

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLÔME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE: AUTOMATIQUE

THEME

Contribution à la modélisation et la commande
d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone
à double alimentation

Proposé et dirigé par :

M^{me}. BELOUNIS Ouassila
M^r. ROUABHI Riyadh

Présenté par :

MEZERZI Imad

Année Universitaire: 2012/2013

N° d'ordre : 073

REMERCIEMENT

A l'issue de cette fin de travail j'adresse mes remerciements premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mes encadreurs Mme BELOUNIS Ouassila et Mr ROUABHI Riyadh pour avoir proposer et diriger ce modeste travail et pour son continuel suivi et continu tout au long de la réalisation et la correction de cette mémoire. Elle nous a présenté un excellent exemple de la compétence scientifique, discipline et générosité.

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger mon travail.

Je tiens à remercier vivement toute personnes qui m'a aidé de prés ou de loin à accomplir ce travail.



Dédicace

*Je dédie ce mémoire à grande mère et à mes très chers parents
pour leurs soutien moral et financier,, pour leurs
encouragements et pour les sacrifices qu'ils ont endurés
dans les moments les plus ardues.*

A mes frères

A mes sœurs

Et à toute la famille Mezerzi et ladjel

Et mes amis.

A tous mes collègues de la promotion 2013.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATION

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CHAPITRE I : L'état de l'art et modélisation de la turbine éolienne.

I.1	Introduction.....	3
I.2	Définition et principe de fonctionnement de l'éolienne.....	3
I.2.1	Développement de l'énergie éolienne.....	4
I.2.2	Quelques notions sur le vent.....	5
I.2.3	Direction et vitesse du vent	5
I.3	Classification des éoliennes.....	6
I.3.1	Différents types d'éolienne et leurs utilisations.....	6
I.3.1.1	Les éoliennes à axe vertical.....	6
I.3.1.2	Les éoliennes à axe horizontal	7
I.3.2	Principales composantes des éoliennes à axe horizontal.....	10
I.3.3	Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable	11
I.3.3.1	Fonctionnement à vitesse fixe	11
I.3.3.2	Fonctionnement à vitesse variable	11
I.3.4	Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	11
I.3.4.1	Systèmes non couplés au réseau alternatif	11
I.3.4.2	Systèmes couplés au réseau alternatif	12
I.4	Conversion de l'énergie de vent.....	14
I.4.1	Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	15
I.4.1.1	Loi de Betz	15
I.4.1.2	Intérêt de la vitesse variable	17
I.5	Modélisation et stratégies de commande de la turbine à vitesse variable	18
I.5.1	Modélisation de la turbine	18
I.5.1.1	La conversion aérodynamique	19
I.5.1.2	Le coefficient de puissance $CP(\lambda, \beta)$	19
I.5.1.3	L'équation dynamique de la turbine.....	20
I.5.2	Modèle de l'actionneur des pales	22
I.5.3	Stratégies de commande de la turbine	23
I.5.3.1	Objectifs de la commande.....	23
I.5.3.2	Caractéristique de puissance	23
I.5.3.3	Commande dans la zone I	24
I.5.3.4	Commande dans la zone III.....	27
I.5.4	source primaire : le vent	27
I.6	Résultats de simulation.....	29
I.7	Interprétations des résultatsP	29

I.8 Conclusion.....	30
----------------------------	-----------

CHAPITRE II : Etude et modélisation de MADA.

II.1 Introduction	31
II.2 Structure de la MADA.....	31
II.3 Modes de fonctionnement de la MADA.....	31
II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	32
II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	33
II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	33
II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	33
II.4 Présentation de quelques études faites dans le domaine de la MADA.....	33
II.4.1 MADA à rotor bobine	33
II.4.2 MADA en cascade (Cascade Doubly Fed induction Machine).....	34
II.4.3 MADA sans balais (Brushless Doubly Fed induction Machine)	34
II.5 Quelques configurations de la MADA à rotor bobiné.....	34
II.5.1 Configuration pour application moteur	35
II.5.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur	35
II.5.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur.....	35
II.5.1.3 Alimentation par deux convertisseurs indépendants	36
II.5.2 Configuration pour application génératrice.....	36
II.5.2.1 MADA à énergie rotorique dissipée	36
II.5.2.2 MADA «structure de Kramer »	37
II.5.2.3 MADA «structure de Scherbius avec cycloconvertisseur »	38
II.5.2.4 MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI »	38
II.5.3 Les avantages et les inconvénients	39
II.5.3.1 Les avantages.....	39
II.5.3.2 Les inconvénients	39
II.6 Application des machines asynchrones à double alimentation.....	40
II.6.1 Application moteur	40
II.6.2 Application génératrice	40
II.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	40
II.7.1 Hypothèses simplificatrices	41
II.7.2 Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel générale	41
II.7.3 La transformée de Park	42
II.7.4 Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)	44
II.7.4.1 Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA	44
II.7.4.2 Mise sous forme d'équation d'état.....	46
II.8 Résultats de simulation numérique du système	47
II.8.1 Résultats de simulation pour fonctionnement mode moteur (MADA)	47
II.8.2 Interprétation des résultats	49

II.8.3 Résultats de simulation pour fonctionnement mode générateur (GADA).....	49
II.8.4 Interprétations des résultats.....	52
II.9 Conclusion.....	52

CHAPITRE III : Commande vectorielle des puissances actives et réactives.

III.1 Introduction.....	53
III.2 Le principe de la commande vectorielle de la MADA	53
III.3 Etablissement du modèle de la GADA.....	54
III.3.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé	54
III.3.2 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique	55
III.3.3 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	55
III.3.4 Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques.....	56
III.3.5 Type des régulateurs utilisés.....	58
III.4 Commande indirecte.....	59
III.4.1 Commande en boucle ouverte.....	59
III.4.2 Commande en boucle fermée	60
III.4.3 Résultats de simulation	61
III.4.4 Interprétation des résultats	65
III.4.5 Résultats de Simulation du système avec turbine	66
III.4.6 Interprétation des résultats	69
III.5 Modélisation et la commande d'un onduleur à deux niveaux GADA.....	69
III.5.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux	69
III.5.2 Commande triangulaire-sinusoïdale	71
III.6 Commande Vectorielle De La GADA Avec Un Convertisseur A Deux Niveaux.....	72
III.6.1 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.....	72
III.6.2 Modélisation du redresseur à MLI	73
III.6.2.1 La source d'alimentation	73
III.6.2.2 L'étage Convertisseur	74
III.6.2.3 La charge	74
III.6.3 Régulation en cascade du redresseur à MLI dans le repère (d,q).....	75
III.6.3.1 Modélisation dans le repère (d,q)	75
III.6.3.2 Résultats de simulation	77
III.6.3.3 Interprétation des résultats	78
III.6.4 Schéma synoptique du système	79
III.6.5 Résultats de simulation du système avec turbine	79
III.6.6 Interprétation des résultats	81
III.7 Conclusion.....	82

CHAPITRE IV : Commande par mode glissant des puissances actives et réactives.

IV.1 Introduction.....	83
-------------------------------	-----------

IV.2	Système à structure variable.....	83
IV.2.1	Objectif de la commande par mode glissant	83
IV.2.2	Principe.....	83
IV.2.1.1	Régime glissant idéal.....	84
IV.2.1.2	Régime glissant réel	84
IV.3	Différentes structures du contrôle par mode de glissement	85
IV.3.1	Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	85
IV.3.2	Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état	85
IV.3.3	Structure de régulation par ajout de la commande équivalente	86
IV.4	Synthèses de la commande robuste par mode glissant.....	86
IV.4.1	Choix des surfaces de glissement.....	87
IV.4.2	Conditions d'existence et de convergence du régime glissant.....	88
IV.4.2.1	La condition directe de commutation.....	89
IV.4.2.2	La fonction de Lyapunov	89
IV.4.2.3	Détermination de la loi de commande	89
IV.5	Le phénomène du Chatterings.....	91
IV.5.1	La proposition de Slotine.....	92
IV.5.2	La proposition de Harshima	93
IV.6	Domaine d'applications de la commande par mode glissant	93
IV.7	Avantages de la commande par mode glissant	94
IV.8	Commande non linéaire par mode glissant.....	94
IV.8.1	Modèle de la GADA.....	94
IV.8.1.1	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	95
IV.8.1.2	Relations de la dérivée de courants rotoriques	95
IV.8.2	Choix des surfaces de glissements.....	95
IV.8.3	Conditions de convergence.....	95
IV.8.4	Loi de commande par mode glissant	96
IV.8.4.1	Contrôle de la puissance active	96
IV.8.4.2	Contrôle de la puissance réactive	97
IV.8.5	Résultats de Simulation numérique du système sans turbine	98
IV.8.6	Résultats de Simulation du système avec turbine	101
IV.8.7	Schéma synoptique du système global	103
IV.8.8	Résultats de Simulation du système avec convertisseur et avec turbine.....	104
IV.8.9	Interprétation des résultats	106
IV.9	Etude comparative entre les techniques de commande proposées	106
IV.10	Conclusion.....	108
CONCLUSION GÉNÉRALE		109
BIBLIOGRAPHIE		111
ANNEXES		113

CHAPITRE I : L'état de l'art et modélisation de la turbine éolienne.

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	4
Figure I.2 : Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1996 à 2011.	4
Figure I.3 : Éoliennes à axe vertical.	7
Figure I.4 : Éoliennes à axe horizontal.	7
Figure I.5 : Quelques applications du (lente éolienne).	8
Figure I.6 : Quelques applications des (rapides éoliennes).	9
Figure I.7 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.	10
Figure I.8 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.	12
Figure I.9 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.	12
Figure I.10 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne.	13
Figure I.11 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne.	14
Figure I.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	15
Figure I.13 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.	15
Figure I.14 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne.	17
Figure I.15 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur.	17
Figure I.16 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.	18
Figure I.17 : Schéma de la turbine.	18
Figure I.18 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative.	20
Figure I.19 : Modèle de la turbine.	20
Figure I.20 : Modèle simplifié de la turbine.	21
Figure I.21 : Schéma bloc du modèle de la turbine.	22
Figure I.22 : Orientation des pales.	22
Figure I.23 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.	23
Figure I.24 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne.	24
Figure I.25 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.	25
Figure I.26 : Commande indirecte de vitesse (Zone I).	27
Figure I.27 : Schémas bloc de la commande de l'angle de calage des pales.	27
Figure I.28 : Profil du vent appliqué à la turbine.	28
Figure I.29 : la vitesse mécanique et la puissance produite.	29
Figure I.30 : la vitesse du vent et Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique.	29

CHAPITRE II : Etude et modélisation de MADA.

Figure II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.	31
Figure II.2 : Les différents modes de fonctionnement de la MADA.	32
Figure II.3 : MADA à rotor bobiné.	33
Figure II.4 : MADA en cascade.	34
Figure II.5 : MADA sans balais.	34

LISTE DES FIGURES

Figure II.6 : Schéma de la MADA en moteur avec rotor alimenté par un onduleur.....	35
Figure II.7 : Schéma de la MADA en moteur avec rotor alimenté par un cycloconvertisseur.....	35
Figure II.8 : Schéma de la MADA alimentée par deux onduleurs.....	36
Figure II.9 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	37
Figure II.10 : Effet de la variation de la résistance R sur la caractéristique.....	37
Figure II.11 : MADA, structure Kramer.....	37
Figure II.12 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	38
Figure II.13 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	39
Figure II.14 : Modèle de PARK de la MADA.....	44
Figure II.15 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	44
Figure II.16 : Courant statorique et rotorique de phase (I_{sa} et I_{ra})(A).....	47
Figure II.17 : Vitesse mécanique et couple électromagnétique.....	47
Figure II.18 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.....	48
Figure II.19 : Les composantes du courant statoriques.....	48
Figure II.20 : Les composantes du courant rotoriques.....	48
Figure II.21 : Les tensions triphasées appliquées au stator et celle appliquée au rotor de la MADA.....	49
Figure II.22 : Les courants statoriques triphasées avec un zoom.....	50
Figure II.23 : Les courants rotoriques triphasées avec un zoom.....	50
Figure II.24 : Courant rotorique GADA (d , q).....	50
Figure II.25 : Courant statorique de GADA (d , q).....	50
Figure II.26 : Flux statorique et rotorique de GADA (d , q).....	51
Figure II.27 : Puissances statoriques (P_s , Q_s).....	51
Figure II.28 : Puissance rotorique (P_r , Q_r).....	51
Figure II.29 : Couple électromagnétique.....	52

CHAPITRE III : Commande vectorielle des puissances actives et réactives.

Figure III.1: Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.....	53
Figure III.2 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	57
Figure III.3 : Schéma de la régulation.....	59
Figure III.4 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.....	60
Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.....	61
Figure III.6 : La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.....	62
Figure III.7 : La puissance active et réactive statorique et sont reference sans boucle de puissance.....	62
Figure III.8 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.....	62
Figure III.9 : Le flux statorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance.....	62
Figure III.10 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.....	63
Figure III.11 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance.....	63
Figure III.12 : Le couple électromagnétique et le flux statorique resultant sans boucle de puissance.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure III.13 : Le couple électromagnétique et le flux statorique resultant avec boucle de puissance.....	64
Figure III.14 : La tension V_{ra} (V) et le courant I_{ra} (A) d'une phase rotorique boucle ouverte.....	64
Figure III.15 : la tension V_{ra} (V) et le courant I_{ra} (A) d'une phase rotorique boucle fermée.....	64
Figure III.16 : Tension et courant d'une phase statorique avec un zoom (boucle fermée).....	65
Figure III.17 : Tension et courant d'une phase statorique avec un zoom (boucle ouverte).....	65
Figure III.18 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.....	66
Figure III.19 : La tension d'une phase rotorique V_{ra} (V).....	66
Figure III.20 : La pissance active et réactive et flux statorique.....	67
Figure III.21 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.....	67
Figure III.22 : Les composantes du courant rotoriques I_r (A).....	67
Figure III.23 : zoom les composantes du courant rotoriques I_r (A).....	68
Figure III.24 : Les courants rotoriques et statoriques (d, q) (A).....	68
Figure III.25 : Les composantes du courant rotoriques et le flux résultat statorique et le couple électromagnétique.....	68
Figure III.26 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux-.....	69
Figure III.27 : Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	70
Figure III.28 : Structure du redresseur à MLI.....	73
Figure III.29 : Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.....	75
Figure III.30 : Schéma bloc de la commande en cascade du redresseur à MLI.....	76
Figure III.31 : Bloc de régulation des courants avec compensation de la tension réseau.....	77
Figure III.32 : Boucles de régulation équivalentes des courants et de la tension.....	77
Figure III.33 : Tension du bus continu avec un zoom.....	78
Figure III.34 : Courant et tension de ligne avec un zoom.....	78
Figure III.35 : Schéma synoptique du système global (convertisseur & GADA & turbine).....	79
Figure III.36 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique et la puissance de turbine(produit).....	79
Figure III.37 : La puissance active et réactive statorique et les composantes de flux.....	80
Figure III.38 : le flux statorique résultat et le couple électromagnétique.....	80
Figure III.39 : Les composantes du courant statoriques rotoriques.....	80
Figure III.40 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.....	81
Figure III.41 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.....	81

CHAPITRE IV : Commande par mode glissant des puissances actives et réactives.

Figure IV.1: Convergence du système glissant.....	84
Figure IV.2 : Glissement réel.....	84
Figure IV.3 : régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	85
Figure IV.4 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.....	86
Figure IV.5 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	86
Figure IV.6 : Linéarisation exacte de l'écart.....	88
Figure IV.7 : Démonstration du mode de glissement.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure IV.8 : Commande équivalente.	90
Figure IV.9 : Fonction sign.	91
Figure IV.10 : Commande équivalente.	92
Figure IV.11 : Fonction de saturation « sat ».	92
Figure IV.12 : Fonction de saturation « cont ».	93
Figure IV.13 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.	98
Figure IV.14 : Les composantes du flux statorique.	98
Figure IV.15 : Le flux statorique résultat et le couple électromagnétique.	99
Figure IV.16 : Les composantes du courant statoriques et rotorique.	99
Figure IV.17 : les composantes du courant rotorique.	99
Figure IV.18 : La puissance active et réactive statorique.	100
Figure IV.19 : tension et courant d'une phase rotoriques.	100
Figure IV.20 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les différents instants	100
Figure IV.21 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.	101
Figure IV.22 : La puissance active et réactive et flux statorique.	101
Figure IV.23 : La tension d'une phase rotorique V_{ra} (V).	101
Figure IV.24 : Les courants rotoriques et statoriques (d, q) (A)	102
Figure IV.25 : Les composantes du courant rotorique avec un zoom entre les différents instants.	102
Figure IV.26 : Les composantes du courants rotoriques (d,q) (A).	102
Figure IV.27 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.	103
Figure IV.28 : Le flux statorique résultat et le couple électromagnétique.	103
Figure IV.29 : Schéma synoptique du système (convertisseur et GADA et turbine).	103
Figure IV.30 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique et la puissance de turbine(produit).	104
Figure IV.31 : La puissance active et réactive statorique et les composantes de flux.	104
Figure IV.32 : le flux statorique résultat et le couple électromagnétique.	104
Figure IV.33 : Les composantes du courant statoriques rotoriques.	105
Figure IV.34 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.	105
Figure IV.35 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.	105
Figure IV.36 : La puissance active et réactive statorique et la tension d'une phase rotorique.	107
Figure IV.37 : La puissance active et réactive statorique.	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres.....	5
Tableau I.2 : classification des turbines éoliennes.	9
Tableau IV.1 : Critère de comparaison entre la commande vectorielle et la commande par mode glissant.....	108

NOTATION

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MAS	: Machine Asynchrone
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion
PWM	: Pulse-Width Modulation
f_r	: Fréquence des grandeurs rotorique
f_s	: Fréquence des grandeurs statorique
f_s	: Fréquence de la porteuse
a,b,c	: Indice correspondants aux trois phase a , b, c
max,min	: Valeur maximale (minimale)
C.V	: Commande Vectorielle
SCSV	: Système de commande à structure variable
C.M.G	: Commande par mode glissant
s , r	: Indice du stator , du rotor
d , q	: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature
R_s , R_r	: résistance statorique , rotorique
L_s , L_r	: Inductance propre statorique , rotorique
S	: la surface de glissement
T_s , T_r	: Constant de temps rotorique (statorique)
σ	: Coefficient de dispersion
Msr	: Inductance mutuelle stator- rotor
Mrs	: Inductance mutuelle rotor - stator
Ms	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
Mr	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
Φ_s, Φ_r	: Respectivement flux statorique et rotorique
Φ_{sd}, Φ_{sq}	: Les flux statoriques direct et en quadrature
Φ_{rd}, Φ_{rq}	: Les flux rotoriques direct et en quadrature
I_s, I_r	: Les courants de phase statorique et rotorique
I_{sq}, I_{sd}	: Le courant statorique direct et en quadrature dans le repère de PARK
I_{rd}, I_{rq}	: Les courant rotorique direct et en quadrature dans le repère de PARK
V_s, V_r	: Tension simple respectivement statorique et rotorique
V_{sd}, V_{sq}	: La tension statorique directe et en quadrature
V_{rd}, V_{rq}	: La tension rotorique directe et en quadrature
θ_s , θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
ω_s, ω_r	: Pulsation statorique , rotorique
P	: Pulsation mécanique
g	: Glissement
P_e	: Puissance d'entrée
PLL	: Phase Locked Loop

NOTATION

P_{Mec}	: La puissance mécanique
S_S	: Puissance apparente statorique
S_r	: Puissance apparente rotorique
p	: Operateur de LAPLACE
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_r	: Couple résistant
f_m	: Coefficient de frottement visqueux
J_m	: Inertie de la machine
P_S, Q_S	: Puissance active et réactive statorique
P_r, Q_r	: Puissance 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 respectivement du électromagnétique
Ω_{Topt}	: Le couple optimal de la turbine
Ω_{gopt}	: Le couple optimal du générateur
f_T, f_g	: Le coefficient 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
v_1	: Gain La surface de glissement de puissance active
v_2	: Gain La surface de glissement de puissance réactive
FTBO	: Fonction de Transfer en Boucle Ouverte
FTBF	: Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics [1].

La source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques ou thermo solaires. Elle peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie hydrolienne (énergie des vagues) ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, son prix peut être maîtrisable sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production [2].

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit [3].

Organisation de mémoire :

Ce travail est un sujet qui a attiré l'attention de plusieurs chercheurs depuis longtemps, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type machine asynchrone à double alimentation pour des fortes puissances, pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien.

Ce mémoire comporte quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous élaborons plusieurs parties :

- La première partie sera consacrée à la présentation des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne, Ce chapitre nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.

- La deuxième partie nous présenterons la modélisation et la stratégie de commande appliquée sur la turbine d'éolienne.

Le second chapitre est dédié à l'étude et la modélisation des différents éléments de la chaîne éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, En fin la simulation du fonctionnement de la machine en mode moteur et générateur.

Le troisième chapitre ainsi comporte deux parties :

- La première partie sera consacrée à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe et vitesse variable.
- La deuxième partie traite la commande du redresseur MLI à deux niveaux, après on passe à l'étude des performances de la conduite de la MADA. Le stator de la MADA est alimenté par une source triphasée et le rotor est connecté à un onduleur triphasé à MLI à deux niveaux, commandé par la stratégie triangulo- sinusoïdale. L'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés. En fin on a étudié le système complet : turbine– machine asynchrone double alimentation –convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons la théorie de la commande par mode de glissement, en l'occurrence, toutes les relations concernant ce mode de réglage seront établies de façon à permettre une application sur système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. L'objectif de cette commande est de contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux, dont le but est d'améliorer le comportement statique et dynamique du système.

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et perspective.

Chapitre

I

**L'état de l'art et
modélisation de la turbine
éolienne**

I.1. Introduction

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée.

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes suivants [1].

➤ Historique

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

Application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du Pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise). La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [1].

I.2 Définition et principe de fonctionnement de l'éolienne

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'une génératrice (figure I.1).

Le principe de fonctionnement de l'éolienne se résume donc en un système (couple rotor - génératrice) qui, à partir d'une énergie extrêmement variable (le vent), devra produire une énergie électrique présentant des caractéristiques constantes.

Tout en profitant de l'énergie gratuite de l'air qui fait tourner des pales qui sont solidaires à un rotor d'un générateur électrique qui a comme rôle de convertir cette énergie cinétique de l'air en énergie électrique prête à utiliser [2].

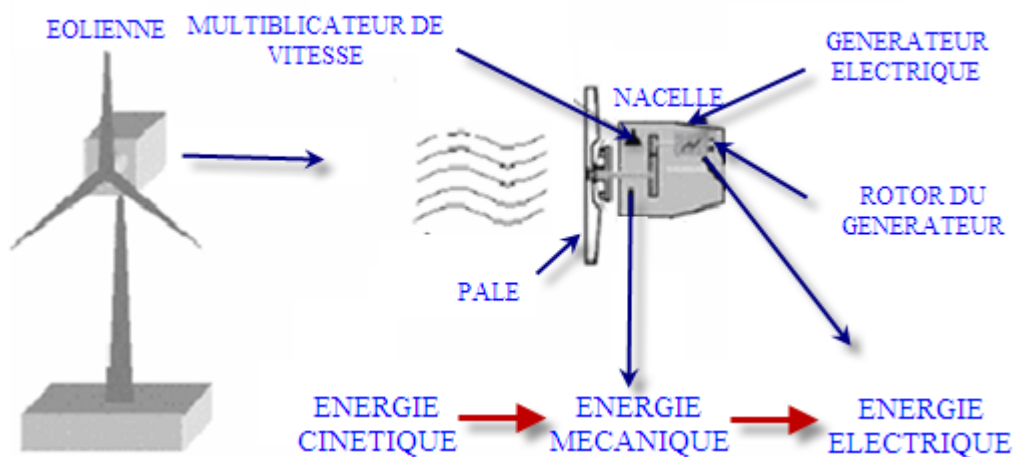


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.2.1 Développement de l'énergie éolienne

La production de l'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde ces dernières années (figure I.2) [2]. Ceci est dû aux avantages cités ci-dessus.

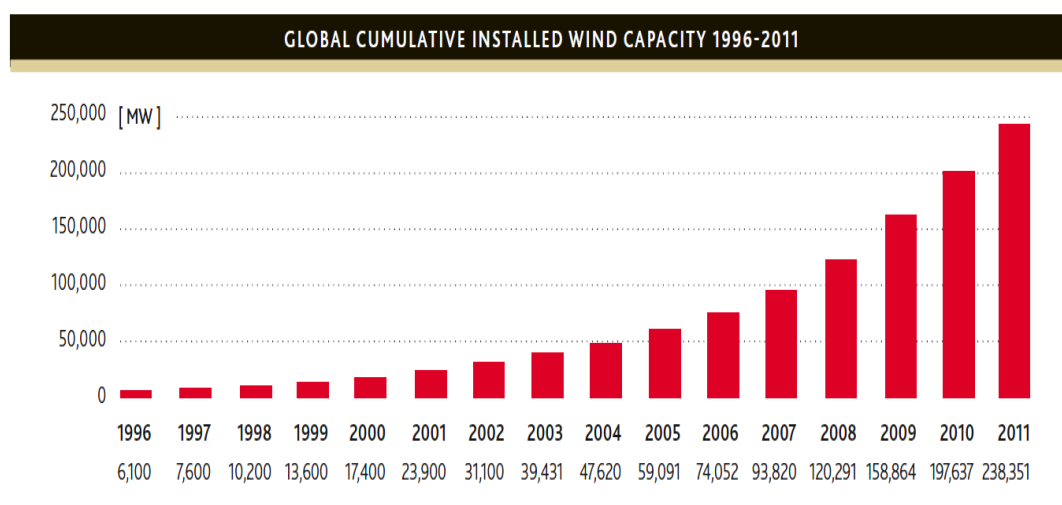


Figure I.2 : Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1996 à 2011[11].

