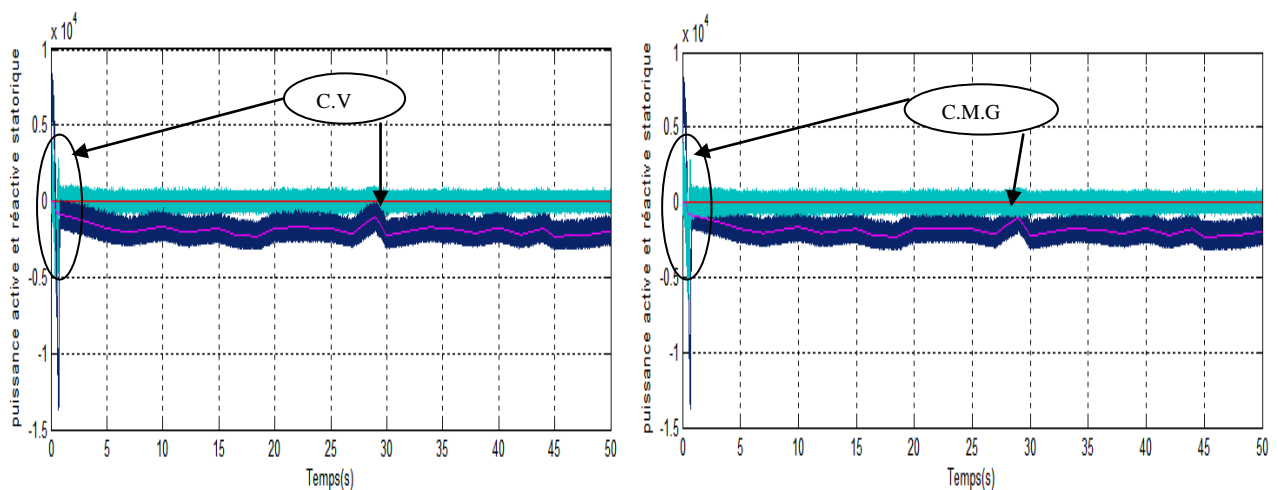


Figure V-2 : Les Puissances réactive et active statorique pour les deux commandes.

V.2.2 COMPARAISON QUANTITATIVE

Le deuxième test basé sur deux critères : énergétique J_1 et statique J_2 . Le premier est fonction de la commande appliquée, alors que le deuxième est fonction de l'erreur résultante. Les résultats obtenus dans les mêmes conditions. Les critères énergétique J_1 et celui de précision J_2 sont définis par :

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u) \quad (V.1)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e) \quad (V.2)$$

Pour calculer les deux critères, les commandes et les erreurs des grandeurs commandées ont été utilisées. Les deux critères sont calculés pour un temps de simulation de 5s et des consignes des puissances égales à celles données dans les conditions de simulation.

Tableau. V-1 : Étude comparative des commandes développées pour le système considéré.

G-C	Critère	Commandes développées pour le système considéré	
		Commande PI	Commande mode glissante
Puissance active	$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u)$	2.6546e+008	3.2130e+008
	$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e)$	4.0734e+005	1.2993e+004
Puissance réactive	$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u)$	1.3227e+008	1.9122e+008
	$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e)$	7.5038e+006	5.2052e+004

L'objectif visé dans cette partie est la comparaison des différentes lois de commandes quantitativement (en chiffres); pour mettre en évidence les performances de chacune d'elles. Les valeurs de l'erreur statique J_1 et celle de la commande nécessaire J_2 sont calculées dans l'intervalle de temps [0s 5s] pour les deux commandes.

Les résultats de simulation présentés dans le tableau ci-dessus montrent clairement que la commande vectorielle est la plus performante du point de vue minimisation du critère

énergétique qui nous donne les valeurs les plus faibles de J_1 ($J_1 = 2.6546e+008$ pour la puissance active, et $J_1 = 1.3227e+008$ pour la puissance réactive).

Cependant, concernant le second critère de précision, on remarque que c'est la commande par mode de glissant qui donne les valeurs les plus faibles de J_2 ($J_2 = 1.2993e+004$ pour la puissance active, et $J_2 = 5.2052e+004$ pour la puissance réactive).