I.2.2 Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse [1].

I.2.3 Direction et vitesse 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 [2].

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 1 :

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 brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I.1 : La vitesse du vent mesurée avec des anémomètres.

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 [1].

I.3 Classification des éoliennes

On peut classer les générateurs éoliens selon les différents critères. Ces derniers peuvent alors se classer selon.

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc...).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

I.3.1 Différents types d'éolienne et leurs utilisations

L'organe capteur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique afin de réaliser la conversion électromécanique tant que le mouvement est rotatif, les capteurs alors seront classés selon deux catégories [2] :

❖ Capteurs à axe horizontal. Et ❖ Capteurs à axe vertical.

I.3.1.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [3].



Figure I.3 : Éoliennes à axe vertical.

- **caractéristiques des éoliennes**
- Lentes (faible bruit).
- Pas de dispositif d'orientation des pales.
- Faible rendement aérodynamique.
- Grande sensibilité de C_p à la vitesse.

I.3.1.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Démarrer de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor trois pales étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [4], ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.



Éoliennes deux pales.

Éoliennes trois pales.

Figure I.4 : Éoliennes à axe horizontal.

➤ 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 multi pales 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 [6].

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 : $P=0.15 \cdot D^2 \cdot V^3$ [6].

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.



Figure I.5 : les éoliennes lente.

➤ 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.

Tableau (I.2) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [5].

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

Tableau I.2 : classification des turbines éoliennes.

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 [1].

Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen: $P=0.2 \cdot D^2 \cdot V^3$ [6].

Alors :

D :diamètre.

V : Vitesse de vent



Figure I.6 : les éoliennes rapides.

I.3.2 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

En général une éolienne est constituée de trois éléments principaux : la tour ou mât qui est l'élément porteur, une nacelle et l'ensemble rotor – pales [7].

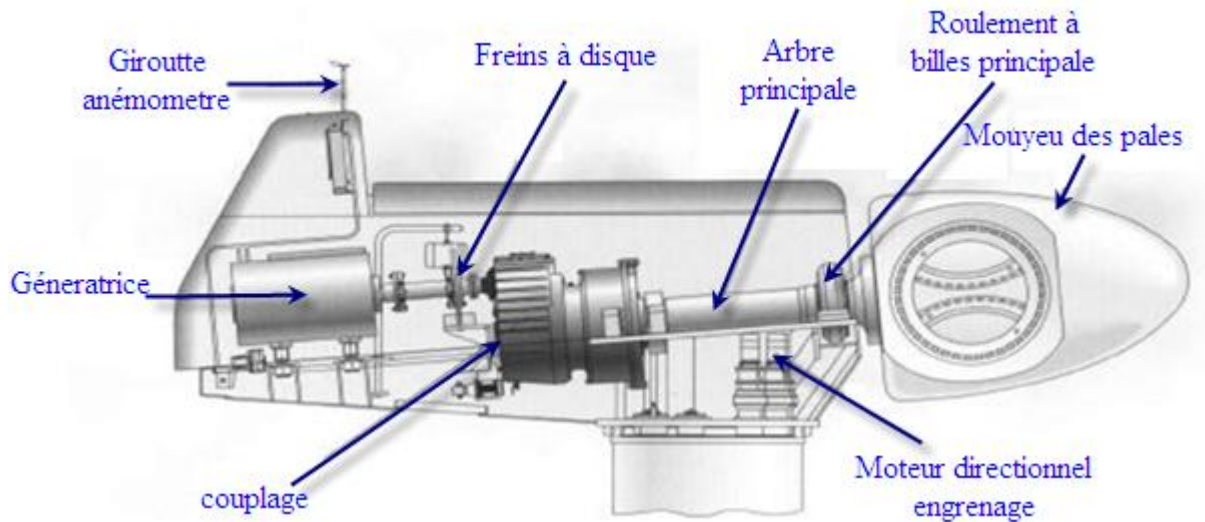


Figure I.7 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

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

La nacelle: regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

Le multiplicateur: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

Le système de refroidissement: se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

La génératrice électrique: c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

Le système de commande: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

L'arbre : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Le système d'orientation des pâles : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

I.3.3 Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable constitue l'une des plus importantes spécifications des aérogénérateurs, Nous allons respectivement citer en ce qui suit les avantages de l'un par rapport à l'autre :

I.3.3.1 Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins cher.

I.3.3.2 Fonctionnement à vitesse variable

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple.
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

I.3.4 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.3.4.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs.

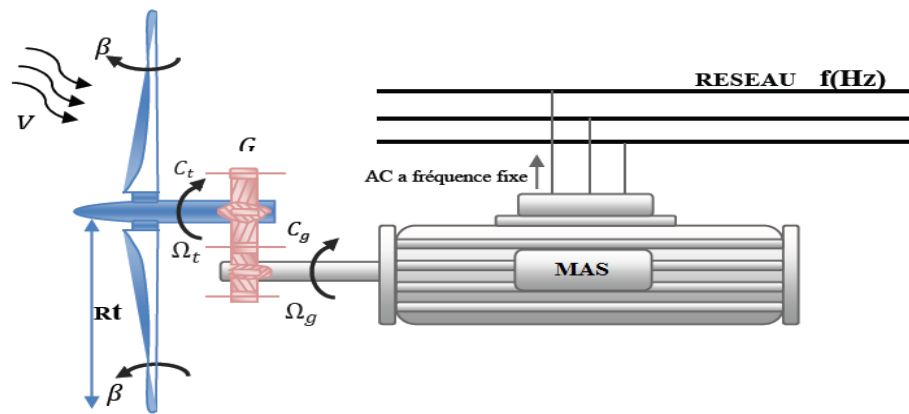


Figure I.8 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

I.3.4.2 Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [9].

➤ Machine synchrone

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (voir figure I.9) [9].

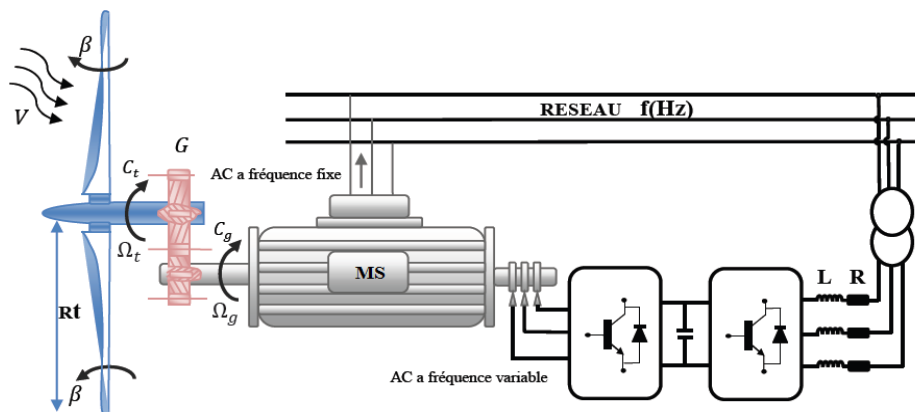


Figure I.9 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance [21].

➤ Machines Asynchrones à cage (MAS)

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point $g=0$)). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%) [21].

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau. De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommations de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau [21].

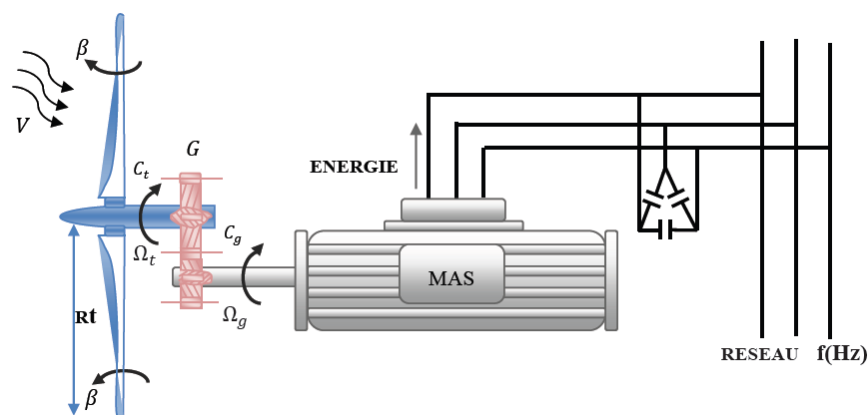


Figure I.10 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne.

➤ Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [5].

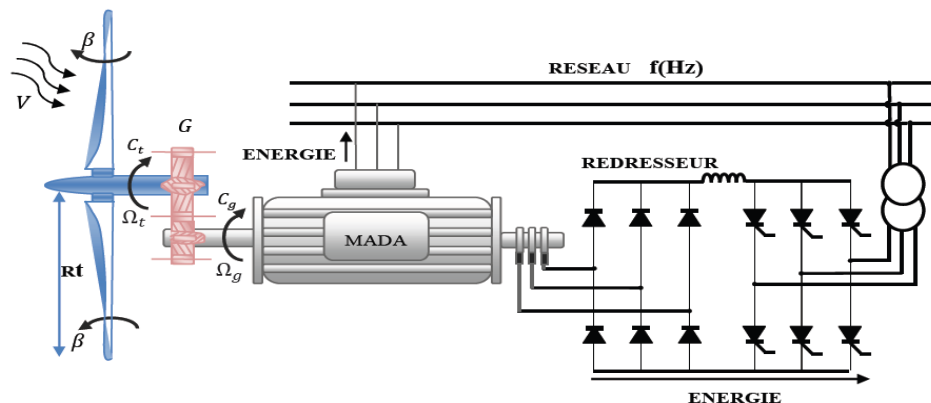


Figure I.11 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne.

I.4 Conversion de l'énergie de vent

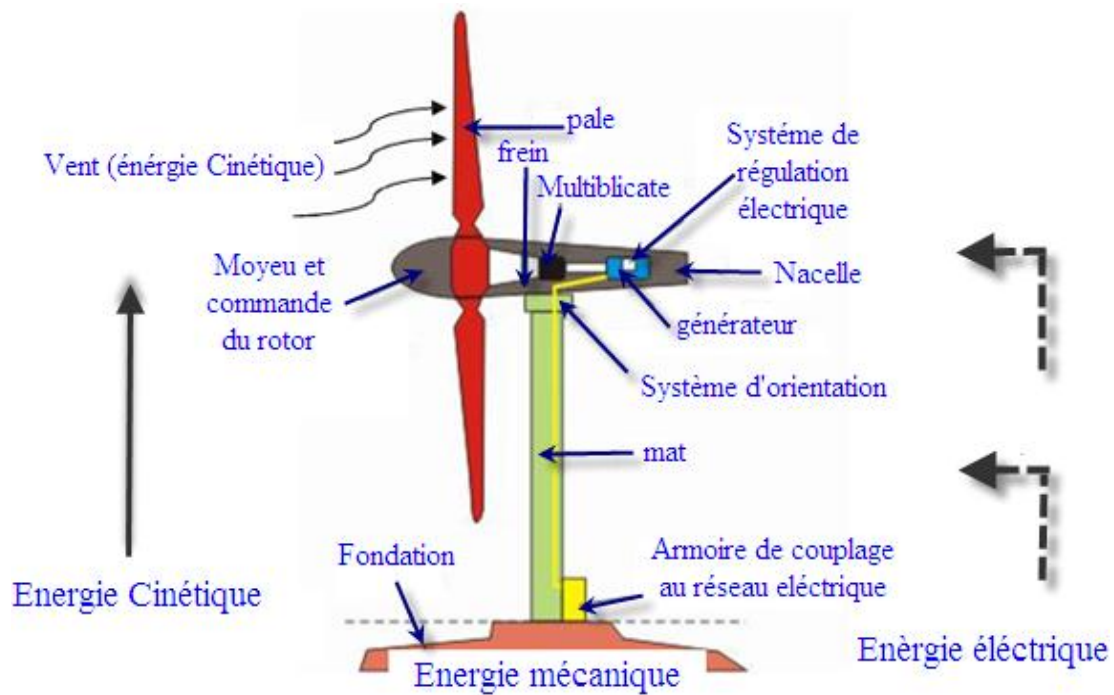


Figure I.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4.1 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.4.1.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I.9 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $(V_1 + V_2) / 2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [4] :

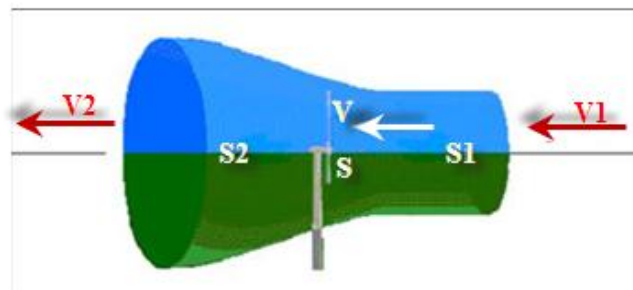


Figure I.13 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

De la figure (I.13) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie Cinétique :

E_s de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_s}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

On considère que la V au milieu du courant d'air :

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (I.2) et (I.3) on obtient :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante P_{mt} (mécanique théorique) serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{\frac{1}{2}} \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

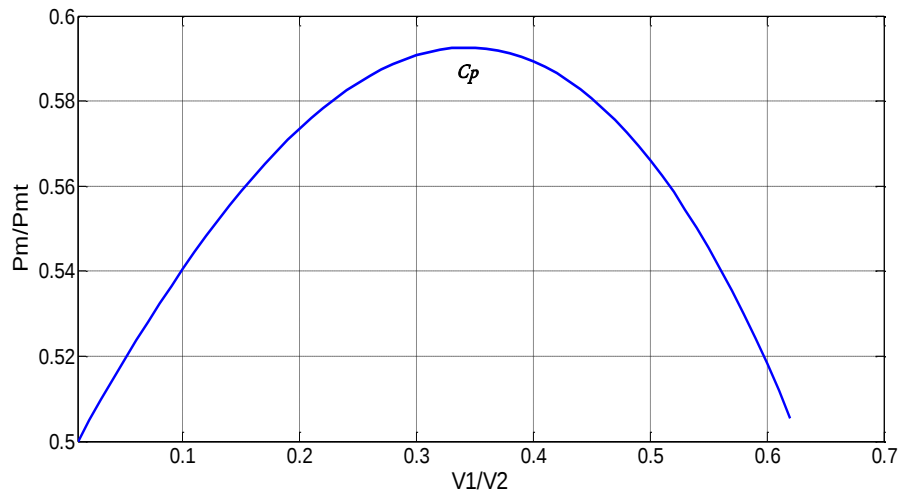


Figure I.14 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne.

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

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) P_{mt} = C_P(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_P(\lambda) \rho S V_1^3 \quad (I.10)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R_T}{V_1} \quad (I.11)$$

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

R_T : la longueur (rayon) de la pale.

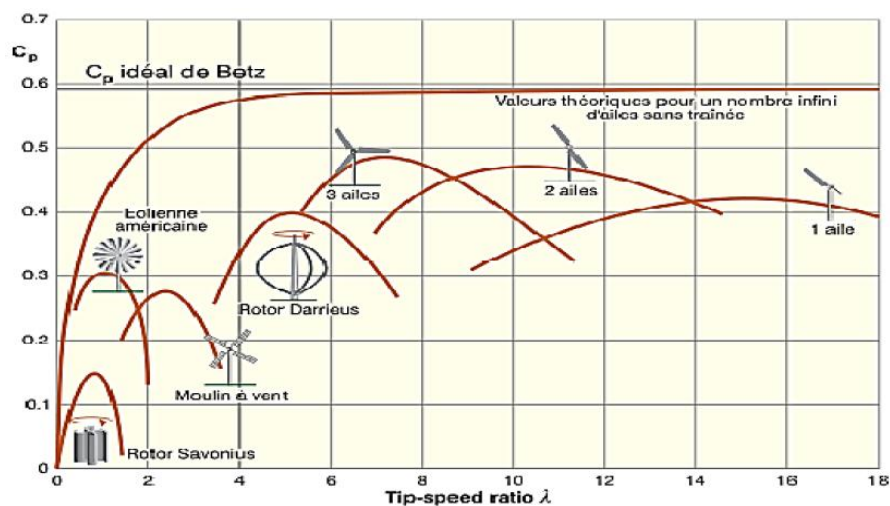


Figure I.15 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur[10].

I.4.1.2 Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la (figure I.16)

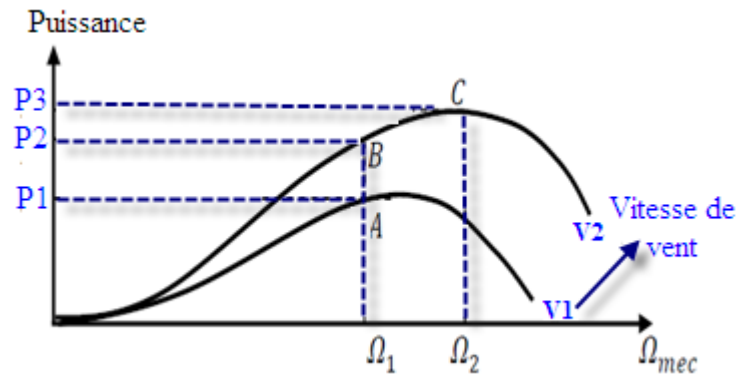


Figure I.16 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses [10].

Pour une vitesse du vent V_1 , et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [10].

I.5 Modélisation et stratégies de commande de la turbine à vitesse variable

I.5.1 Modélisation de la turbine

Le modèle (figure I.17) est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie. Considérons une turbine éolienne munie des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain de vitesse G .

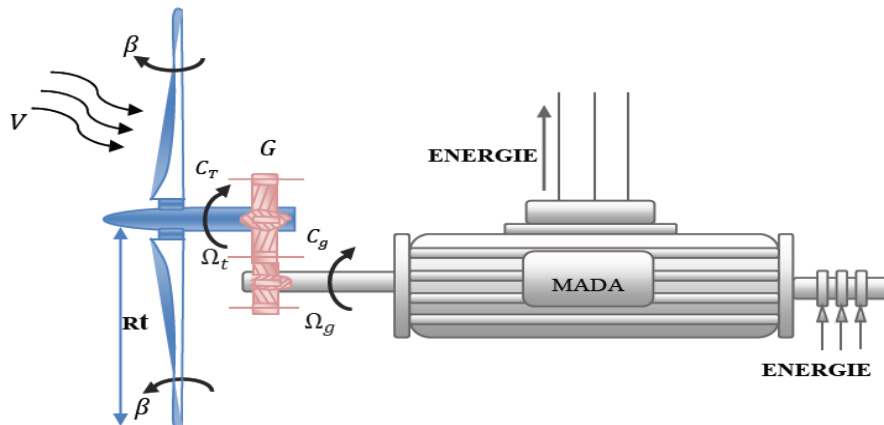


Figure I.17 : Schéma de la turbine éolienne.

I.5.1.1 La conversion aérodynamique

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_T :

$$P_T = C_P P_{amont} = \frac{1}{2} \rho \pi V^3 R_T^2 C_P \quad (I.12)$$

C_P : Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.

R_T :Le rayon des pales de la turbine.

$$\lambda = \frac{\Omega_T R_T}{V}$$

La puissance aérodynamique extraite du vent est donnée par l'équation (I.10), le couple s'écrit alors de la manière suivante :

$$C_T = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi V^2 R_T^3}{\lambda} C_P(\lambda, \beta) \quad (I.13)$$

Tenant en compte du multiplicateur, adaptateur de la vitesse entre la turbine et la génératrice, qui est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad (I.13) \quad \text{et} \quad \Omega_T = \frac{\Omega_g}{G} \quad (I.14)$$

I.5.1.2 Le coefficient de puissance $C_P(\lambda, \beta)$

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 kW pour notre simulation. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas, son évolution en fonction de λ est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, ses variations sont modélisées par l'approximation suivant:

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (I.18).

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (I.15)$$

La valeur maximale de C_p ($C_{p_{\max}} = 0.5$) est atteinte pour $\beta = 2$ et $\lambda = 9.2$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [10].

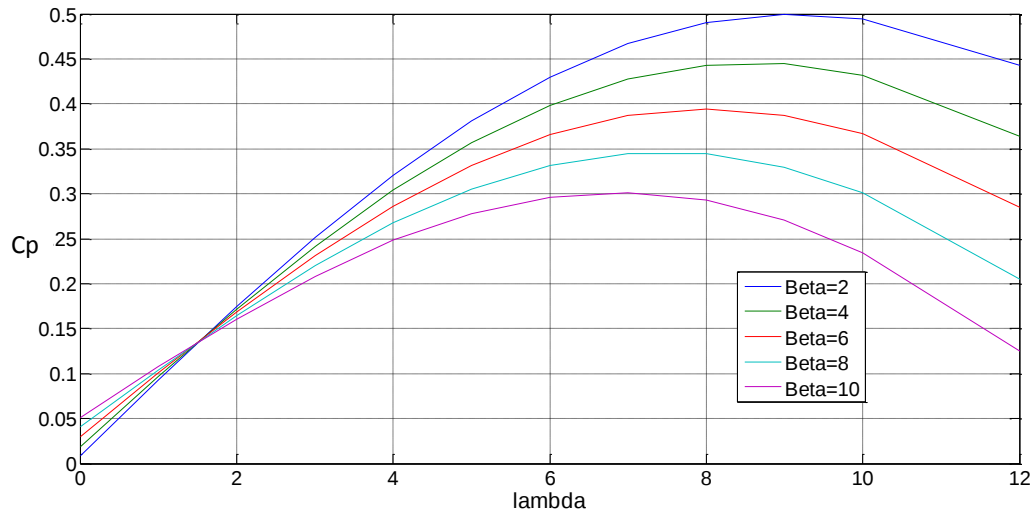


Figure I.18 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Et on observe que la valeur maximale de la C_p ne dépassera jamais la limite théorique de Betz (0,59).

I.5.1.3 L'équation dynamique de la turbine

Ce qui doit être modélisé c'est la transmission du couple et de la puissance captés par le rotor éolien. C'est-à-dire le comportement du train de puissance. Le train de transmission de puissance est constitué des pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur qui multiplie la vitesse de rotation de l'arbre rapide qui est couplé à son tour à la génératrice [21].

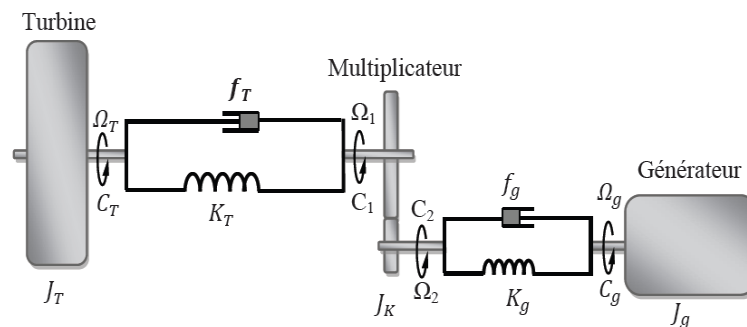


Figure I.19 : Modèle de la turbine.

Le modèle à trois masses équivalent de la chaîne de conversion éolienne est présenté sur la Figure (I.19). Les masses correspondent à une grande masse du rotor de la turbine éolienne (90% du moment d'inertie global), masse pour le multiplicateur (2 à 4%), et une masse (6 à 8%) pour le générateur respectivement. En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres, ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [21].

➤ **Hypothèses simplificatrices**

- La voiture de la turbine comprend trois pales de longueur R_T chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'inertie J_T .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.

Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant :

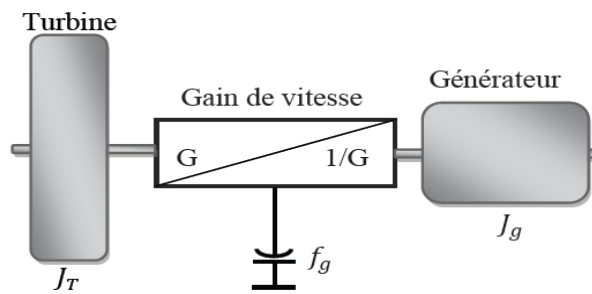


Figure I.20 : Modèle simplifié de la turbine.

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (\text{I.16})$$

C_T et C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T et J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T et f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g \quad (\text{I.17})$$

Ainsi, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloc est donné sur la figure ci-dessous.

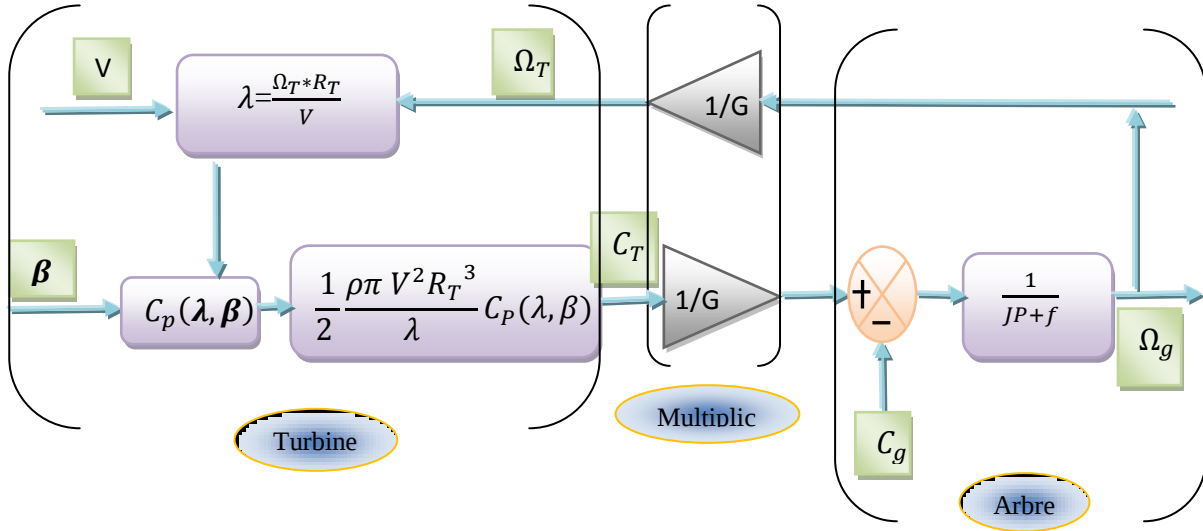


Figure I.21 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.5.2 Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, voir la (figure I.18). Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

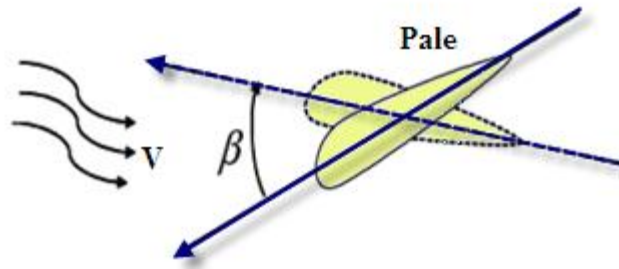


Figure I.22 : Orientation des pales.

La boucle de régulation de la vitesse de variation de l'angle de calage a été approchée par une fonction de transfert de 1er ordre avec une constante de temps $T\beta$ [22]. Lors de la modélisation du système de commande du pas des pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subits par les pales, la vitesse de variation de l'angle de calage doit être limitée à environ 10% lors d'un fonctionnement normal et à 20% pour les cas d'urgence [26].

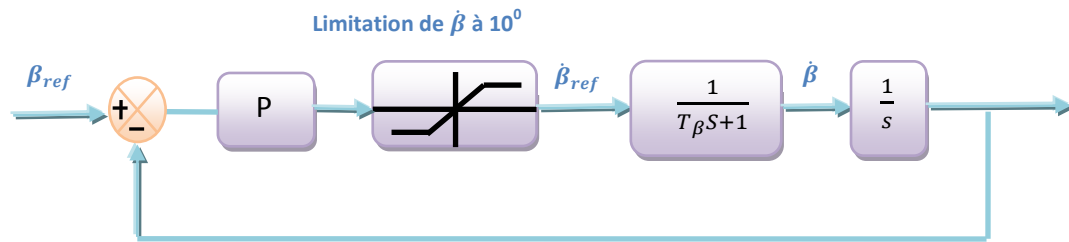


Figure I.23 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.

I.5.3 Stratégies de commande de la turbine

Une turbine éolienne est un dispositif qui capture une partie de l'énergie du vent et la convertir en un travail utile. En particulier, un système de conversion d'énergie éolienne relié à un réseau d'énergie électrique doit être conçu pour réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie [22].

I.5.3.1 Objectifs de la commande

La minimisation du coût d'énergie implique une série d'objectifs étroitement liés et parfois en conflit. Par conséquent, ils ne devraient pas être poursuivis séparément. La question est de trouver un compromis bien équilibré entre eux [22]. Ces objectifs peuvent être arrangés de la manière suivante :

- **Capture de l'énergie** : Maximisation de la capture d'énergie en tenant compte des restrictions d'exploitation sûre telles que la puissance nominale et la vitesse nominale.
- **Charges mécaniques** : protection du système éolien des charges mécaniques excessives.
- **Qualité de l'énergie** : production de l'énergie conformément aux normes d'interconnexion..

I.5.3.2 Caractéristique de puissance

Les objectifs que nous venons de les cité permet de tracer la caractéristique que la turbine doit suivre pour répondre aux exigences de la commande. Cette caractéristique est représentée sur la figure ci-dessous.

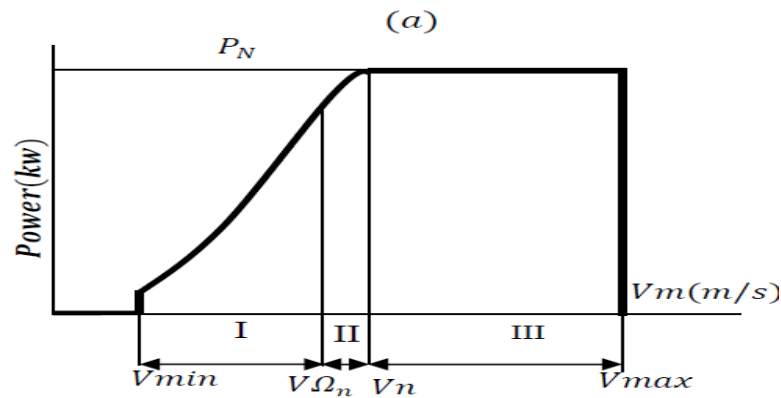


Figure I.24 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne.

Il y a trois zones de fonctionnement pour une éolienne :

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 des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (MPPT, Maximum Power Point Tracking).

Zone II : 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).

Zone III : Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 1 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer [10].

I.5.3.3 Commande dans la zone I

Dans cette zone(I), on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$. Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p_{max}}$. La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT [17].

➤ Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée [17]. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_T , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur $\frac{dP}{d\Omega_T}$. Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche [21]. On le déduit à partir de l'équation :

$$\frac{dP}{d\Omega_T} = \frac{dP}{dt} \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right)^{-1}$$

La recherche du maximum de puissance peut se faire par action sur le couple (commande indirect de la vitesse) .

➤ Commande indirecte de vitesse

Ce mode de contrôle repose par action sur le couple (commande indirect de la vitesse) pour recherche du maximum de puissance.

La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan (Ω_T, C_{aer}) par l'ensemble des points E $(\Omega_{T-opt}, C_{aer-opt})$ correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans laquelle l'éolienne fonctionne.

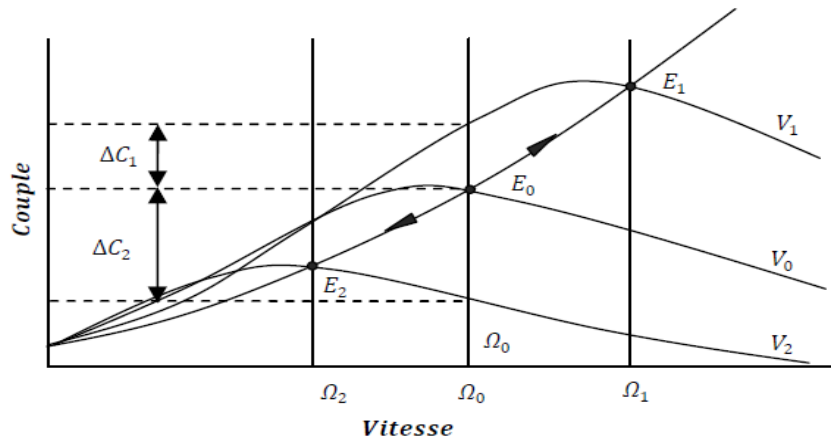


Figure I.25 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent [17].

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi V^2 R_T^3}{\lambda_{opt}} C_{Popt}(\lambda, \beta) \quad (I.18)$$

C_{Topt} : Le couple optimal.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Cette équation est écrite sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre

du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G .

$$C_{Topt} = \frac{1}{2G} \frac{\rho \pi V^2 R_T^3}{\lambda_{opt}} C_{Popt}(\lambda, \beta) \quad (I.19)$$

Si le couple électromagnétique est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal [21]. Cette commande est basée sur une estimation de la vitesse du vent. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit [17].

$$V = \frac{\Omega_T R_T}{\lambda_{opt}} \quad (I.20)$$

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^5 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \Omega_T^2 \quad (I.21)$$

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

$$C_{Topt} = K_{opt} \Omega_T^2 \quad (I.22)$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^5 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (I.23)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme.

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \Omega_g = 0 \quad (I.24)$$

En remplaçant par son expression, on trouve.

$$\frac{K_{opt}}{G} \Omega_T^2 - f \Omega_g - C_g = 0 \quad (I.25)$$

$$\text{D'où : } C_{gopt} = \frac{K_{opt}}{G^3} \Omega_T^2 - f \Omega_g \quad (I.26)$$

Avec : $\Omega_g = G \Omega_T$ Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimal de l'éolienne. Le schéma block de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous.

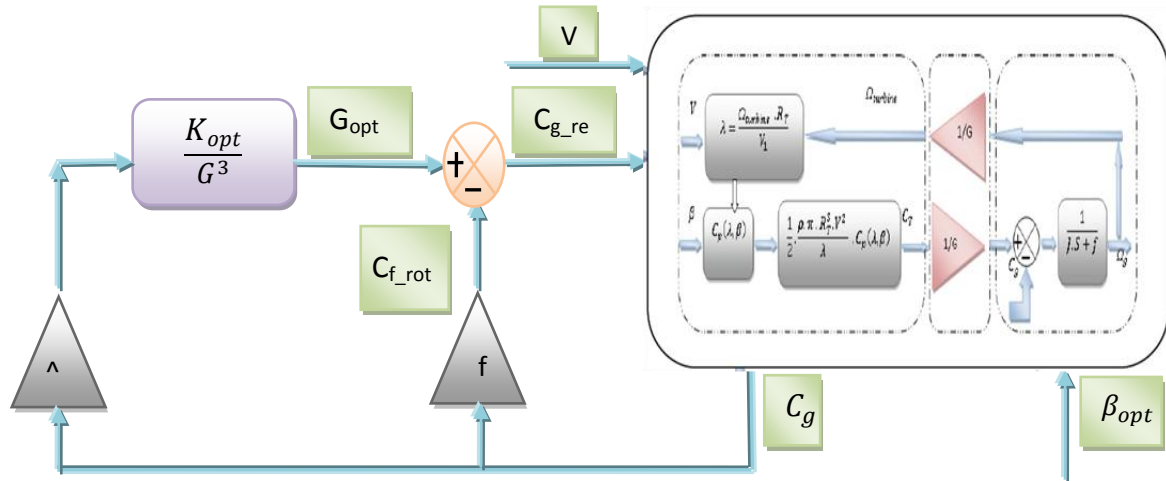


Figure I.26 : Commande indirect de vitesse (Zone I).

I.5.3.4 Commande dans la zone III

Pour des vitesses de vent importantes (en général $> 12\text{m/s}$), on bascule à la zone III qui correspond à la pleine charge de l'éolienne. Cette zone est la plus stricte en matière de régulation, le but est de limiter et de maintenir la production de puissance active à sa valeur nominale P_{nom} afin de préserver l'ensemble des éléments de la chaîne éolienne dimensionnés autour de cette puissance.

Une action sur l'angle de calage des pales permet de dégrader le coefficient de puissance (Figure I.18) donc de limiter la puissance convertie. Pour simplifier la structure de commande, la fonction de transfert entre β_{ref} et P (puissance électrique produite) a été approchée par un système du 1^{er} ordre. Cette approche conduit à contrôler la puissance électrique P par un régulateur PI en boucle fermée comme montrer sur la figure suivante [22] :

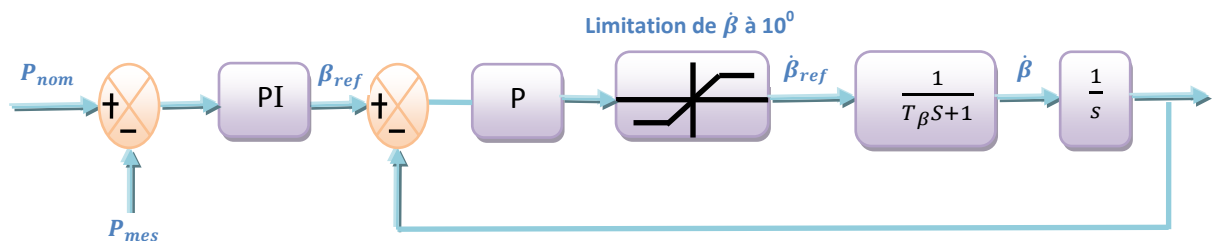


Figure I.27 : Schémas bloc de la commande de l'angle de calage des pales.

Certains auteurs ajoutent un limiteur à la sortie de la boucle de régulation de β pour saturer l'angle de calage à une valeur maximale β_{max} .

I.5.4 Source primaire : le vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air

caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses [14].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent en un point peut être décomposée en deux composantes : une composante moyenne variant lentement et des fluctuations [21].

L'expression de la vitesse du vent devient donc :

$$V_0(t) = V + V(t)$$

Avec : V : La valeur moyenne (composante lente)

$V(t)$: Les fluctuations (turbulences).

➤ Une composante moyenne à variation lente (V), qui représente le niveau de vitesse du Vent.

$V=6$ m/s Pour un vent faible vitesse.

$V =12$ m/s Pour un vent moyen vitesse.

$V=18$ m/s Pour un vent fort vitesse.

➤ Des fluctuations ou turbulences ($V(t)$), décrites par l'écart type suivant :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} v(t)^2 dt} \quad (I.27)$$

Dans la suite de la modélisation, le profil du vent appliqué possède une vitesse faible de 8 m/s représenté par la figure suivante :

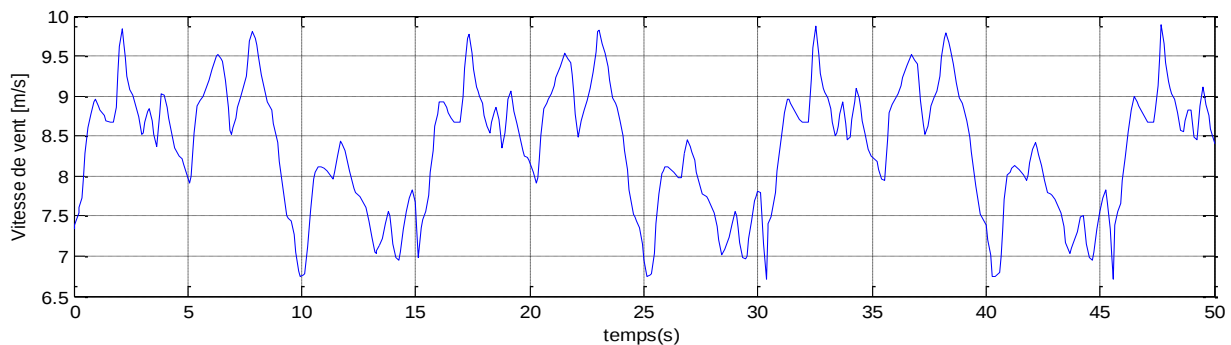


Figure I.28 : Profil du vent appliqué à la turbine.

I.6 Résultats de simulation

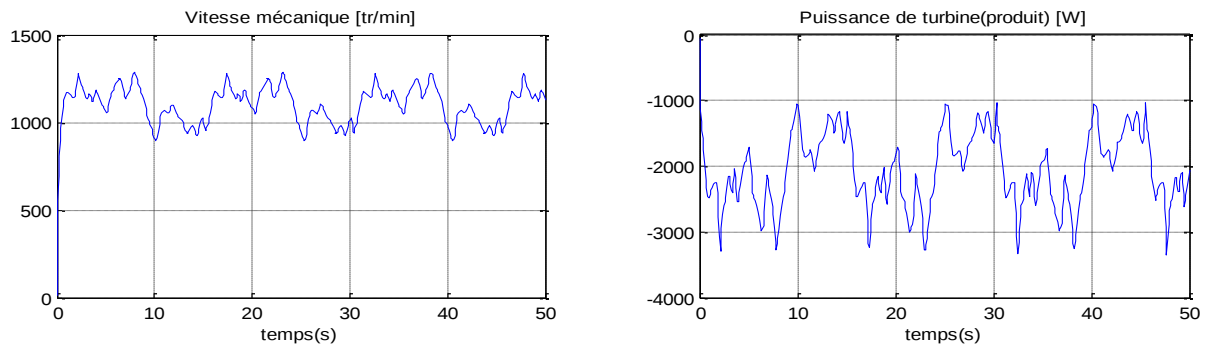


Figure I.29 : la vitesse mécanique et la puissance produit.

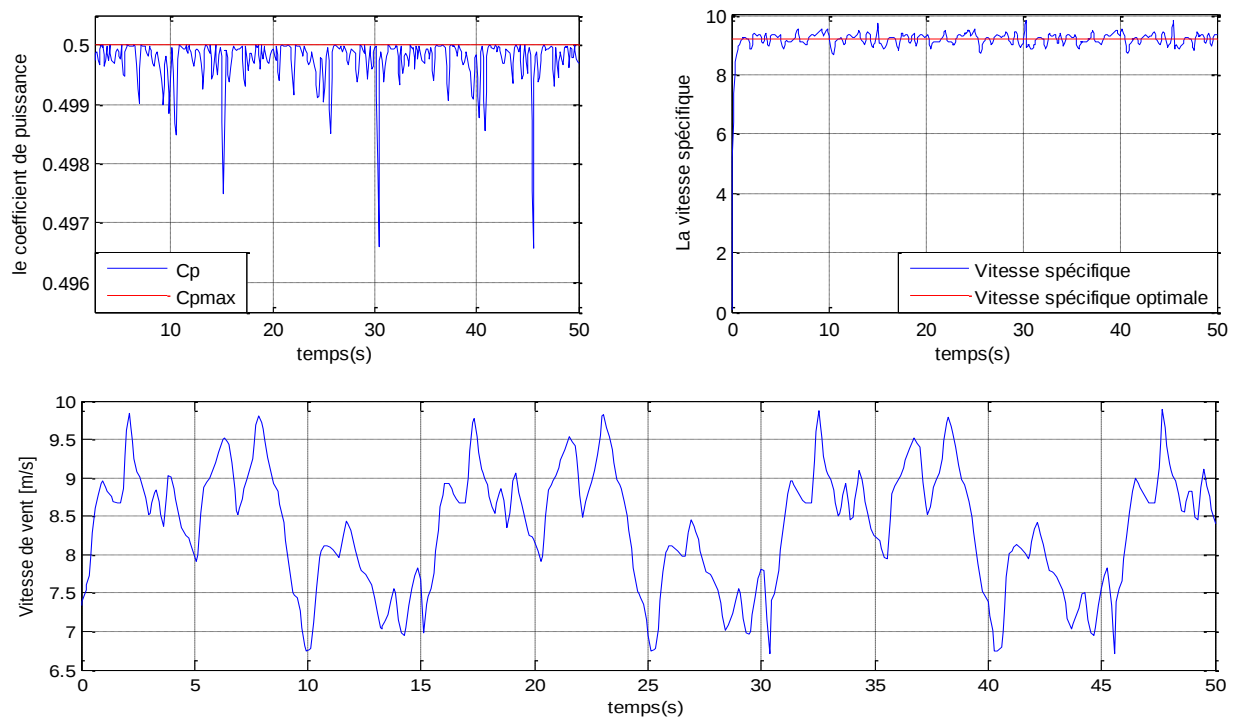


Figure I.30 : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique et la vitesse du vent.

I.7 Interprétations des résultats

A travers l'évolution du coefficient de puissance Figures (I.30), nous pouvons remarquer que celui ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$) qui nous donne un λ optimale. On remarque que le C_p atteint une valeur maximale de 0.5, Cette résultats de simulation montrent que la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent.

La figure (I.28) présente le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faibles est autour de (8m/s). Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à

la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'essentiel sur l'énergie éolienne à savoir les principales théories qui régissent l'interaction entre le vent et la turbine éolienne, ensuite différentes structures qui composent les chaînes de conversion éolienne existantes.

La modélisation de la partie mécanique nous a permis d'implanter des philosophies de réglage des éoliennes à vitesse variable, après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement, nous avons, détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique gainerie. Pour ce faire, nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées. Cet algorithme ont été valides par des résultats de simulation, ainsi que les différentes machines utilisées pour la conversion électromécanique. Ainsi notre choix se portera sur l'utilisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, ce sera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre

II

**Etude et modélisation de
MADA**

II.1 Introduction

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un grand intérêt surtout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients. Le chapitre sera clôturé par une modélisation et une simulation de la MADA.

II.2 Structure de la MADA

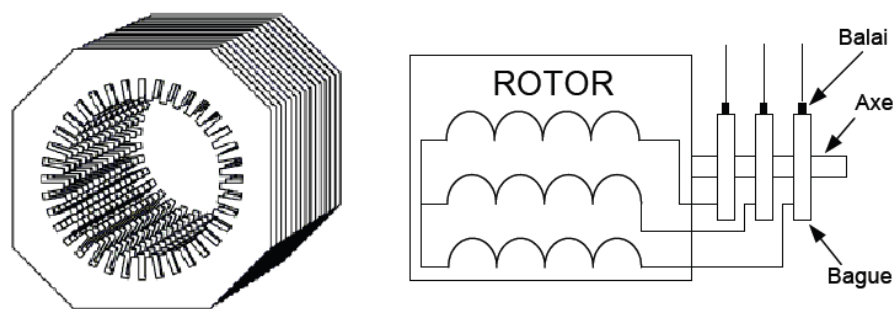


Figure II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure II.11) [13].

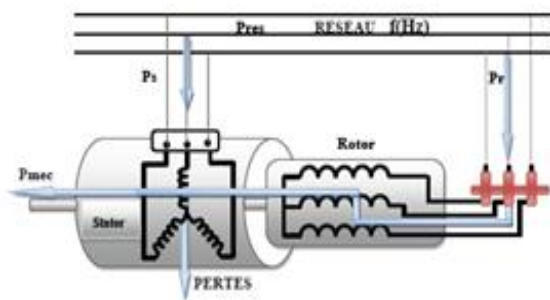
II.3 Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

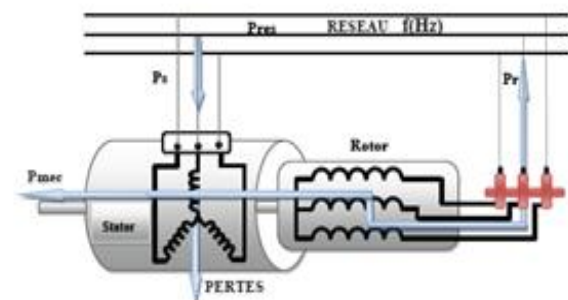
Le fonctionnement de la MADA est basée sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la

recupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

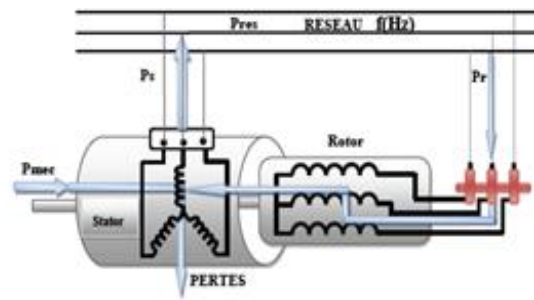
Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci dessous (figure II.2) [12].



Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

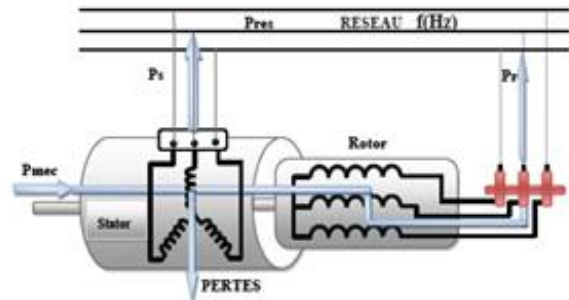


Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.



Fonctionnement en mode génératrice hypo.

Synchrone



Fonctionnement en mode génératrice hyper

synchrone

Figure II.2 : Les différents modes de fonctionnement de la MADA.

II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu.

II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hyposynchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hyposynchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor.

II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à g , P_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor.

II.4 Présentation de quelques études faites dans le domaine de la MADA

On trouve dans un recensement de certains articles parus sur la MADA, classés suivant leur architecture. Dans chacune de ces classes, les auteurs rappellent les équations fondamentales et les principales applications [15]. On y distingue les classes suivantes :

II.4.1 MADA à rotor bobiné

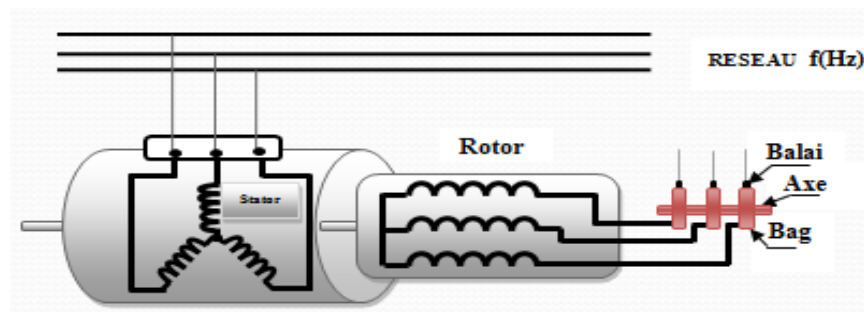


Figure II.3 : MADA à rotor bobiné.

Les enroulements statoriques sont connectés au réseau, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur.