A partir de ce qu'il a été observé précédemment, on peut dire que la commande par mode glissant le plus performant dans le critère statistique et par contre dans le second critère énergétique.

V.2.3 COMPARAISON DE LA ROBUSTESSE

Le dernier test est basé sur l'essai de robustesse des commandes proposées où une étude de l'influence des variations paramétriques de la MADA sur les performances de celles-ci est menée. Sachant que dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances, etc ...). Dans cet essai, on a fait varier les paramètres suivants:

- Résistances R_s et R_r multipliées par 2.
- Inductances L_s , L_r , et M_{sr} , divisées par 2.
- machine entraînée à 1440 *tr/min*.
- On introduit un échelon de puissance active de $P_{sref} = -3000W$ entre les instants $t = 1sett = 3s$.
- On introduit un échelon positif de puissance réactive $Q_{sref} = 1000 VAR$ entre les instants $t = 2sett = 4s$.
- La variation des paramètres sera appliquée entre les instants $t = 1.5s$ et $t = 3.5s$.

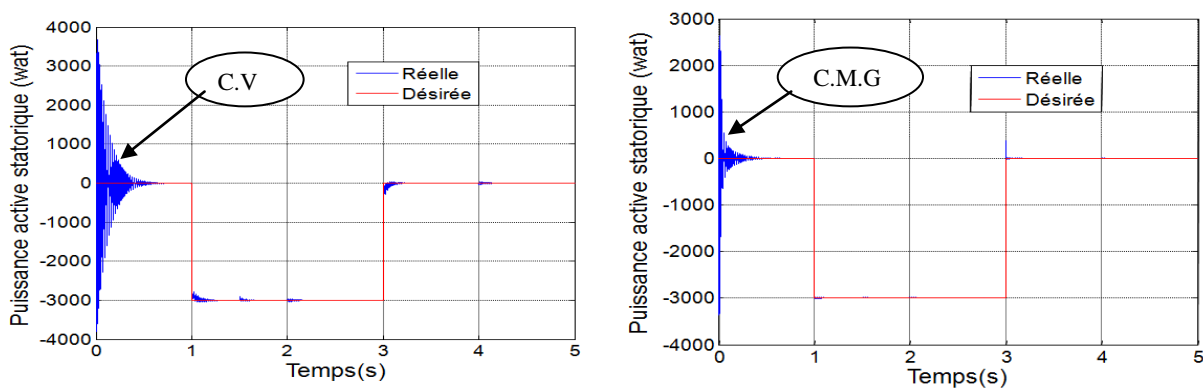


Figure V-6 : Puissance active statorique pour les deux commandes.

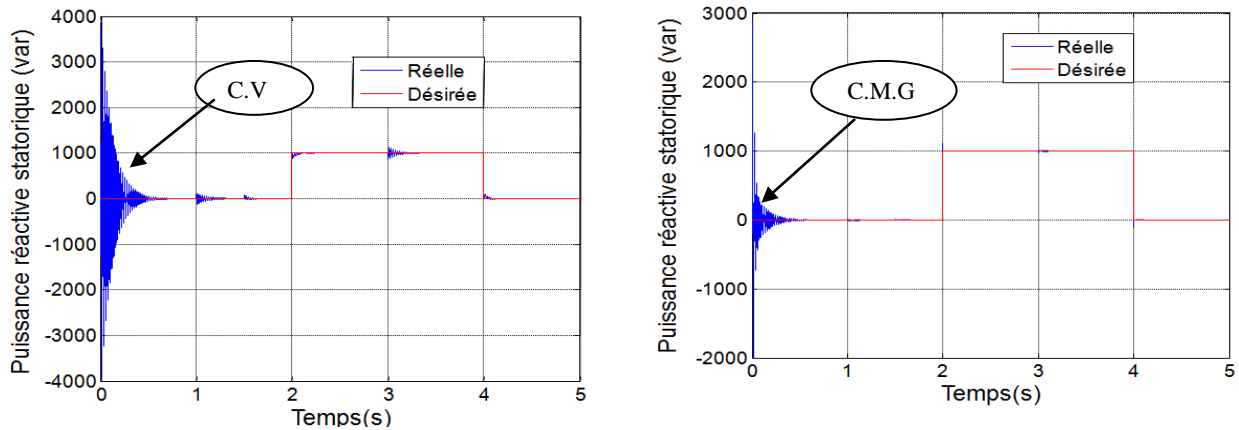


Figure V-7 : Puissance réactive statorique pour les deux commandes.