II.4.2 MADA en cascade (Cascade Doubly Fed induction Machine)

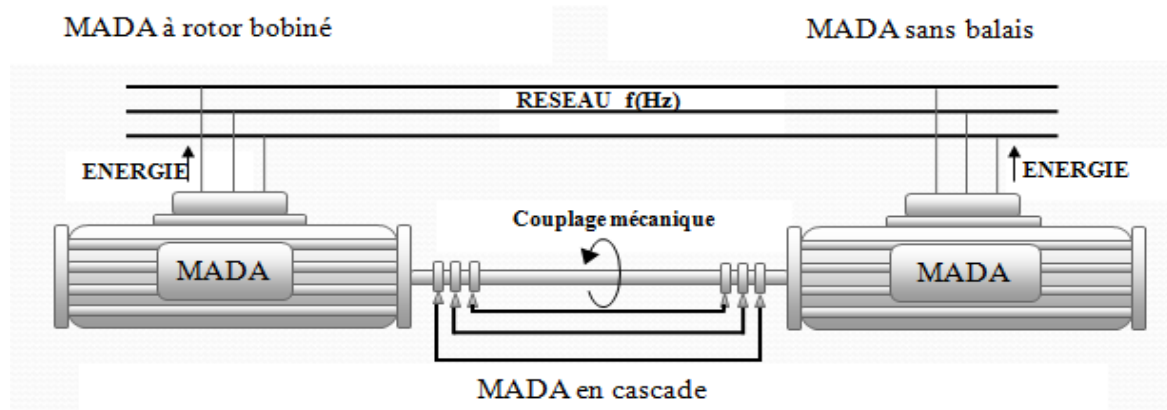


Figure II.4 : MADA en cascade.

La MADA en cascade est constituée de deux MADAS ayant leurs enroulements statoriques connectés au réseau et leurs enroulements rotoriques connectés entre eux. De plus, les deux machines sont couplées mécaniquement.

II.4.3 MADA sans balais (Brushless Doubly Fed induction Machine)

C'est une machine très proche de la précédente, sauf que cette fois-ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

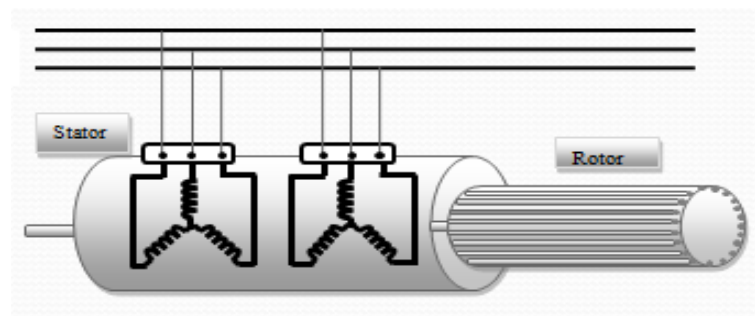


Figure II.5 : MADA sans balais.

II.5 Quelques configurations de la MADA à rotor bobiné

La large plage de variation de la vitesse qu'offre cette machine lui a assurée une place de choix dans différentes applications que ce soit en moteur (laminage, traction ferroviaire, propulsion maritime...) ou en génératrice (éolienne, centrales hydrauliques...).

Les configurations les plus utilisées pour ces deux applications sont les suivantes :

II.5.1 Configuration pour application moteur

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statoriques par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur. Généralement, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % [8], en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques [13].

II.5.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur

C'est la configuration la plus simple qui vient à l'esprit c'est-à-dire connecter les enroulements statoriques directement au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est alimenté à travers un redresseur à diodes et un onduleur dimensionnés à 30% de la puissance maximale ce qui permet de réduire considérablement le coût de l'installation[13].

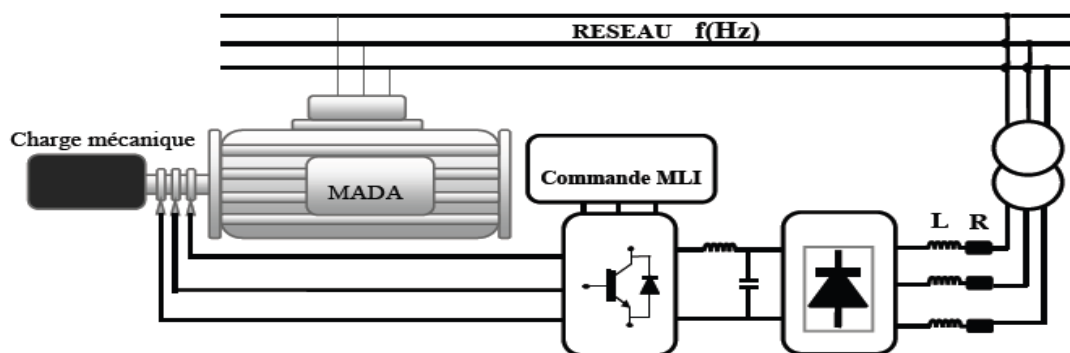


Figure II.6 : Schéma de la MADA en moteur avec rotor alimenté par un onduleur.

II.5.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau.

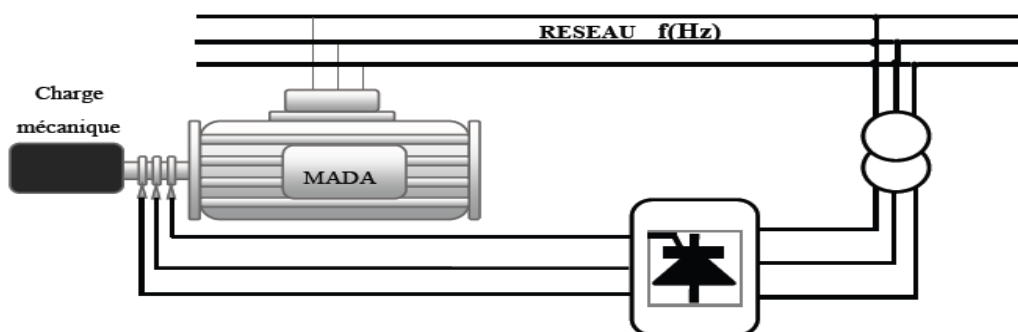


Figure II.7 : Schéma de la MADA en moteur avec rotor alimenté par un cycloconvertisseur.

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif.

Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [21].

II.5.1.3 Alimentation par deux convertisseurs indépendants

Une autre configuration possible, c'est d'alimenter les deux cotés de la MADA (stator et rotor) par des onduleurs ayant soit des redresseurs indépendants, soit un seul redresseur en commun [13]. Cette structure procure de très bonnes performances et un contrôle plus souple.

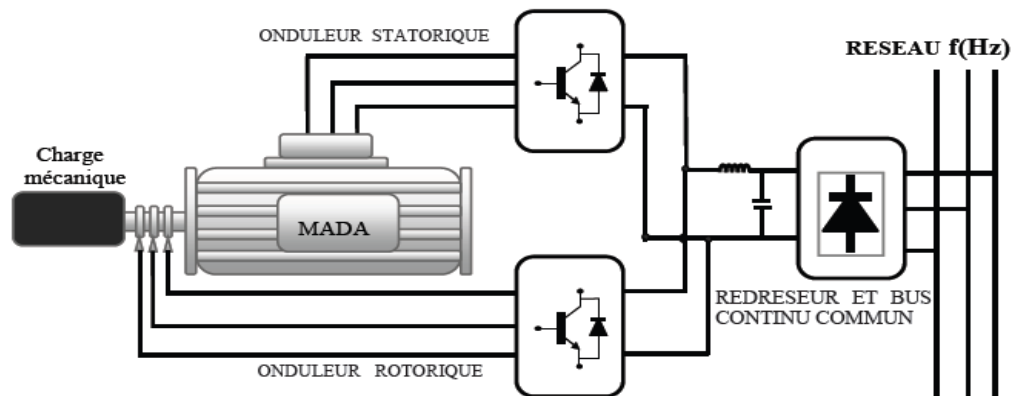


Figure II.8 : Schéma de la MADA alimentée par deux onduleurs.

II.5.2 Configuration pour application génératrice

C'est l'application par excellence de la MADA, qui est retrouvée principalement dans les systèmes de production éoliens. Généralement son stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté de différentes façons :

II.5.2.1 MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure II.9), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [14].

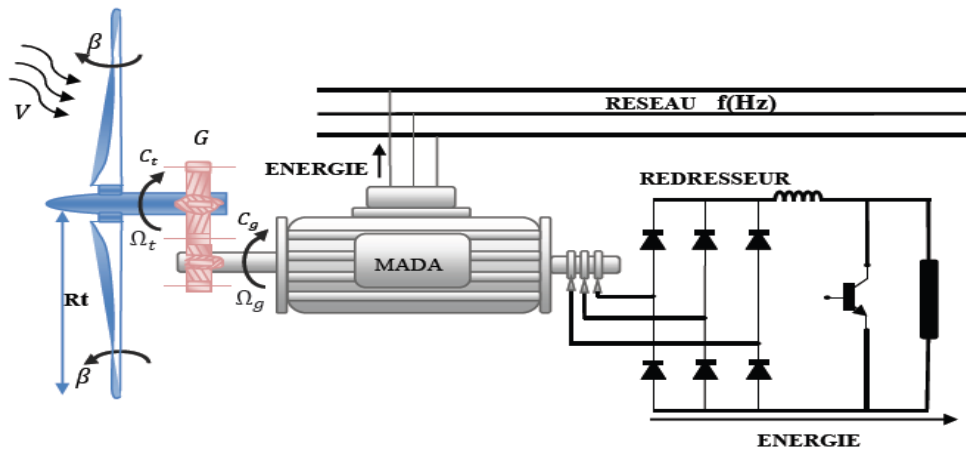


Figure II.9 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

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

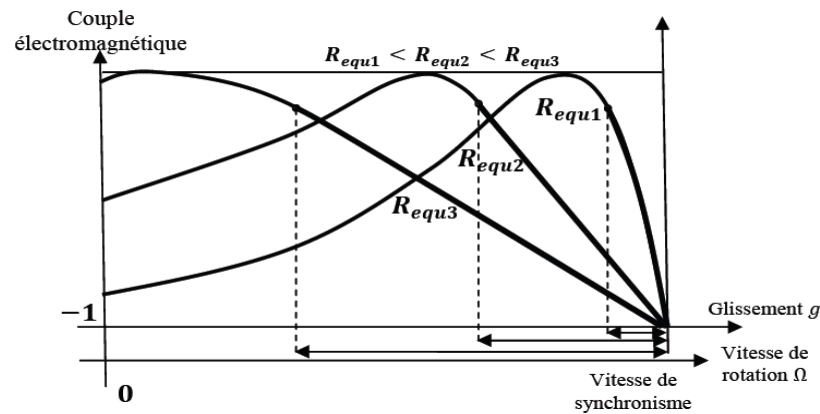


Figure II.10 : Effet de la variation de la résistance R sur la caractéristique [13].

II.5.2.2 MADA «structure de Kramer »

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, figure II.11).

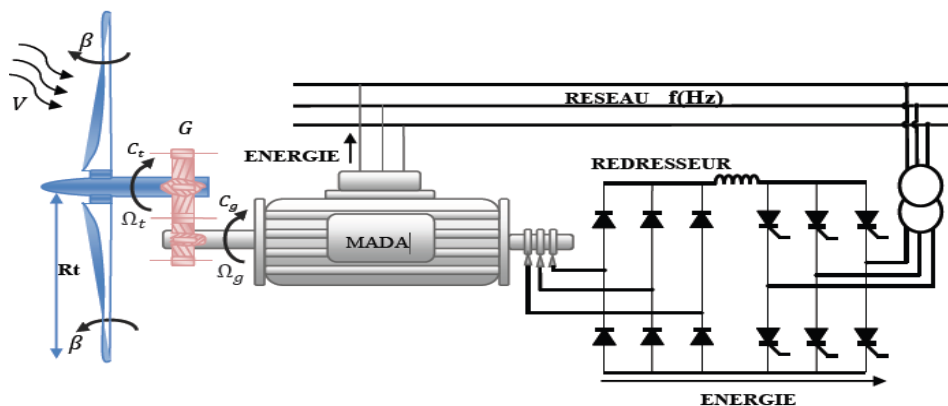


Figure II.11 : MADA, structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [14].

II.5.2.3 MADA «structure de Scherbius avec cycloconvertisseur »

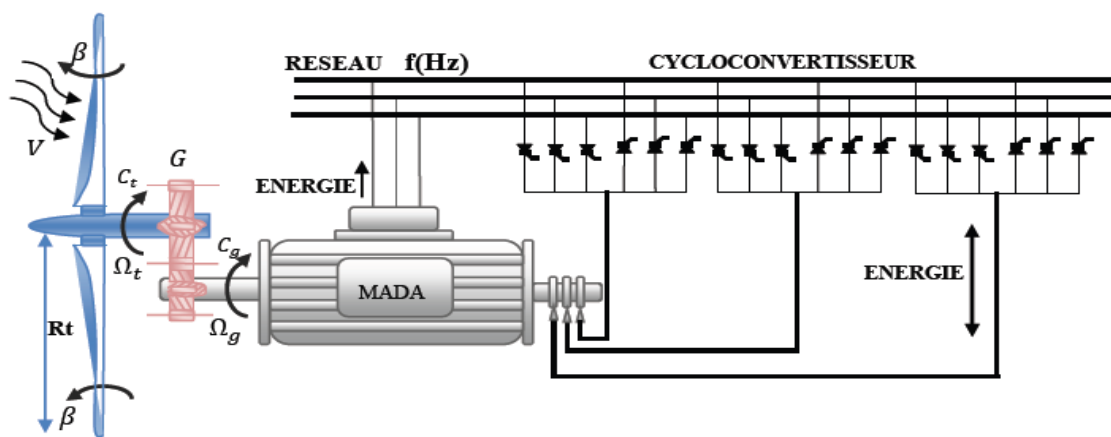


Figure II.12 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Dans cette configuration, l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Cela permet de doubler la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de Kramer. En effet, la variation du glissement inférieure à 30% peut être dans ce (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

L'inconvénient noté est la génération de perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif [7].

II.5.2.4 MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI »

Une autre structure intéressante figure (II.13) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [7]. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [12].

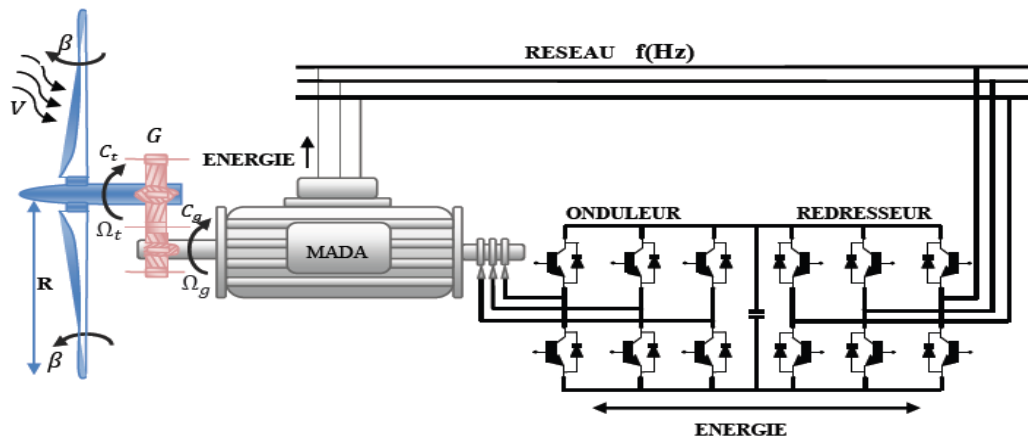


Figure II.13 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette structure est alors particulièrement adaptée pour la génération d'électricité dans les systèmes éoliens et qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et d'applications.

II.5.3 Les avantages et les inconvénients

Le fait que l'énergie éolienne soit attrayante et de plus en plus utilisée comme alternative revient sans aucun doute au fait qu'elle ait des avantages. Cependant, elle en possède aussi des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

II.5.3.1 Les avantages

- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - ✓ Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - ✓ Régulation découplée des puissances active et réactive.

II.5.3.2 Les inconvénients

- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.6 Application des machines asynchrones à double alimentation

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

II.6.1 Application moteur

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine [16]. en générale La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [3].

II.6.2 Application génératrice

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [16].

II.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maitrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes [9].

Dans ce parte sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machin asynchrone à double alimentation dans le référentiel lié au champ tournant. Ce dernier nous a permet d'obtenir un modèle mathématique adapté de MADA.

II.7.1 Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs Elémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition Sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.7.2 Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel générale

Description

La machine « GADA » asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (As,Bs,Cs) Décalées entres elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator,(Ar, Br , Cr) .

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

$$[V_{sabc}] = [-R_{sabc}] [I_{sabc}] + d/dt [\Phi_{sabc}] \quad (I.2)$$

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [I_{rabc}] + d/dt [\Phi_{rabc}] \quad (I.3)$$

$[\Phi_{abc(S)}] = [\Phi_{as} \Phi_{bs} \Phi_{cs}]$ vecteur flux total statorique.

$[V_{abc(S)}] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]$ vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$[I_{abc(S)}] = [I_{as} I_{bs} I_{cs}]$ vecteur courant traversant les enroulements statorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{Matrice résistance statorique.}$$

Par un un changement d'indice les vecteur rotorique comme suit :

$$[\Phi_{abc(r)}], [V_{abc(r)}], [I_{abc(r)}], [R_r].$$

➤ Équations magnétiques

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a,b,c :

$$[\Phi_{sabc}] = [-L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (I.4)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [-M_{sr}][I_{sabc}] \quad (I.5)$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

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

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

$[M_{sr}]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{Max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t \quad \text{et } M_{sr} : \text{ est l'inductance mutuelle stator-rotor.}$$

M_{Max} : est Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.7.3 La transformée de Park

La transformation de Park appelée souvent transformation à deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- ✓ d'axe direct.
- ✓ d'axe en quadrature.
- ✓ Homopolaire.

u : Indice de la composante directe.

v : Indice de la composante en quadrature.

o : Indice de la composante homopolaire.

La transformation du modèle d'un enroulement triphasé en un modèle d'un enroulement Biphassée, en prenant en compte la conservation des puissances est permis par la matrice de Park donnée ci après :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Le facteur $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$: est là pour conserver la puissance électrique instantanée.

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

θ_{OBS} est l'angle de rotation du repère (u, v) .

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} \quad (I.12)$$

En appliquant, la transformation de Park $[P]$ sur les équations:(I.2),(I.3),(I.4),(I.5) et Après simplification, les équations électriques et magnétiques modélisant la machine dans le repère biphassé (u, v) , sont déduites voir figure(I.14).

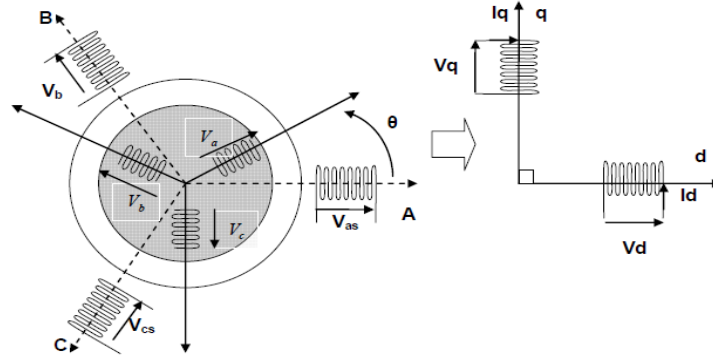


Figure II.14 : Modèle de PARK de la MADA.

II.7.4 Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)

La théorie de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de **Park** qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé a des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct d et axe quadrature q.

II.7.4.1 Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante :

$$\text{On a : } \theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta$$

$$\text{Alors : } \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt}.$$

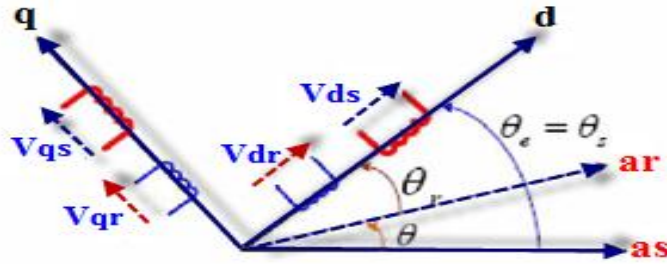


Figure II.15 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - W_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + W_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - W_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + W_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Avec respectivement : V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

W_r et W_s sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

φ_{sq} , φ_{sd} , φ_{rq} et φ_{rd} : sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé leurs expressions sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (I.14)$$

En introduisant le système d'équations des flux magnétiques dans celui d'équations électriques, et en réarrangeant tout, on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} + W_s L_s I_{sq} - W_s M I_{rq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} - W_s L_s I_{sd} + W_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - M \frac{dI_{sd}}{dt} - W_r L_r I_{rq} + W_r M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} - M \frac{dI_{sq}}{dt} + W_r L_r I_{sd} - W_r M I_{sd} \end{cases} \quad (I.15)$$

➤ **L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit**

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.16)$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

f : le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

J : l'inertie des parties tournantes.

Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

➤ **L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes**

$$\begin{cases} C_{em} = -p(I_{sq}\varphi_{sd} - I_{sd}\varphi_{sq}) \\ C_{em} = -p \frac{M}{L_r}(I_{sq}\varphi_{rd} - I_{sd}\varphi_{rq}) \\ C_{em} = p \frac{M}{L_s}(I_{rq}\varphi_{sd} - I_{rd}\varphi_{sq}) \end{cases} \quad (I.17)$$

➤ Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd}I_{sd} - V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq}I_{sd} + V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (I.18)$$

II.7.4.2 Mise sous forme d'équation d'état

A partir des équations (I.15) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$[U] = [A][I] + [L] \frac{d}{dt}[I] .$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & W_s L_s & 0 & -W_s M \\ -W_s L_s & -R_s & M W_s & 0 \\ 0 & M W_r & R_r & -W_r L_r \\ -M W_r & 0 & W_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \\ \dot{I}_{rd} \\ \dot{I}_{rq} \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

En considérant les composantes en (d, q) l'équation d'état prend la forme :

$$\frac{d}{dt}[I] = -[L]^{-1}[A'] [I] + [L]^{-1}[U].$$

Notre but est de représenter les équations établis ci-dessus sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (I.20)$$

Avec :

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\alpha & W_s & \alpha.M & 0 \\ -W_s & -\alpha & 0 & \alpha.M \\ \alpha.\beta & -\beta(W_s - W_r) & -\delta & W_r \\ \beta(W_s - W_r) & \alpha.\beta & -W_r & -\delta \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\beta & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & \gamma \end{bmatrix}$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma$ sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{T_s}, \quad \beta = \frac{M}{\sigma.L_s.L_r}, \quad \gamma = \frac{1}{\sigma.L_r}, \quad \delta = \frac{M^2.R_s}{\sigma.L_r.L_s^2} + \frac{R_r}{\sigma.L_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s.L_r}$$

Pour faciliter la simulation, nous avons écrit la matrice $[A]$ comme suit :

$$[A] = [A_1] + W_s.[A_2] + W_r.[A_3] \quad (I.21)$$

Tellque :

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

II.8 Résultats de simulation numérique du système

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

II.8.1 Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA)

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnement moteur à rotor en court circuit et présentée sur les figure (II.16), (II.17), (II.18), (II.19) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques et sont résultante, les composante du courant statoriques et rotoriques.

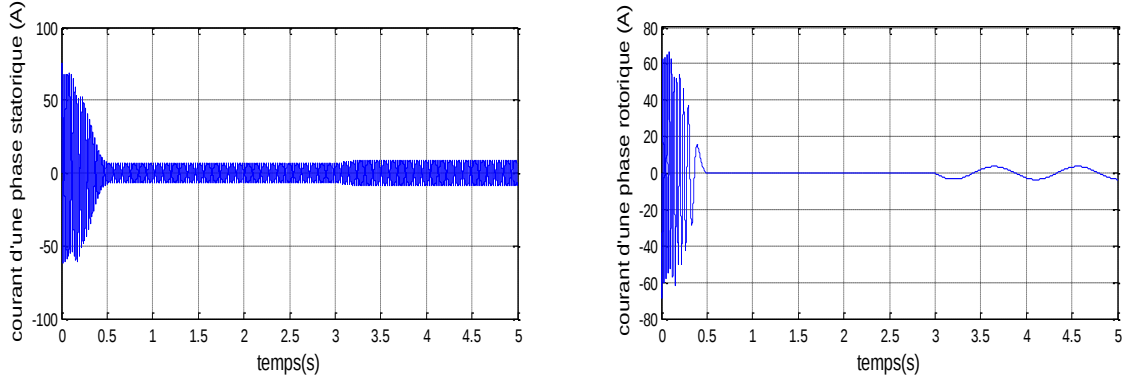


Figure II.16 : Courant statorique et rotorique de phase (Isa et Ira)(A).

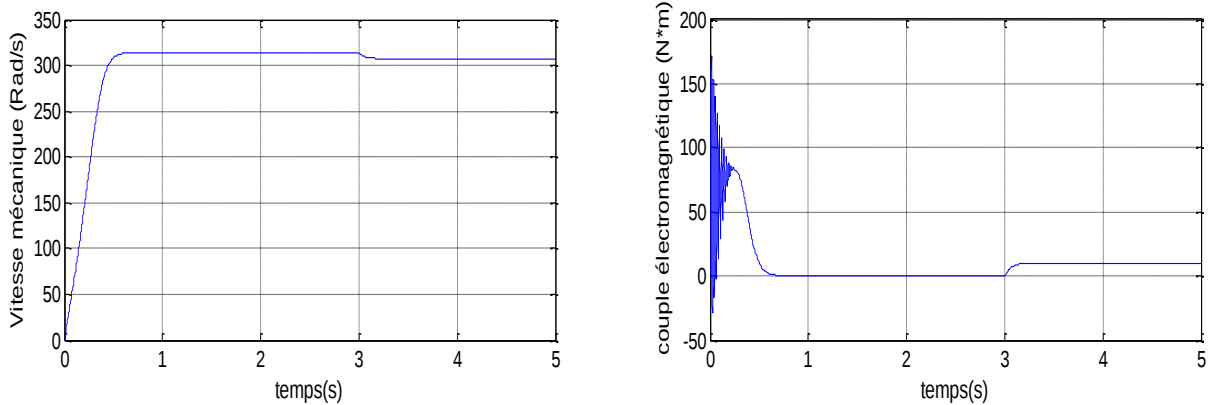


Figure II.17 : Vitesse mécanique et couple électromagnétique.

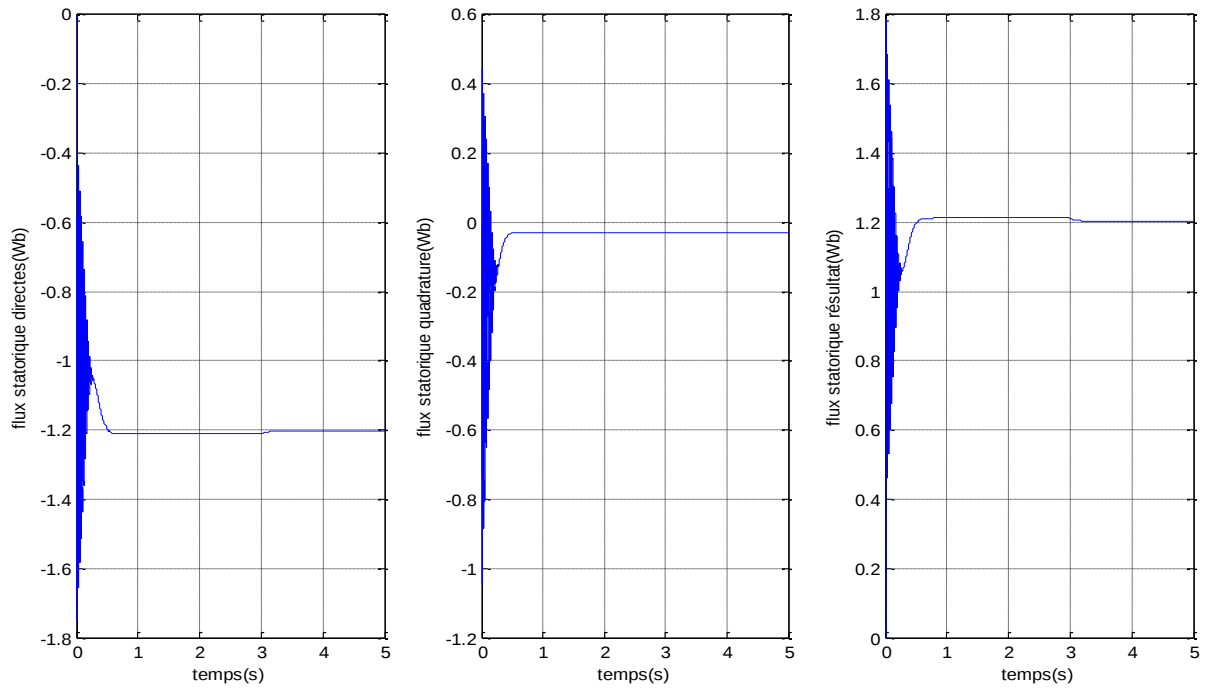


Figure II.18 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

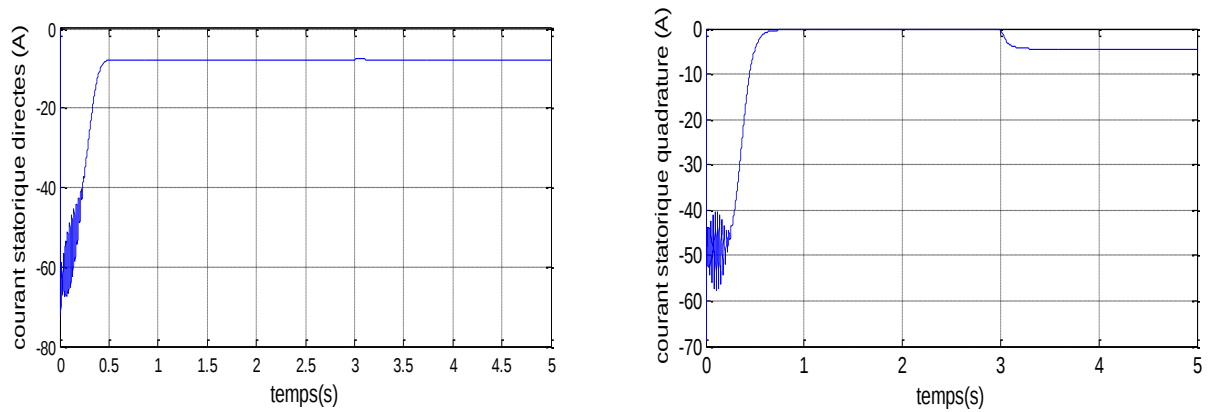


Figure II.19 : Les composantes du courant statoriques.

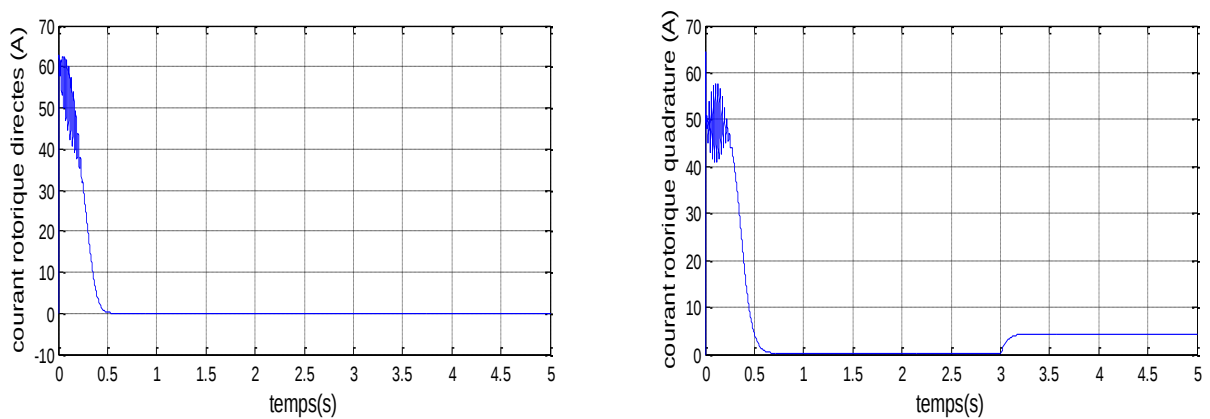


Figure II.20 : Les composantes du courant rotoriques.

II.8.2 Interprétation des résultats

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme (Figure II.17) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (Figure II.20) (un très faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure II.17) (présence de frottements visqueux).

L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques (Figure II.19) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques (vérification de la relation $f_r = g f_s$). La machine fonctionne alors en moteur hyposynchrone.

II.8.3 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaite, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $(220 \text{ V} \cdot \sqrt{2}; 100 \cdot \pi \text{ rad/s}; 50\text{Hz})$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $(12 \cdot \sqrt{2} \text{ V}; 4 \cdot \pi \text{ rad/s}; 2\text{Hz})$ et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.

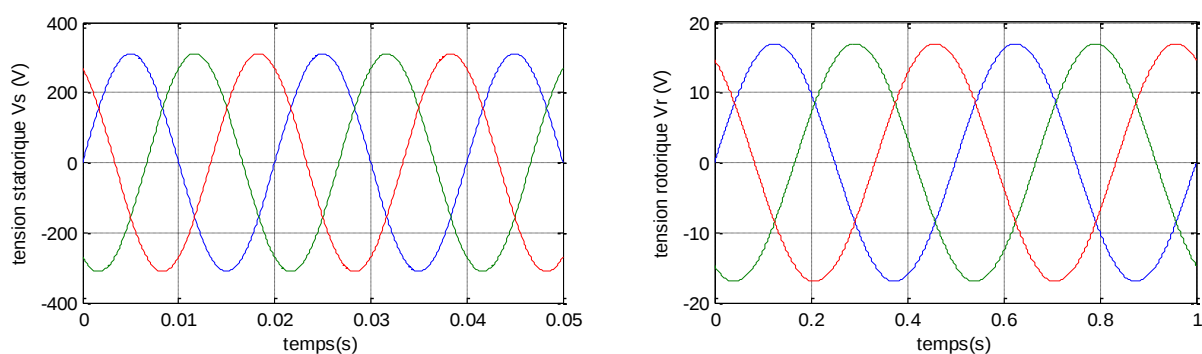


Figure II.21 : Les tensions triphasées appliquées au stator et celle appliquée au rotor de la MADA.

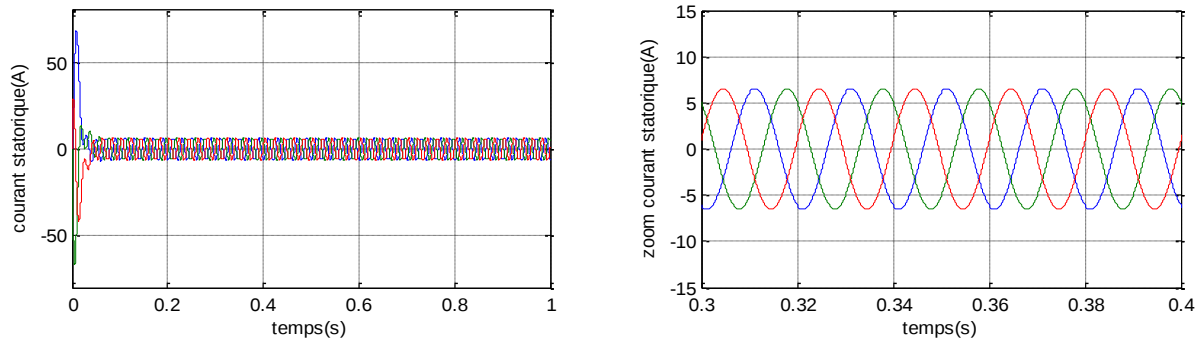


Figure II.22 : Les courants statoriques triphasées avec un zoom.

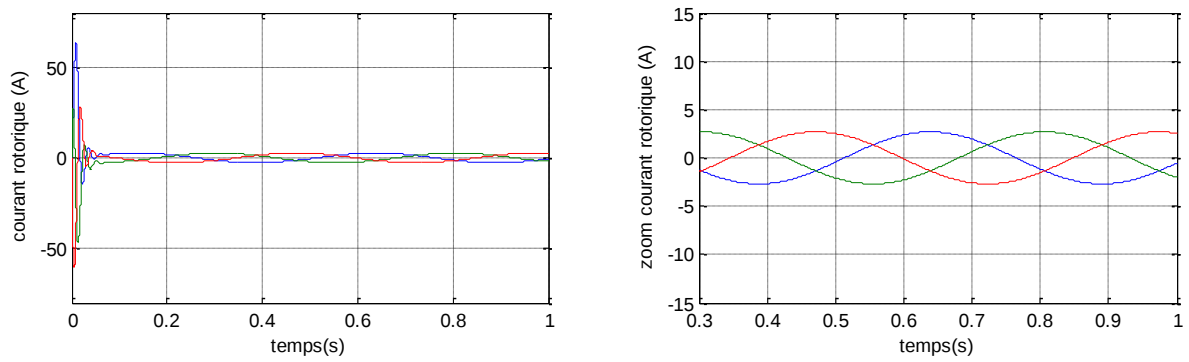


Figure II.23 : Les courants rotoriques triphasées avec un zoom.

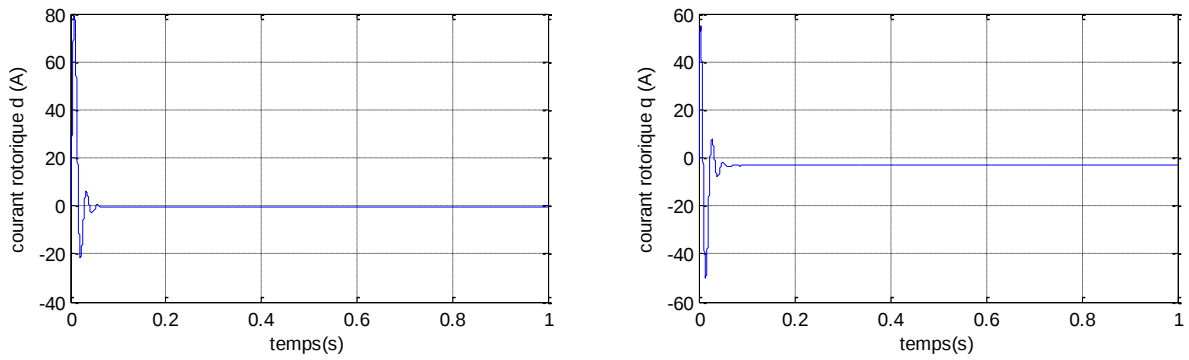


Figure II.24 : Courant rotorique GADA (d , q).

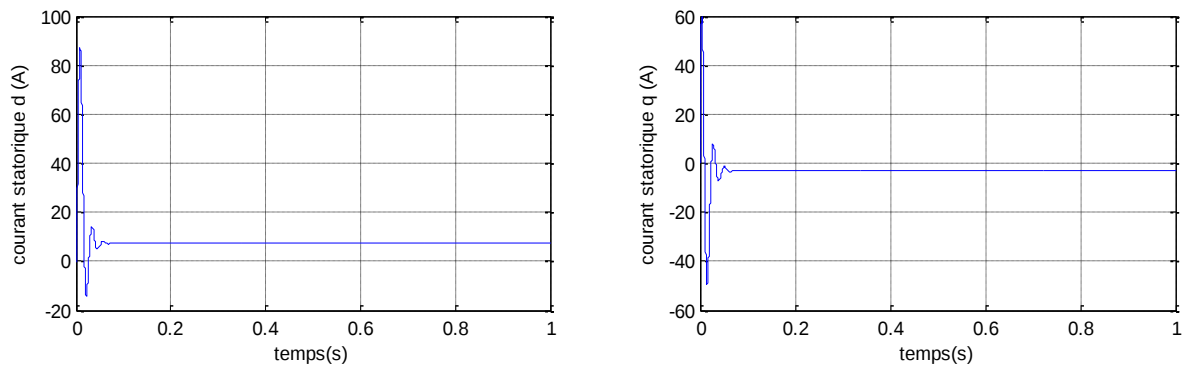


Figure II.25 : Courant statorique de GADA (d,q).

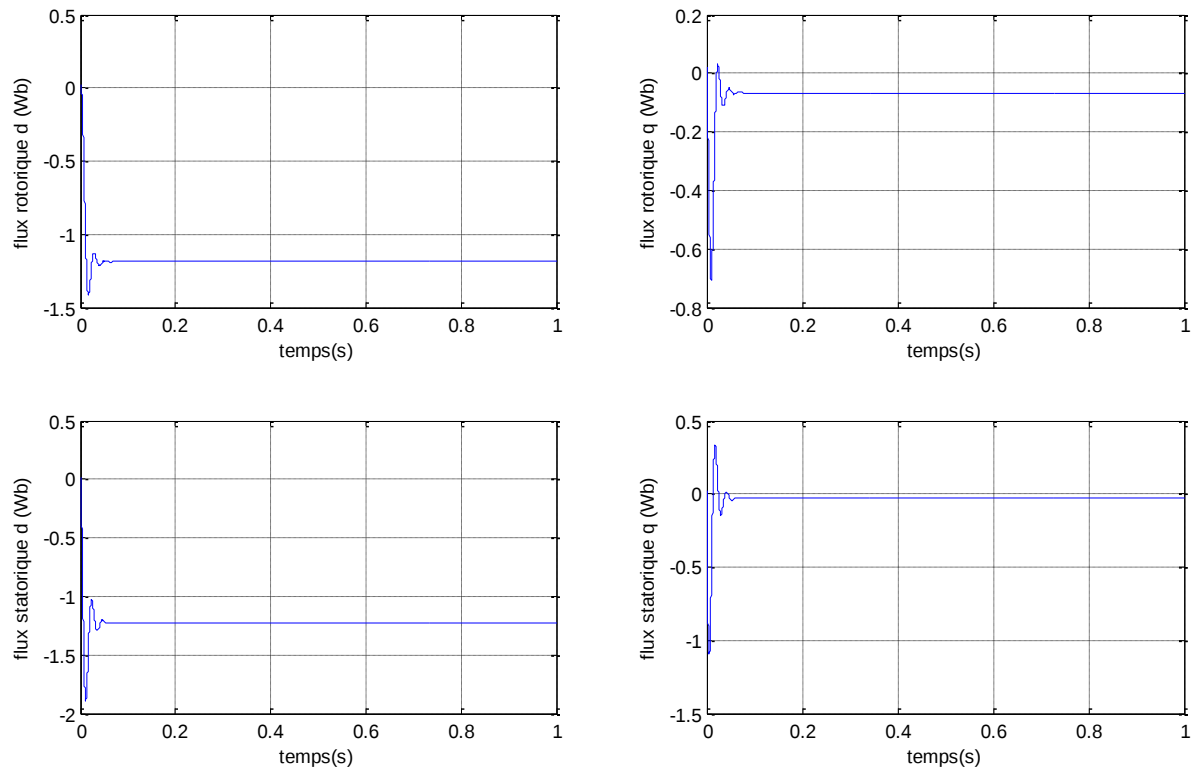
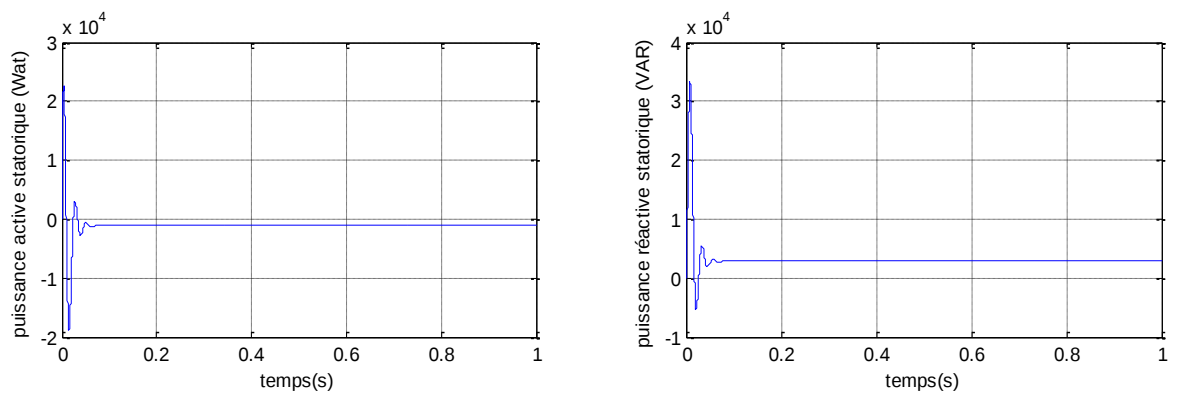
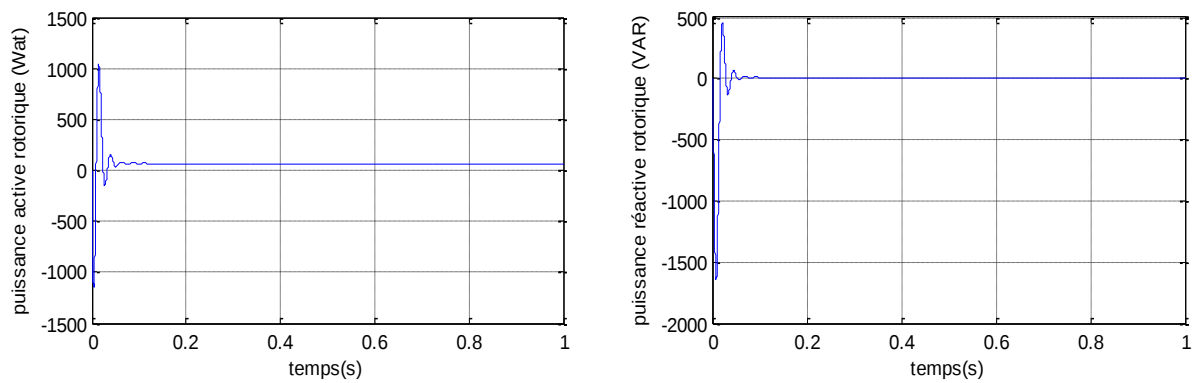


Figure II.26 : Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q).

Figure II.27 : Puissances statoriques (P_s , Q_s).Figure II.28 : Puissance rotorique (P_r , Q_r).

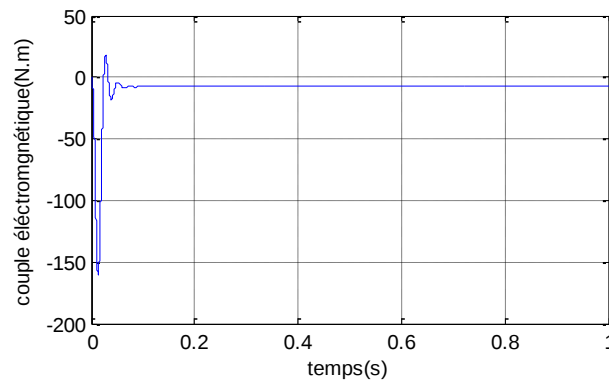


Figure II.29 : Couple électromagnétique.

II.8.4 Interprétations des résultats

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation obtenus montrant que pendant le régime dynamique. Pendant le démarrage on remarque l'importance du courant, après un temps très réduit égale à environs 0.05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdale de fréquence 50Hz pour les courants statorique et. $f_r = g f_s$. Pour les courants rotorique. Le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale (-158Nm).

II.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître la structure de la machine asynchrone à double alimentation et d'identifier les quatre modes de fonctionnement qu'elle offre au lieu de deux pour la machine asynchrone classique.

Nous avons pu exposer les principales configurations de cette machine rencontrées dans la bibliographie que ce soit en moteur ou en génératrice. en illustré les avantages et les inconvénients de la MADA et de conclure qu'elle convient aux applications de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne.

Le modèle de la GADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H.Park nous a permis de le simplifier. Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

Chapitre

III

**Commande vectorielle des
puissances actives et réactives**

III.1 Introduction

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie [17].

Dans cette optique, nous avons étudié une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [21].

III.2 Le principe de la commande vectorielle de la MADA

L'inconvénient majeur des machines à courant alternatif est le couplage qui existe entre le couple et le flux. L'objectif escompté est alors de ramener la commande de la MADA à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée et de réaliser le découplage entre la puissance active et réactive. C'est à cet effet qu'apparaît la commande vectorielle en offrant la possibilité de réguler le flux et le courant séparément (composante directe du courant pour le flux et composante en quadrature pour le couple).

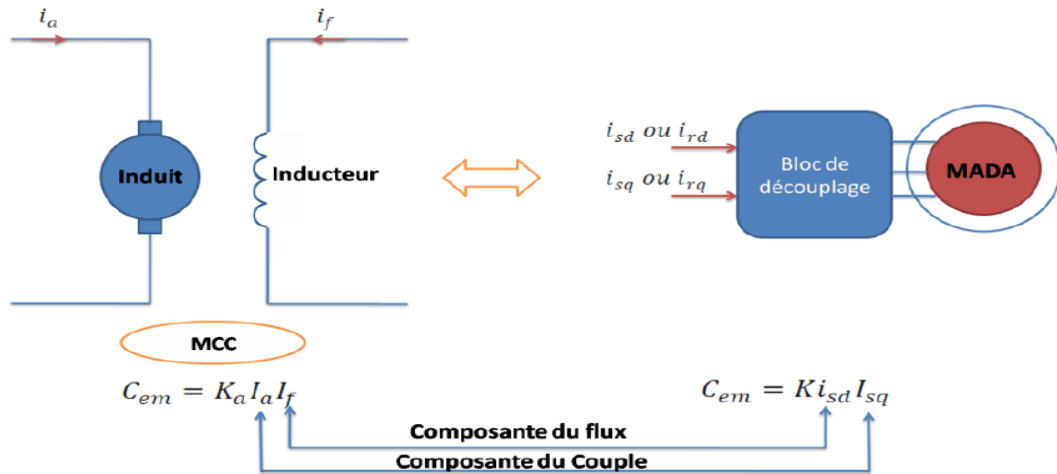


Figure III.1: Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

La méthode d'orientation du flux consiste à choisir un repère d'axes (d,q) dont l'axe d est aligné avec le flux qui peut être d'entrefer, rotorique ou statorique. Cette dernière orientation est de loin la plus utilisée dans la littérature [14] et c'est elle qui sera développée.

Notre travail est limité au cas où la machine débite sur une charge isolée et non pas un réseau supposé infini. D'où le contrôle des puissances active et réactive de la MADA se réduit à

la régulation de la valeur efficace et la fréquence de ses tensions statoriques.

L'approche consistera donc d'abord à établir un modèle de la machine mettant en évidence la possibilité d'agir sur les grandeurs rotoriques pour contrôler les tensions statoriques. Dans un second temps une technique de commande de ce modèle est exposée.

III.3 Etablissement du modèle de la GADA

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [18].

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique φ_s .

On rappelle d'abord le système équations différentielles décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

III.3.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

Avec un flux statorique constant et orienté, $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $\varphi_{sq} = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

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

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des

tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

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

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

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

III.3.2 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

Partir de l'équation de flux(III.4), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

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

III.3.3 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

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

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

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

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec : $V_{sq} = V_s = W_s Q_s \Rightarrow Q_s = \frac{V_s}{W_s}$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante.