Dans cet essai, nous avons visualisé la forme des deux puissances active et réactive pour une durée de simulation $T_S = 5s$. Les quatre commandes proposées présentent une forte robustesse et assurent des bonnes performances même en présence des petites variations paramétriques avec des perturbations externes; cependant, la commande par mode glissant se présente comme la meilleur commande ayant des allures des puissances presque lisses et un bon suivi des allures des consignes.

V.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une étude comparative entre les deux commandes appliquées sur notre système. On a utilisé, trois approches fondamentales qualitative, quantitative et robustesse. Les résultats obtenus montrent bien que la commande par mode de glissant est la commande la plus performante et la plus efficace sur le système de conversion d'énergie éolienne considéré par rapport à la commande vectoriel en présence et absence des variations paramétriques et externes.



**CONCLUSION
GÉNÉRA**

Le but de ce travail concerne l'étude des deux stratégies de contrôle des systèmes de production d'énergie éolienne, à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans le premier chapitre, une généralité sur les systèmes d'énergie éolienne a été présentée par des différents types d'éoliennes raccordées au réseau et leurs capacités de réglage ainsi que les différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Puis, on a présenté une description générale de l'ensemble des éléments constituant du système. Dans le deuxième chapitre, on a mené une modélisation globale de ses éléments en mode connecté au réseau, à savoir la machine asynchrone double alimentation entraînée par une turbine à calage variable pour la maximisation et la limitation de la puissance extraite, qui est pilotée par le rotor via un onduleur et un bus continu placé en aval de ce convertisseur, dont la liaison au réseau est réalisée par un redresseur MLI qui permet le contrôle de bus continu avec régulation de facteur de puissance côté réseau.

Nous avons synthétisé des lois de commande non linéaire robuste dans le but est d'assurer la stabilité pour contrôler indépendamment l'échange des puissances statoriques produites vers le réseau, les deux commandes synthétisés sont, la commande vectorielle et la commande par mode glissant.

Dans ce qui suit, nous avons fait une étude comparative entre deux techniques de commande étudiée. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de ces techniques pour l'asservissement des puissances. Les résultats présentés dans ce travail, nous ont amenée à conclure que la commande par mode glissant présente des meilleures performances (poursuite et robustesse) que la commande vectoriel.

Enfin, on peut avancer un certain nombre des perspectives :

- Etudier la MADA associée à d'autres stratégies de commande.
- Utiliser d'autres types de convertisseurs dans une chaîne de conversion éolienne.
- l'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commandes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *E. Golding, The generation of electricity by wind power, Haldsted Press, New York, 1976.*
- [2] *Le Gourrière, Désiré, Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations, Paris, Editions Eyrolles, 1980.*
- [3] *Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des Installations, édition Eyrolles, 1982.*
- [4] *Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.*
- [5] *O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.*
- [6] *Thomas Ackermann, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.*
- [7] <http://www.windpower.org/fr/core.html>
- [8] *R. Ramakumar, A. Naeter, "Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas", Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.*
- [9] *Technique de l'ingénieur BM 4640.*
- [10] *H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.*
- [11] *L. Chang, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", IEEE Canadian Review, Summer/Été 2002, PP. 1-5.*
- [12] *B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed, " Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire : Perspectives offertes par les ressources renouvelables", Revue 3EI, no36 Mars 2004, pp. 1-14.*
- [13] *M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.*
- [14] *WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.*
- [15] *P. Monjean, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu ». Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2012.*
- [16] *F. KENDOULI, « Centrale éolienne et qualité de énergies électrique ». Thèse doctorat, À l'Université Mentouri de Constantine 2012.*
- [17] *S. Hamecha, « Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants Permanents ». Thèse doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Alger, Le 13 Juin 2013.*
- [18] *Y. WANG, « Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille. 20 -11- 2012.*