$\frac{V_s^2}{W_s L_s}$ Prés imposée par le réseau.

III.3.4 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

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

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

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

Avec : $W_r = g W_s \Rightarrow$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \right) - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + g W_s \left(\left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

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

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

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

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P] I_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P] I_{rq} + g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec:

V_{rd} Et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: est le terme de couplage entre les deux axes. une synthèse adéquate des régulateur dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (III.8) et (III.13), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

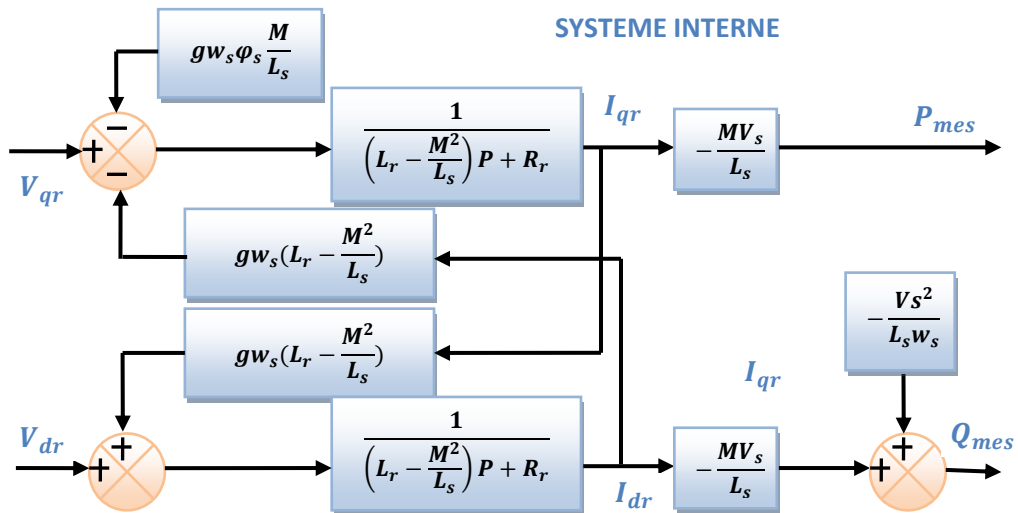


Figure III.2 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques [17]. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence du couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur.

Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. la consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [4].

III.3.5 Type des régulateurs utilisés

Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industriels. Les régulateurs de chaque axe a pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de référence et les puissances active et réactive mesurées [19].

La forme du correcteur est la suivante : $K_P + \frac{K_i}{P}$

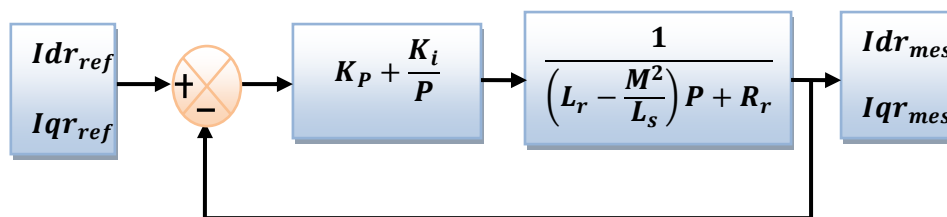
Avec : K_P : est le gain proportionnel du régulateur.

K_i : est le gain intégral du régulateur.

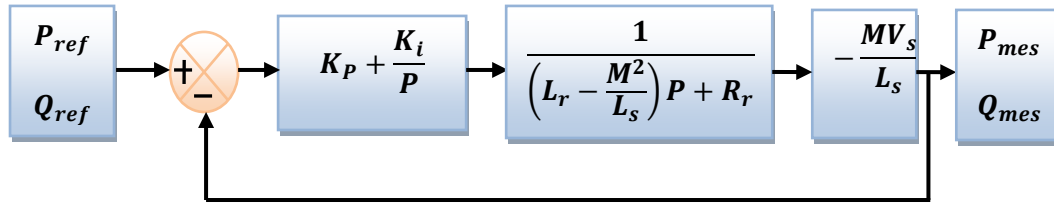
Si on considère la fonction du transfert suivante : $F(p) = \frac{K}{1+\tau p}$

Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité (figure (III.3)).

➤ Système régulé par un régulateur PI



a) Schéma de la régulation des courants rotoriques.



b) Schéma de la régulation des puissances statoriques.

Figure III.3 : Schéma de la régulation.

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

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

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

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

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit : $F_{BF}(p) = \left(\frac{1}{1 + \tau_r p} \right)$

$$\text{Et on a } F_{BF}(p) = \left(\frac{\frac{K_i K}{K_i K + p}}{1 + \frac{1}{K_i K} p} \right) \Rightarrow \tau_r = \frac{1}{K_i K}$$

Avec:

τ_r : le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

$$\text{Or } K_i = \frac{K_P}{\tau} \quad \text{Alors } \tau_r = \frac{\tau}{K_P K}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} K_P = \frac{\tau}{\tau_r K} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r K} \end{cases}$$

Le temps de réponse sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité.

III.4 Commande indirecte

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement.

III.4.1 Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme

retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [17].

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(III.8) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr_ref} = \frac{L_s}{V_s M} P_{s_ref} \\ I_{dr_ref} = \frac{L_s}{V_s M} \varphi_{s_ref} + \frac{V_s}{W_s M} \end{cases} \quad (III.14)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

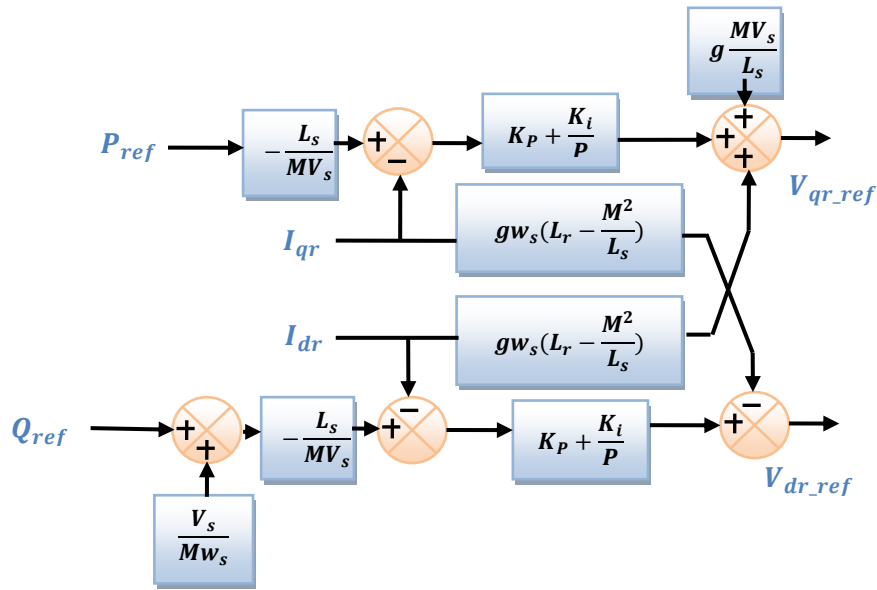


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

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

III.4.2 Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA[19]. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

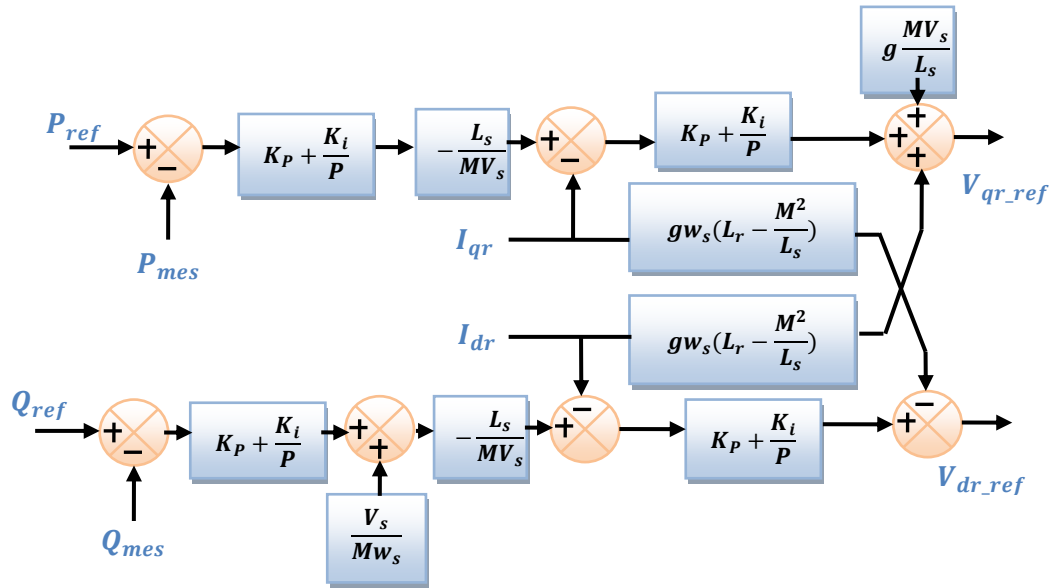


Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleur robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers [17].

III.4.3 Résultats de simulation

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000W$ entre $t=1s$ et $t=3s$, et une puissance réactive $Q=1000VAR$ entre $t=2s$ et $t=4s$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA et entraînée à une vitesse fixe : 1440tr/min.

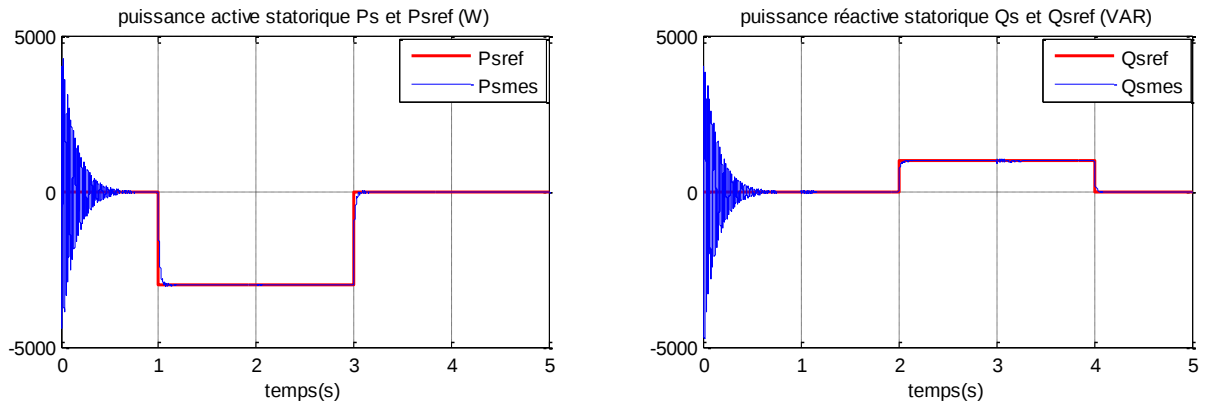


Figure III.6 : La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.

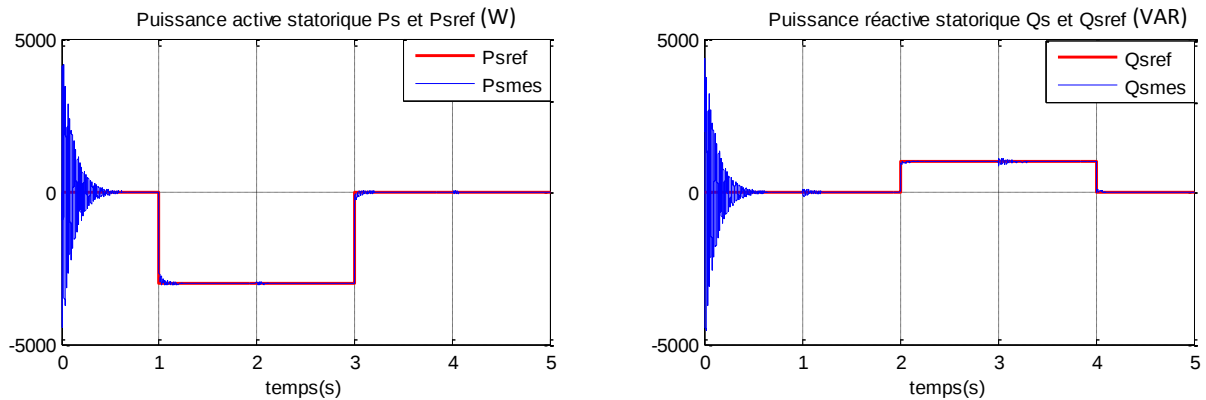


Figure III.7 : La puissance active et réactive statorique et sont reference sans boucle de puissance.

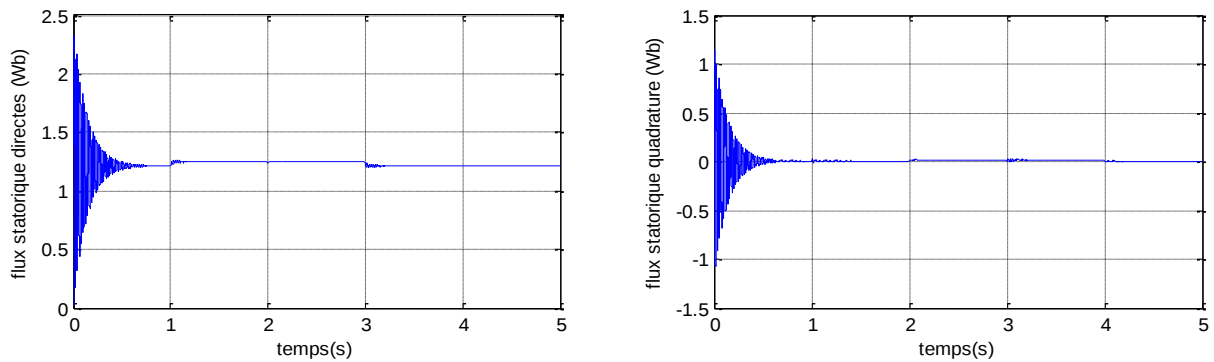


Figure III.8 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

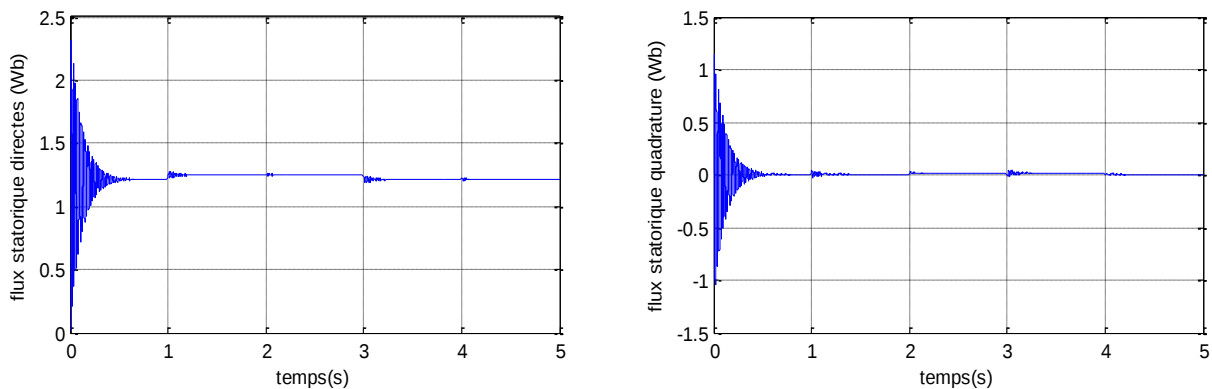


Figure III.9 : Le flux statorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance.

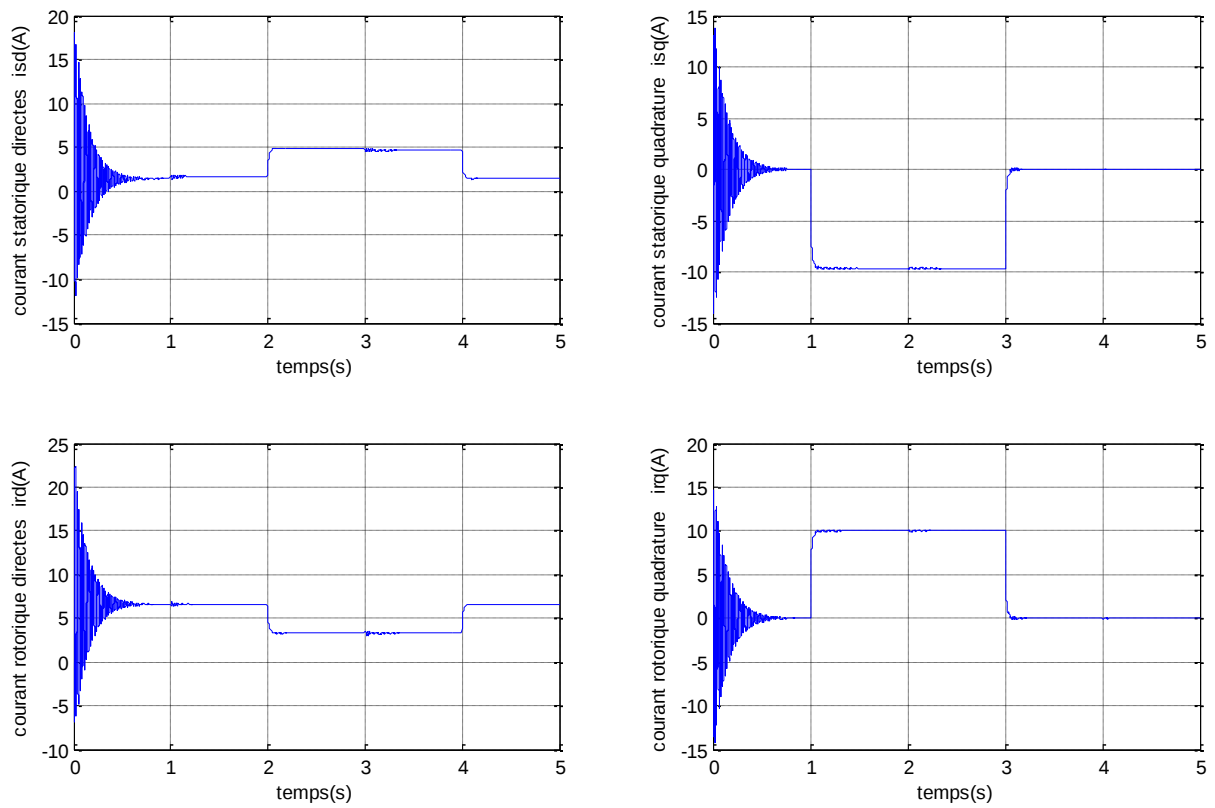


Figure III.10 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

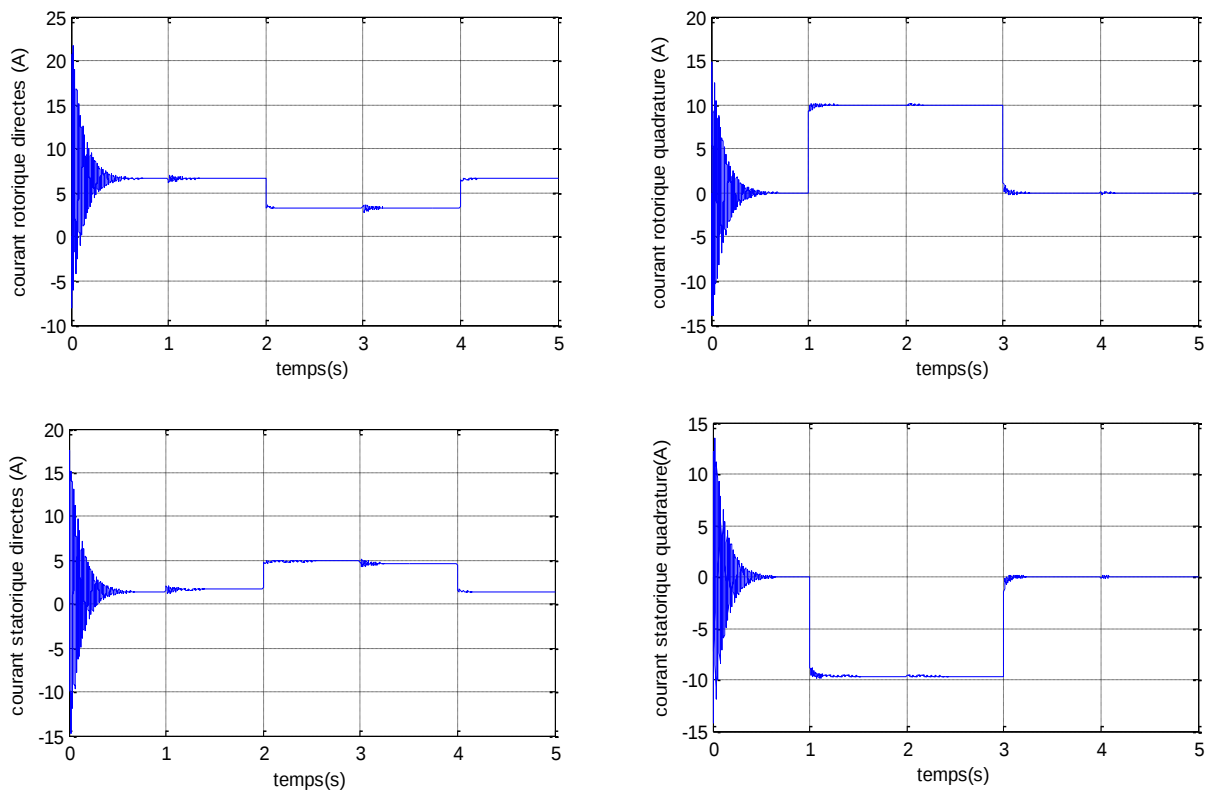


Figure III.11 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance.

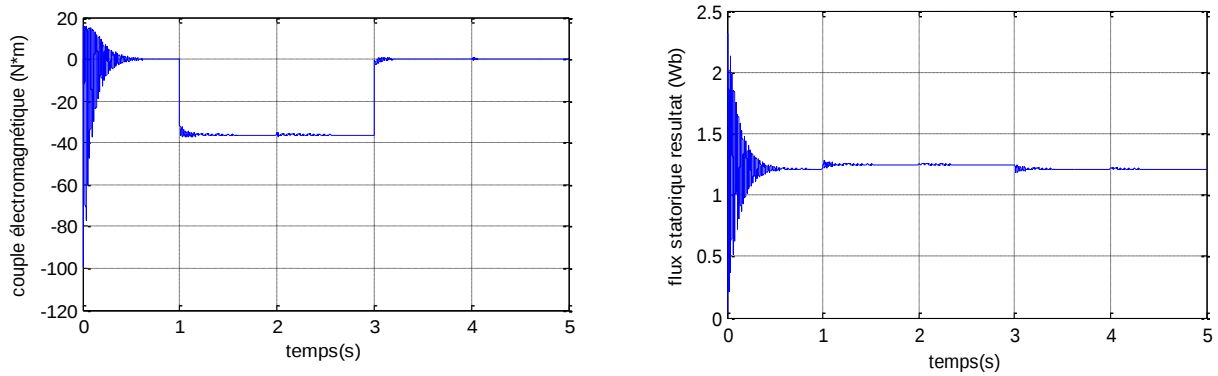


Figure III.12 : Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant sans boucle de puissance.

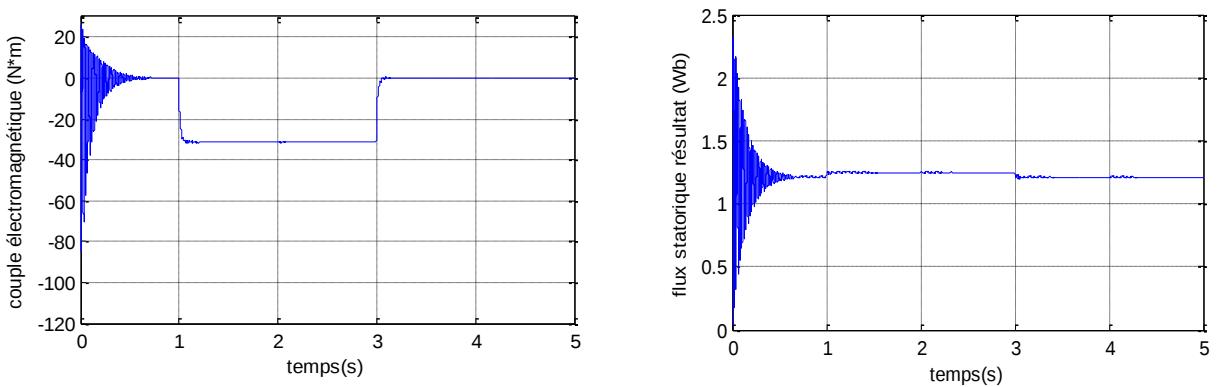


Figure III.13 : Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant avec boucle de puissance.

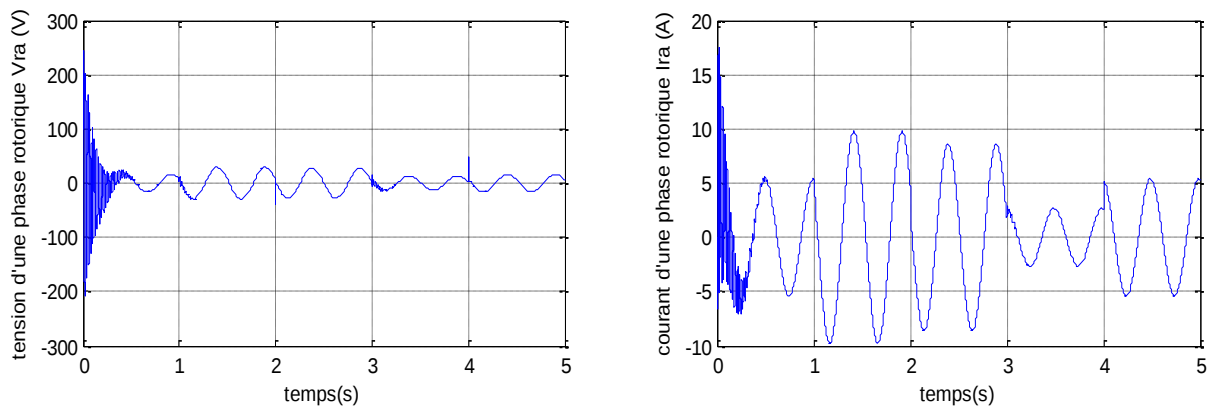


Figure III.14 : La tension Vra (V) et le courant Ira (A) d'une phase rotorique boucle ouverte.

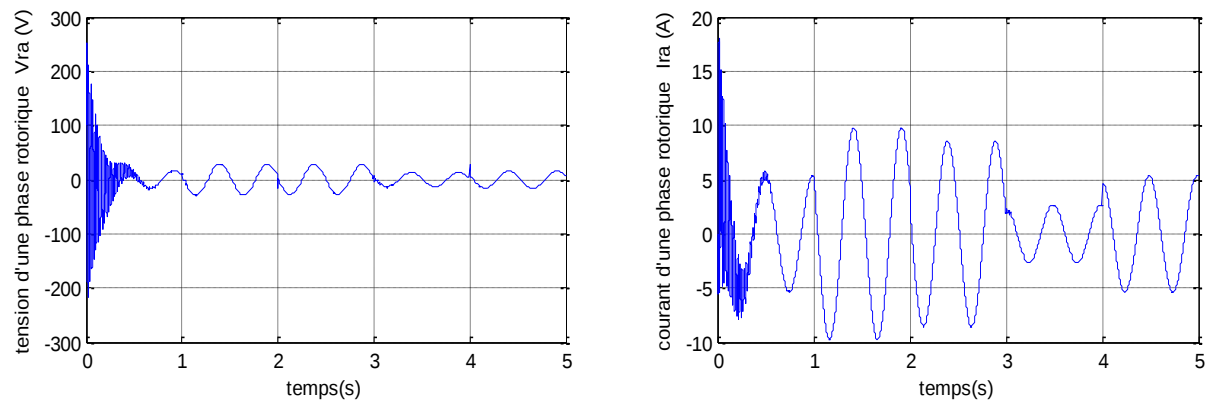


Figure III.15 : la tension Vra (V) et le courant Ira (A) d'une phase rotorique boucle fermée.

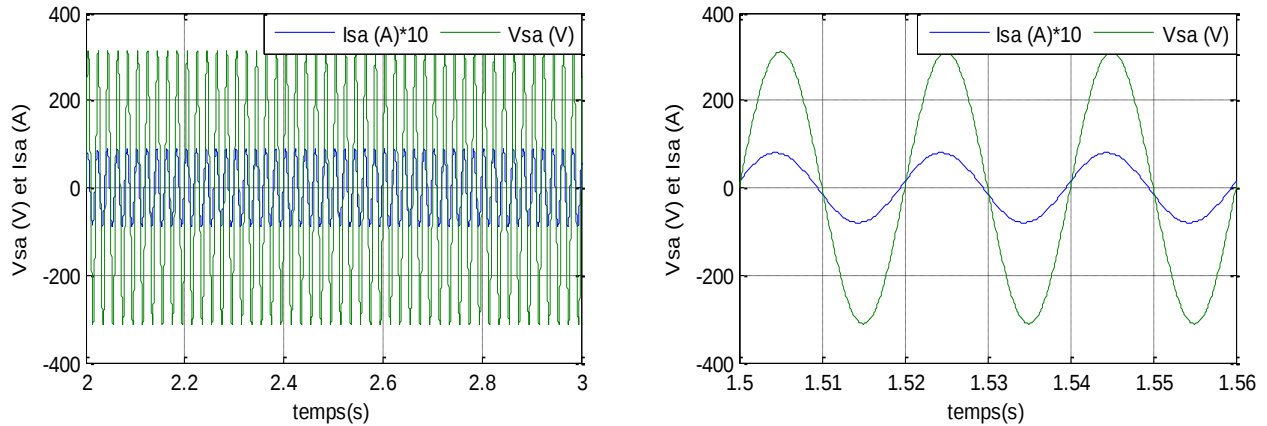


Figure III.16 : Tension et courant d'une phase statorique avec un zoom (boucle fermée).

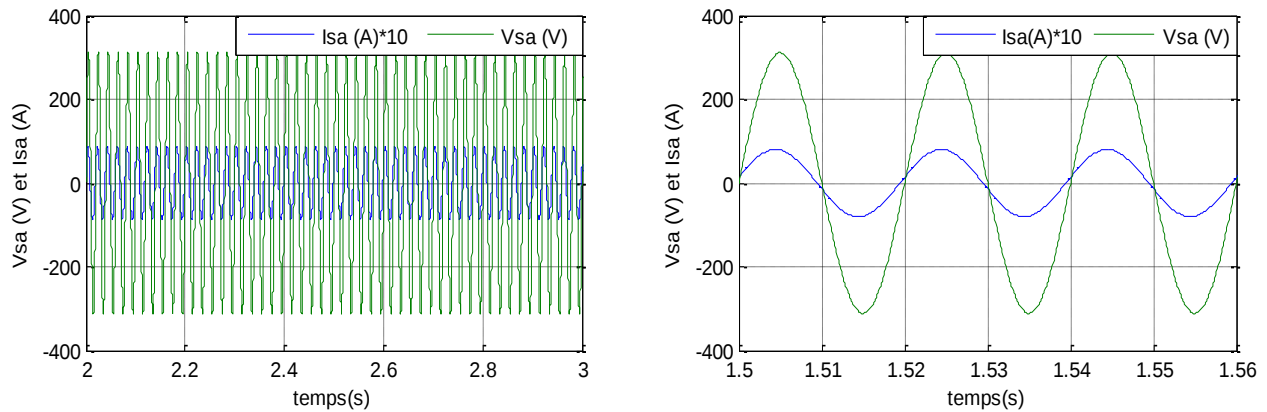


Figure III.17 : Tension et courant d'une phase statorique avec un zoom (boucle ouverte).

III.4.4 Interprétation des résultats

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirecte des puissances active et réactive par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB. Dans cette section, on est amené à représenter toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante. D'après ces résultats on constate que :

- La puissance active du côté statorique est négative entre les instant $t=1s$ et $t=3s$ ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle entre les instant $t=1s$ et $t=2s$, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. On retrouve ainsi le découplage si avantageux des moteurs à courant continu.

On obtient des bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux consignes des puissances active et réactive imposées, comme on peut le voir sur les figures (II.6, II.7).

Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine et des fluctuations de puissance pour la méthode en boucle ouverte (sans boucle de puissance), ces oscillations et ces fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermée (avec boucle de puissance).

- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

Nous pouvons également observer la présence d'une erreur statique sur les deux axes ceci est dû au fait que dans ce mode de contrôle (figure III.10 et III.11), Or les équations utilisées pour la reconstruction sont basées sur le modèle simplifié qui néglige la résistance R_s .

Cette technique nous a permis d'obtenir des courants triphasés statoriques parfaitement sinusoïdaux sans harmoniques, cela est illustré par la figure (III.16 et III.17) qui représente un courant et une tension d'une même phase statorique (la phase a).

III.4.5 Résultats de Simulation du système avec turbine

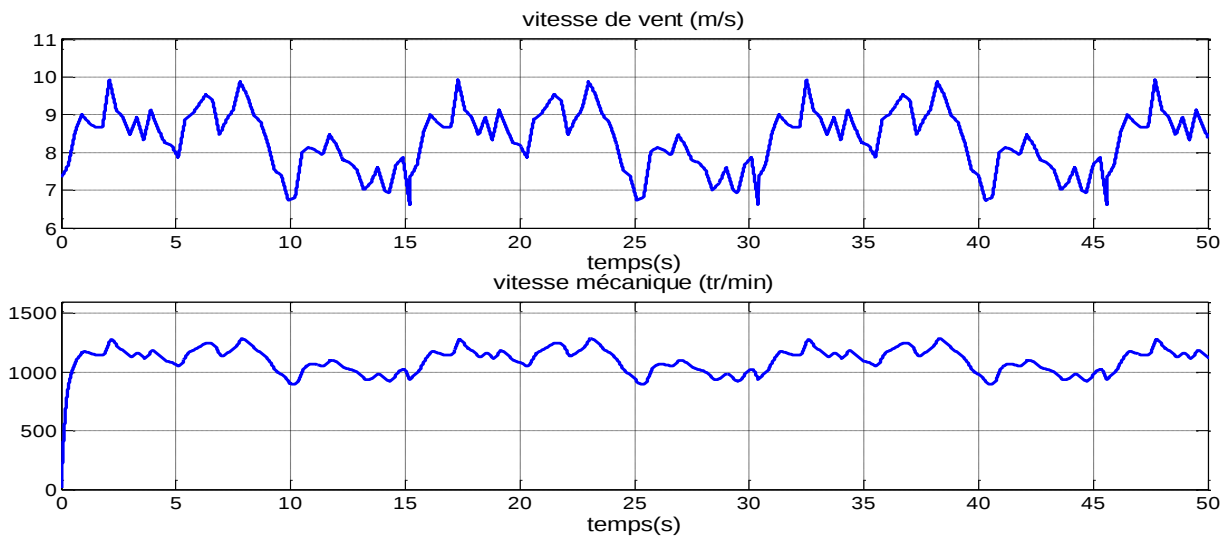


Figure III.18 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.

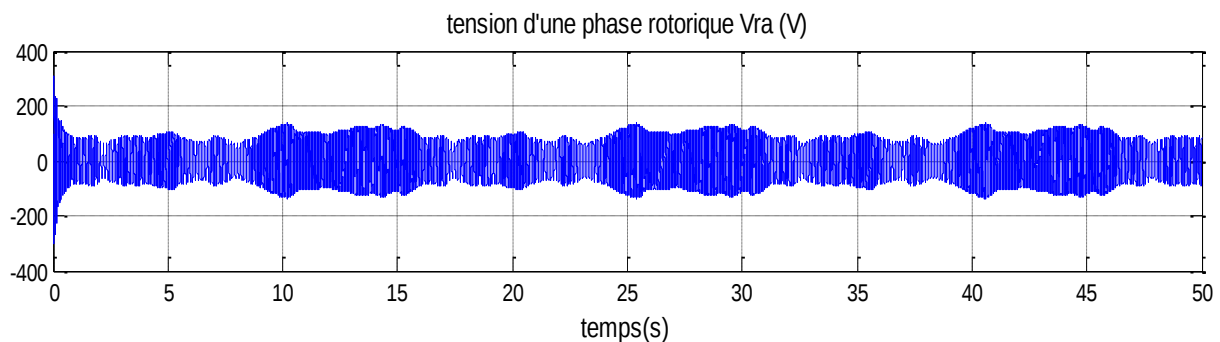


Figure III.19 : La tension d'une phase rotorique V_{ra} (V).

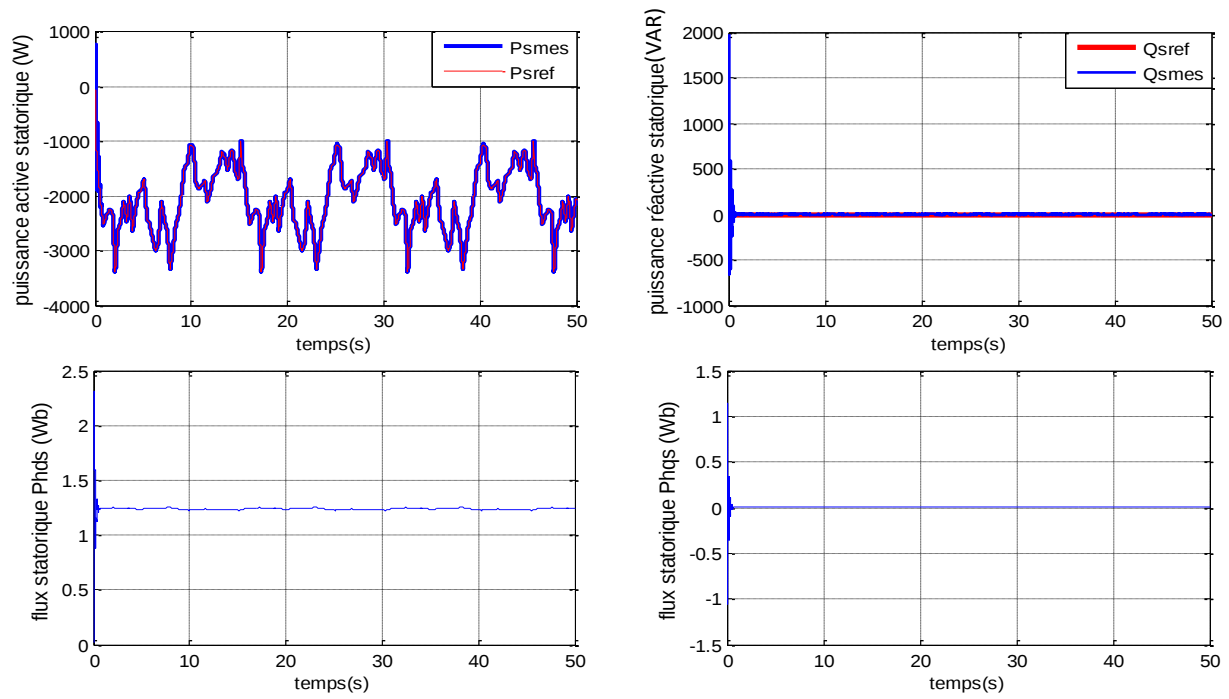


Figure III.20 : La puissance active et réactive et flux statorique.

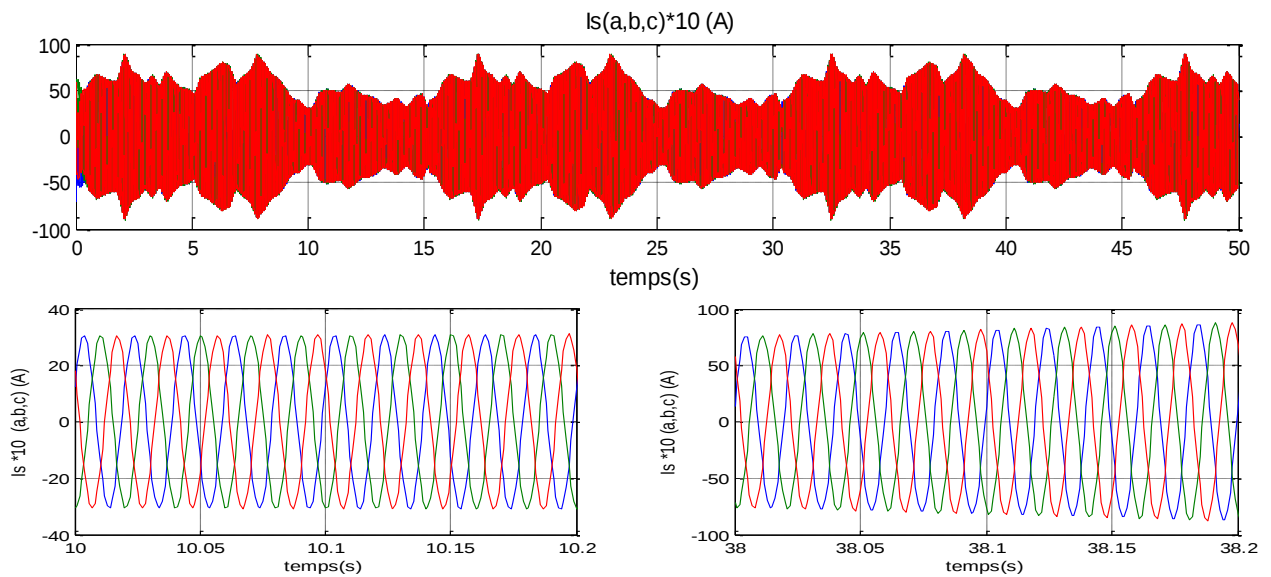
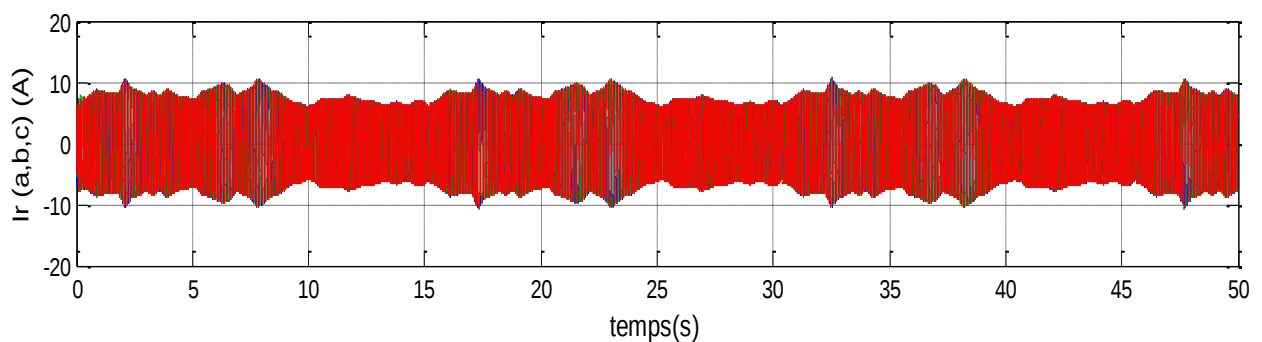


Figure III.21 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

Figure III.22 : Les composantes du courant rotoriques I_r (A).

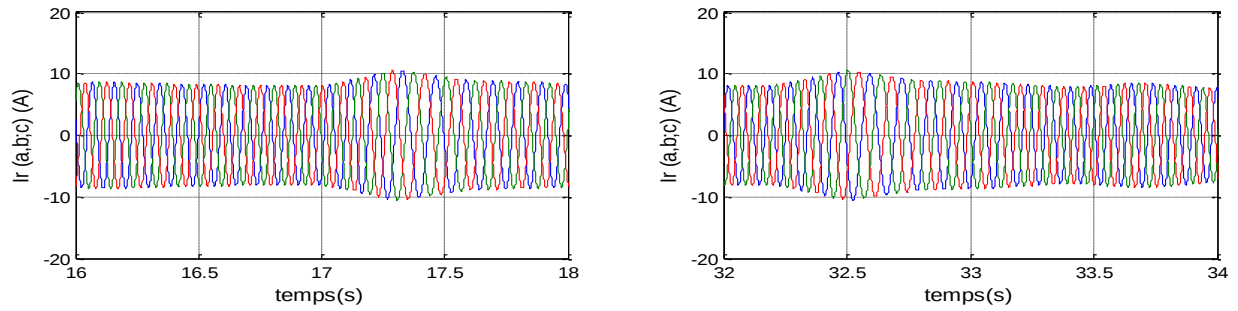


Figure III.23 : zoom les composantes du courant rotoriques I_r (A).

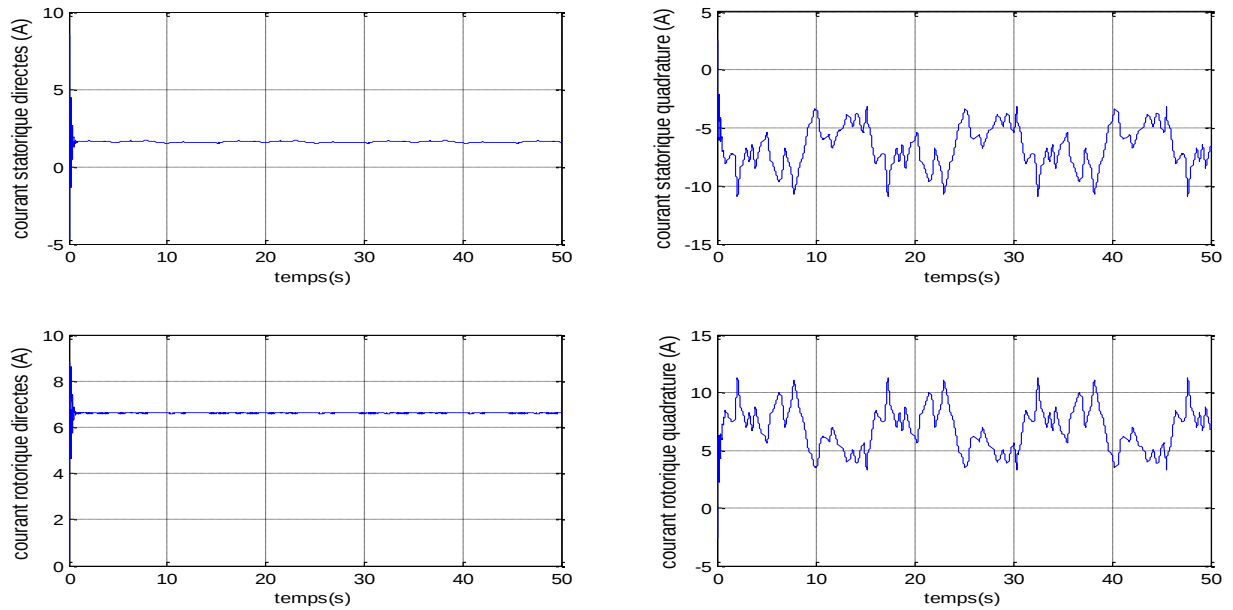


Figure III.24 : Les courants rotoriques et statoriques (d,q) (A) .

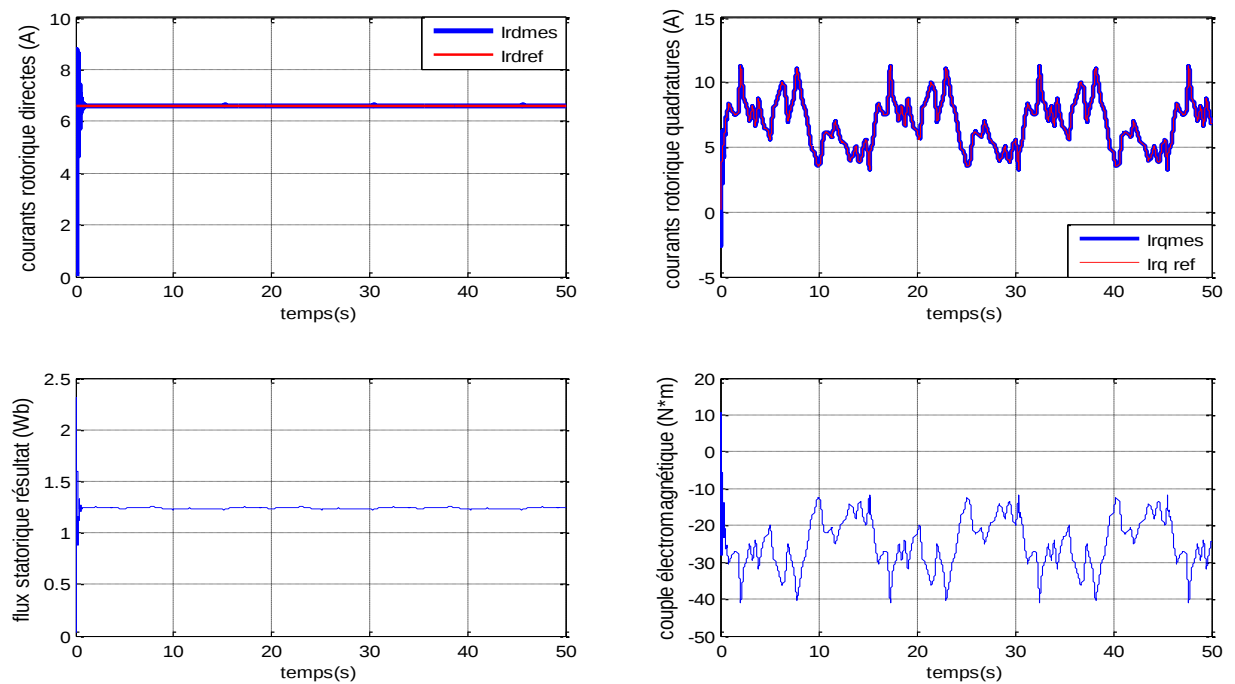


Figure III.25 : Les composantes du courant rotoriques et le flux résultat statorique et le couple électromagnétique.

III.4.6 Interprétation des résultats

Pour les faibles vents, d'une vitesse égale à 8m/s, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale.

Les résultats de simulations sont effectués sans onduleur. La consigne de puissance active est fonction de la vitesse du vent (déterminée à partir de la puissance de la turbine). La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro de manière à garder le facteur de puissance unitaire côté stator.

III.5 Modélisation et la commande d'une onduleur à deux niveaux GADA

La cascade présentée à la figure (III.26), comporte deux convertisseurs à MLI, chaque convertisseur à six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations [8].

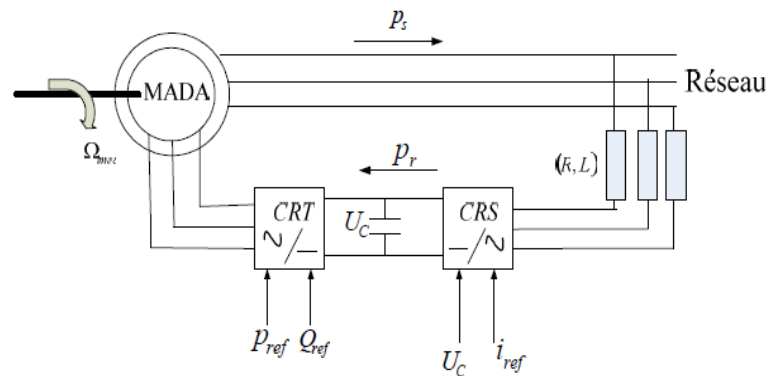


Figure III.26 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux- Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.