- [19] Yongchang Zhang, Jianguo Zhu, Jiefeng Hu. « Model predictive direct torque control for grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generator ». *Proceedings of the 2011 IEEE. International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) 15-18 May 2011 Niagara Falls*, pp. 765 –770.
- [20] Paul-Etienne VIDAL, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». *Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2004*.
- [21] G. Segulier, F. Notelet, « *Electrotechnique industrielle* ». Edition Lavoisier, 2006.
- [22] A. Dendouga, « *Contrôle des puissances active et réactive de la machine a double alimentation (DFIM)* ». *Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010*.
- [23] S. EL AIMANI, « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* ». *Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004*.
- [24] S. EL AIMANI, « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* ». *Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004*.
- [25] V. COURTECUISSÉ, « *Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique* ». *Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, le 20 novembre 2008*
- [26] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, M. M. Hand, « *Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization* ». *Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006*.
- [27] V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano *, « *Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model* ». *Energy Conversion and Management, vol : 50 (2009), PP. 413–421*.
- [28] P. Monjean, « *Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu* ». *Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2012*.
- [29] R. Rouabhi, R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « *Hybrid Backstepping Control of a Doubly Fed Wind Energy Induction Generator* ». *The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol: 11, N: 1, January 2015, pp. 367-376*.
- [30] N. Khezami, « *Commande multimodèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence* ». *Thèse de Doctorat, l'école centrale de Lille 2011*.
- [31] Y. EL TOUS, « *Pitch angle control of variable speed wind turbine* ». *American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (2), pp 118-120, 2008*.
- [32] V. Rogez, « *Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire* ». *Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004*.

- [33] S. Mokrane, « *Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération* ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Aout 2014.
- [34] Brice Beltran, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Senior Member, IEEE, and Tarek Ahmed-Ali, « *Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine* ». *IEEE Trans. Energy Convers.* vol. 27, no. 2, pp. 261–269, Jun. 2012.
- [35] H.T. Jadhav, Ranjit Roy, « *A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator* ». *Int J Electr Power Energy Syst*, Vol. 49, No. 1, july 2013, pp. 8–18.
- [36] S. Hamecha, « *Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants Permanents* ». Thèse doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Alger, Le 13 Juin 2013.
- [37] R. Rouabhi « *Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée* ». Thèse de Doctorat, Université batna2 2016.
- [38] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « *Network power flux control of a wind generator* ». *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 3, pp 615- 622, Elsevier 2009.
- [39] P.Rioual, H. Pouliquen, J-P. Louis, « *Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation* ». *The European Power Electronics Association*, N°13-169, 1993.
- [40] R. Abdelli, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Tounzi, « *Improved direct torque control of an induction generator used in a wind conversion system connected to the grid* ». *ISA Transactions* 52(2013).pp:525–538.
- [41] H.Zeghlache « *méthode des commandes appliquées à la stabilisation d'attitude d'un hélicoptère a quatre rotors* ». Thèse d'ingénieur, université de M'sila 2010.
- [42] H. Bouadi, « *Synthèse de lois de commande stabilisantes pour un UAV type Quadrotor étude et application* », Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, ALGERIE 2007.

ANNEXES

Annexe A

1- Les paramètres de la machine à induction double alimentée:

Valeurs nominales :

<i>Puissance nominale :</i>	$P_n = 4KW.$
<i>Tension nominale :</i>	$v/U = 220/380V - 50Hz.$
<i>Courant nominale :</i>	$i/I = 15/8.6A.$
<i>La vitesse nominale :</i>	$\Omega_n = 1440 \text{ tr/min}.$
<i>Nombre de paires de pôles :</i>	$P = 2.$

Paramètre :

<i>Résistance du stator:</i>	$R_s = 1.2\Omega.$
<i>Résistance du rotor:</i>	$R_r = 1.8 \Omega.$
<i>Inductance stator :</i>	$L_s = 0.1554H.$
<i>Inductance du rotor:</i>	$L_r = 0.1568H.$
<i>Inductance Mutuelle :</i>	$M = 0.15H.$

Constantes mécaniques :

<i>Moment d'inertie:</i>	$J = 0.2 \text{ Kg.m}^2.$
<i>Coefficient de frottement:</i>	$f = 0.001N.m.s/rd.$

2- Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

<i>Nombre de pale:</i>	$N_p = 3.$
<i>Diamètre d'une pale :</i>	$R_T = 3m.$
<i>Gain du multiplicateur :</i>	$G = 5.4.$
<i>Inertie:</i>	$J = 315 \text{ Kg.m}^2.$
<i>Coefficient:</i>	$f = 0.0024 \text{ N.m.s/rd}.$

3- Paramètres du filtre :

<i>Résistance du filtre :</i>	$R_f = 0.25\Omega.$
<i>Inductance du filtre :</i>	$L_f = 0.005H.$

4- Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :

$$C = 4400 \mu F.$$

Annexe B

3- Dimensionnement du régulateur PI

La figure (AN-1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

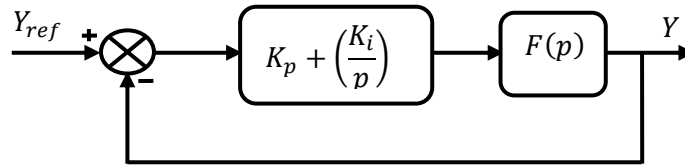


Figure AN-1 : Schéma bloc d'un système réglé par un PI.

La forme du correcteur est la suivante : $K_p + \left(\frac{K_i}{p}\right)$

Avec K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur ;

Si on considère la fonction du transfert suivante :

$$F(p) = \left(\frac{K}{1 + \tau p}\right)$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(p) = \left(\frac{K_p + \left(\frac{K_i}{p}\right)}{1 + \tau p}\right) = \left(\frac{K(K_p p + K_i)}{p \cdot (1 + \tau p)}\right) = K K_i \frac{1 + \left(\frac{K_p \cdot p}{K_i}\right)}{p \cdot (1 + \tau p)}$$

On prend $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

Alors $F_{BO}(p) = \frac{K_i \cdot K}{p}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(p) = \left(\frac{K_i \cdot K}{K \cdot K_i + p}\right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{K_i \cdot K} p}\right)$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut : $t_r = 3 \cdot \frac{1}{K_i \cdot K}$

Or $K_i = \frac{K_p}{\tau}$ Alor $t_r = 3 \cdot \frac{1}{K_p \cdot K}$

$$D'ou \begin{cases} K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{t_r \cdot K} \\ K_i = \frac{3}{t_r \cdot K} \end{cases}$$

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par Mr : ROUABHI Riyadh

Mr : HERIZI Abdelghafour

Présenté par : ZEGHLACHE Hemza & BETKA Khalid

Thème

Etude Comparative Entre Différents Techniques de Commande
Appliquée sur un Système Eolien à Vitesse Variable à Base d'une
MADA

Résumé

Le travail réalisé consacré à l'étude et la commande du système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales, et pilotée à travers les variables rotoriques par deux convertisseurs bidirectionnels. Dans la première partie on a présenté l'état de l'art sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion utilisés, en suite nous avons modélisé la chaîne éolienne qui a été adoptée à partir de l'étude théorique. Dans la troisième et la quatrième partie, on a présenté et développé les commandes nécessaires pour contrôler les puissances active et réactive produites par ce système. Enfin, on s'est intéressé à l'étude comparative entre les deux commandes étudiées. Les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances à travers l'application de ces commandes sur la meilleure architecture de la chaîne utilisée pour obtenir un rendement élevé et une qualité de production optimale dans ce domaine.

Mots clés:

Energie éolienne ; Turbine ; MPPT ; MADA ; Convertisseurs bidirectionnels ; Commande Vectorielle ; Commande par Mode Glissant.