III.5.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur [8].

Un onduleur de tension triphasé est constitué de trois cellules (bras) de commutation de deux interrupteurs. Pour chaque interrupteur est formé par un transistor (ou un thyristor) monté

en tête bêche avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuitage de la source [17].

On peut remplacer chaque groupe transistor-diode de la figure (III.27.A) par des Interrupteurs K_j ($j=1,2,3,4,5,6$), on obtient le schéma simplifié pour chaque onduleur comme l'indique la figure (III.27. B).

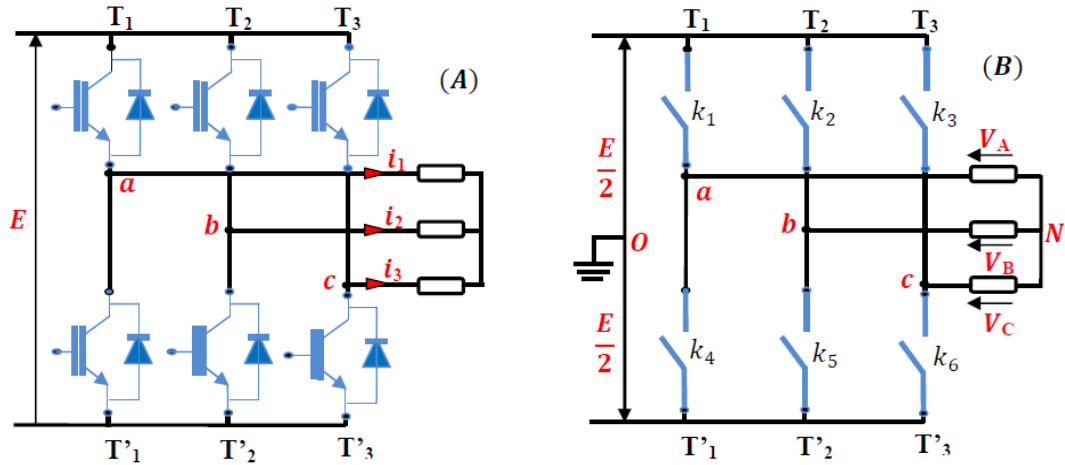


Figure III.27 : Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée.
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (III.15)$$

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

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$\text{Donc : } V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \Rightarrow V_{ON} = -(1/3) * (V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (III.16)$$

On remplace (III. 16) dans (III. 15), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

On peut écrire le système (III. 17) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

$$\text{Telque: } \begin{cases} S_1 = 1 & \text{Si } K_1 \text{ fermé} & \text{Si nom} & S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{Si } K_2 \text{ fermé} & \text{Si nom} & S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{Si } K_3 \text{ fermé} & \text{Si nom} & S_3 = -1 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

On remplace (III. 19) dans (III. 18) on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Le système (III. 21) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

III.5.2 Commande triangulaire-sinusoïdale

La MLI permet de former pour chaque alternance de la tension de sortie plusieurs créneaux. Pour obtenir cela, on adopte une certaine technique de commande des interrupteurs de l'onduleur. la stratégie triangulaire-sinusoïdale est l'une des techniques les plus simple. Elle consiste à comparer les trois tensions de référence, calculées par une transformation inverse de Park à un signal (porteuse) triangulaire d'amplitude fixe et de pulsation notamment supérieure à celle des tensions de références.

La stratégie triangulo- sinusoïdale est caractérisée par deux paramètres qui sont :

L'indice de modulation m qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence et le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse.

Les instants de commutation sont obtenus par la comparaison de trois tension de référence de fréquence f à l'onde triangulaire de haute fréquence f_p [20].

III.6 Commande Vectorielle De La GADA Avec Un Convertisseur A Deux Niveaux

De nos jours pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseur de puissance ainsi qu'un transformateur.

Ce convertisseur qui sera donc dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique La variation de la caractéristique de la machine asynchrone par l'utilisation d'un rhéostat de glissement s'accompagne de pertes joule considérables qui affectent le rendement. Pour pallier à cet inconvénient, on fait appel à une cascade de convertisseurs qui permet d'améliorer le rendement du système et offre en même temps une plage de variation importante de la vitesse.

Notre étude sera basée sur la structure de "cherbius" avec convertisseurs à MLI choisie auparavant parmi les différentes structures d'Alimentation de la MADA (chapitre II) [19].

III.6.1 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La structure de la cascade est celle représentée sur la figure (III.26). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu. Le redresseur à MLI à le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée, pour cela il faut régler cette tension de sortie suite à la nécessité de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence. Ce type de convertisseur peut opérer en redresseur ou en onduleur. Quand le courant I_{ch} est positif (Opération redresseur), le condensateur C est déchargé et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus d'énergie à partir du réseau, le bloc de commande prend l'énergie d'alimentation en produisant des signaux appropriés à l'amorçage des transistors. De cette façon l'écoulement de courant du coté alternatif vers le coté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand I_{ch} devient négatif (Opération Onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande à la commande la décharge du condensateur et renvoyé l'énergie vers le réseau.

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales), ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage [19].

III.6.2 Modélisation du redresseur à MLI

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la Conversion alternative-continu. On utilise un redresseur chaque fois qu'on a besoin de source continue sachant que l'énergie électrique est disponible en alternative [3].

L'inductance (L) et la résistance(R) représentent l'impédance de ligne, V est la tension de ligne et U_c la tension d'entrée du redresseur. La figure (III.28), présente la structure d'un redresseur à MLI triphasé, qui peut être décomposé en trois étages : La source, le convertisseur et la charge [21].

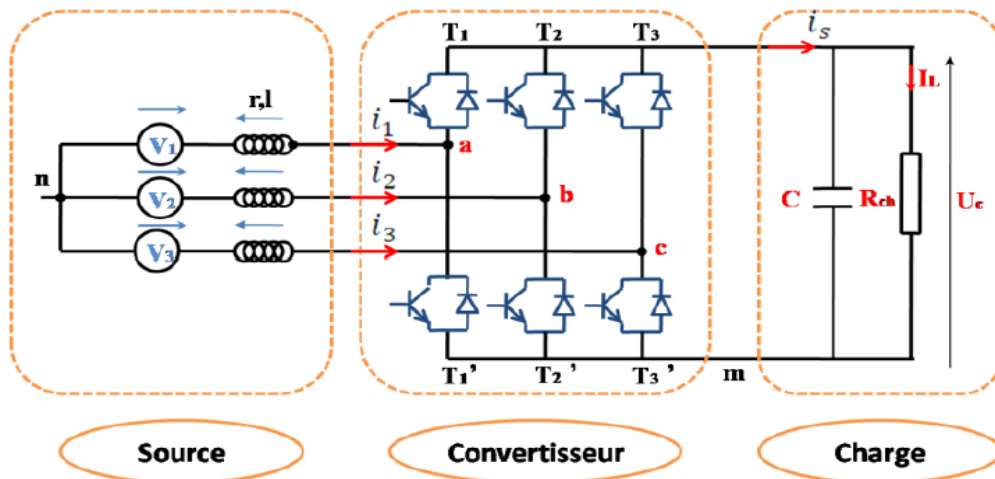


Figure III.28 : Structure du redresseur à MLI.

III.6.2.1 La source d'alimentation

C'est une f.é.m. 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. Les tensions de la ligne sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (III.22)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

III.6.2.2 L'étage 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 (III. 21).

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

En plus le courant redressé est donné par :

$$i_s = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

III.6.2.3 La charge

Cet étage est constitué d'une capacité C en parallèle avec une résistance R modélisant la charge continue. Et il est régi par les deux équations électriques :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_L) \\ U_c = R_{ch} i_L \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

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

$$\frac{U_c}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch}CP} \quad (\text{III.27})$$

A partir des relations (III. 22), (III. 23), (III. 24) et (III. 26), on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des N interrupteurs du haut (S_1 , S_2, S_3) et comme sortie la tension redressée.

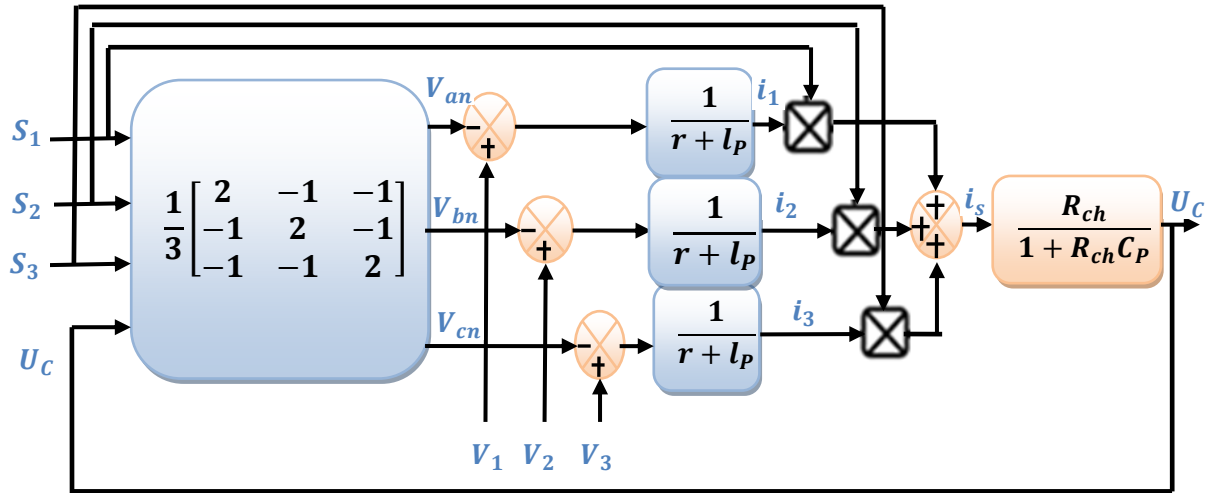


Figure III.29 : Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.

III.6.3 Régulation en cascade du redresseur à MLI dans le repère (d,q)

Il existe plusieurs techniques de commande des redresseurs à MLI, qui varient de la simplicité et la médiocrité de performances à la complexité et la robustesse (contrôle de l'angle de puissance du redresseur, commande à hystérésis de courant, commande par comparaison de rampe...)[14].

Grâce à ses trois régulateurs (Deux pour les composantes du courant et un pour la tension continue), la régulation en cascade dans le repère (d,q), est une technique suffisamment performante pour notre application.

III.6.3.1 Modélisation dans le repère (d,q)

Les équations régissant le système sont :

$$\begin{cases} V_{pd} = V_d - r i_d - l \frac{di_d}{dt} + l w i_q \\ V_{pq} = V_q - r i_q - l \frac{di_q}{dt} - l w i_d \end{cases} \quad \text{«(III.22) dans le repère (d,q) »} \quad (\text{III.28})$$

Où V_{pd} et V_{pq} : sont les composantes de Park des tensions à l'entrée du convertisseur.

V_d et V_q : Les composantes de Park des tensions du réseau.

i_d et i_q : Les composantes de Park des courants du réseau.

W : La pulsation du réseau.

Et les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} [V_d i_d + V_q i_q] \\ Q = \frac{3}{2} [V_q i_d - V_d i_q] \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

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

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Ce qui implique que les courants de ligne peuvent être obtenus par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{(V_d^2 + V_q^2)} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

ET on pose $P = U_c i_s$ et $Q = 0$

Le schéma bloc de la régulation est alors représenté dans la figure ci-dessous.

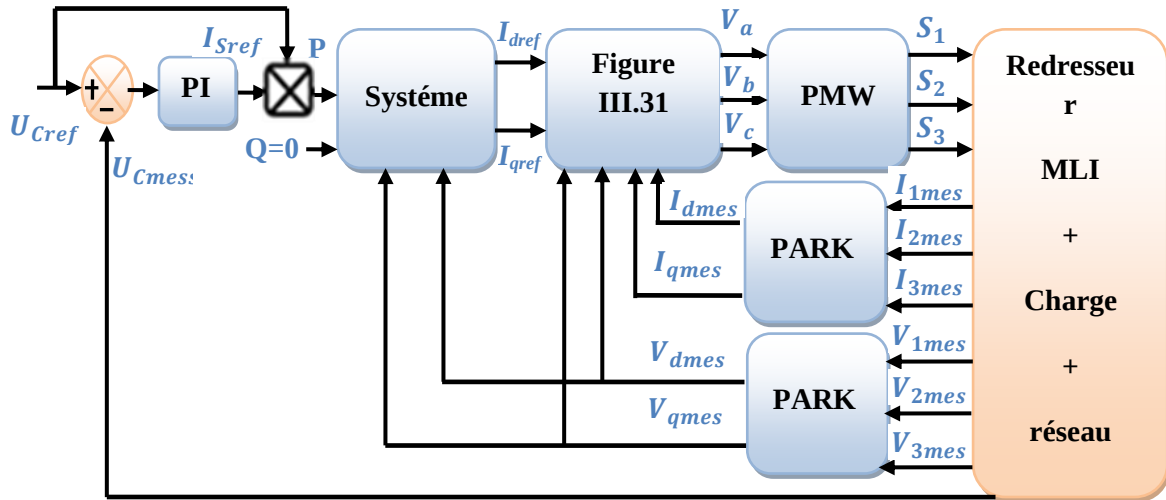


Figure III.30 : Schéma bloc de la commande en cascade du redresseur à MLI.

Avec le sous bloc de la figure(III.31), qui permet la régulation des courants et l'obtention de courants découplés selon les axes d et q, avec compensation de la tension réseau. « Selon la formule (III.27) »

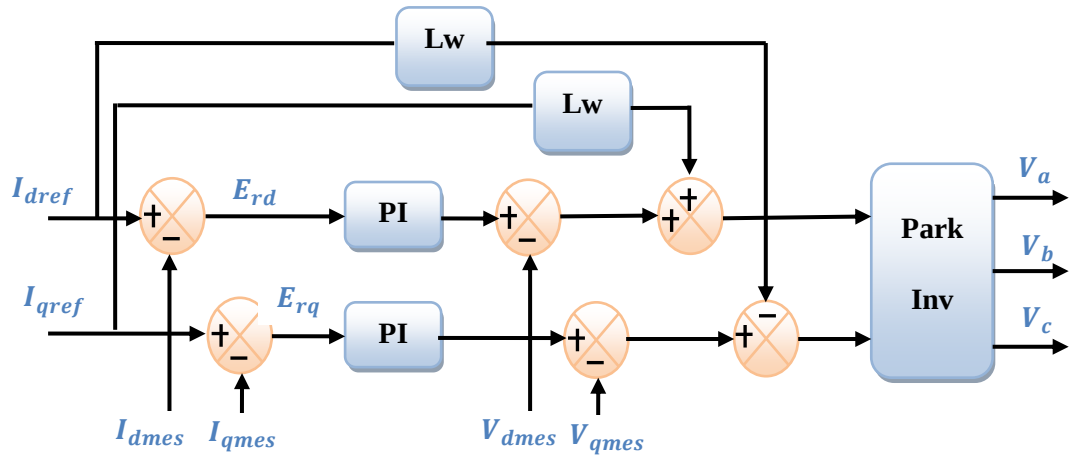


Figure III.31 : Bloc de régulation des courants avec compensation de la tension réseau.

Le calcul des régulateurs s'est fait avec la méthode classique détaillée dans la partie(III.3.5), sur les deux boucles internes équivalentes de courant et la boucle externe de tension représentées dans la figure (III.32)

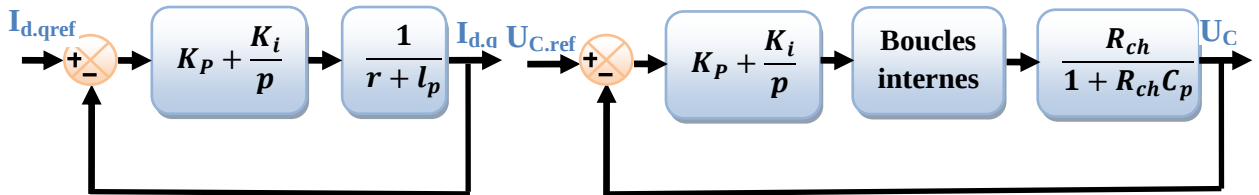


Figure III.32 : Boucles de régulation équivalentes des courants et de la tension.

III.6.3.2 Résultats de simulation

Les paramètres du redresseur utilisés en simulation sont :

- Résistance de ligne : $R = 0.3\Omega$
- Inductance de ligne: $L = 0.012H$
- Condensateur : $C = 5mF$
- Résistance de charge: $R_{ch} = 100\Omega$
- Fréquence de la porteuse MLI : $f_e = 5000Hz$

Et les résultats obtenus sont les suivants :

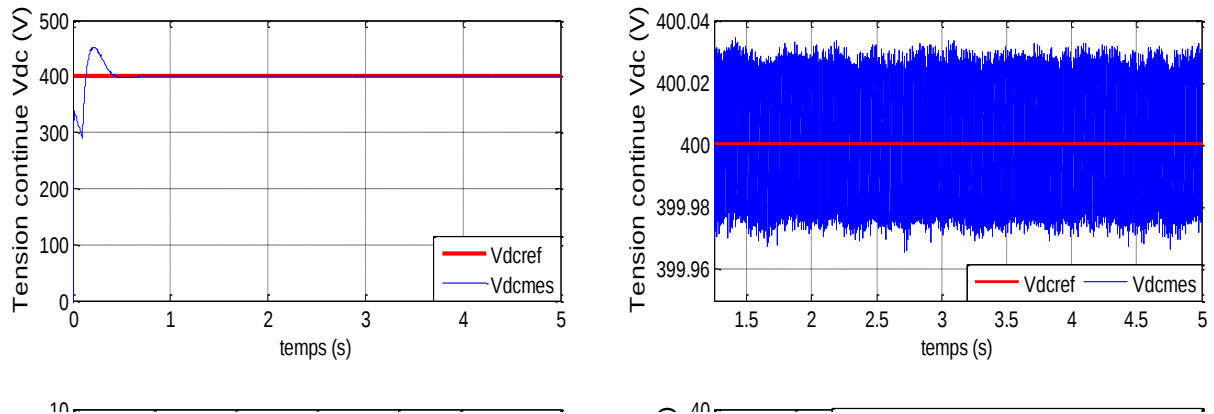


Figure III.33 : Tension du bus continu avec un zoom.

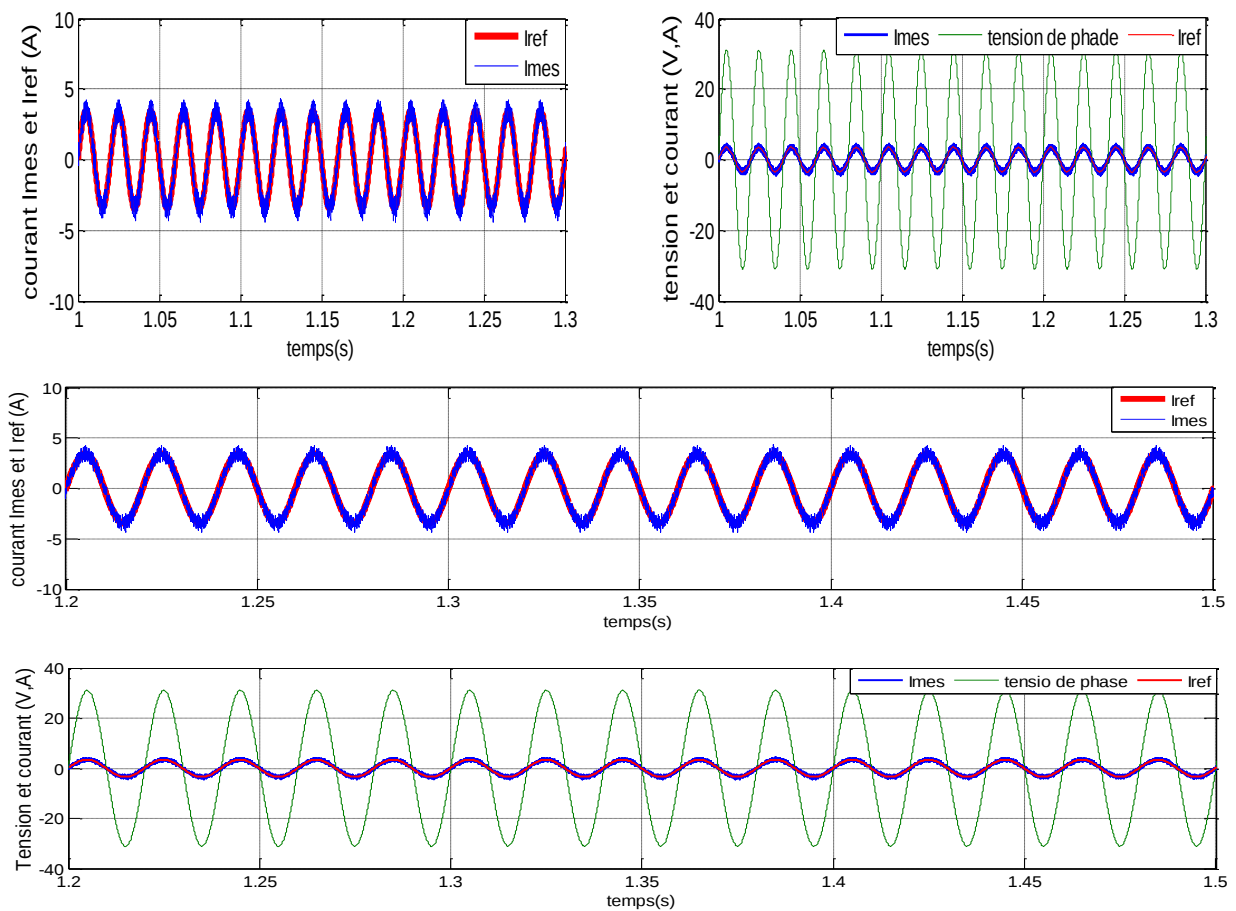


Figure III.34 : Courant et tension de ligne avec un zoom.

II.6.3.3 Interprétation des résultats

Il est clair que la tension continue suit la référence imposée (Figure III.33). En plus les courants de ligne suivent parfaitement leurs références et ont une forme sinusoïdale (Figure III.34). Ce qui confirme l'intérêt du redresseur à MLI dans la réduction des harmoniques.

III.6.4 Schéma synoptique du système

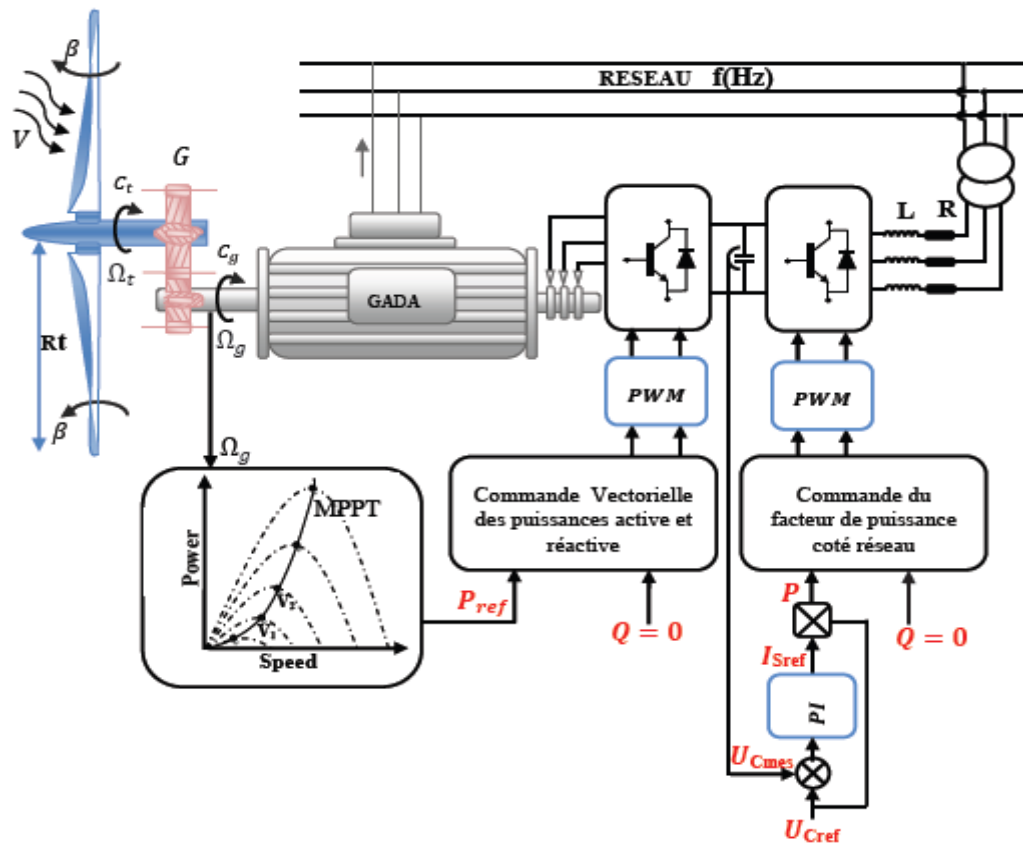


Figure III.35 : Schéma synoptique du système global (convertisseur & GADA & turbine).

III.6.5 Résultats de simulation du système avec turbine

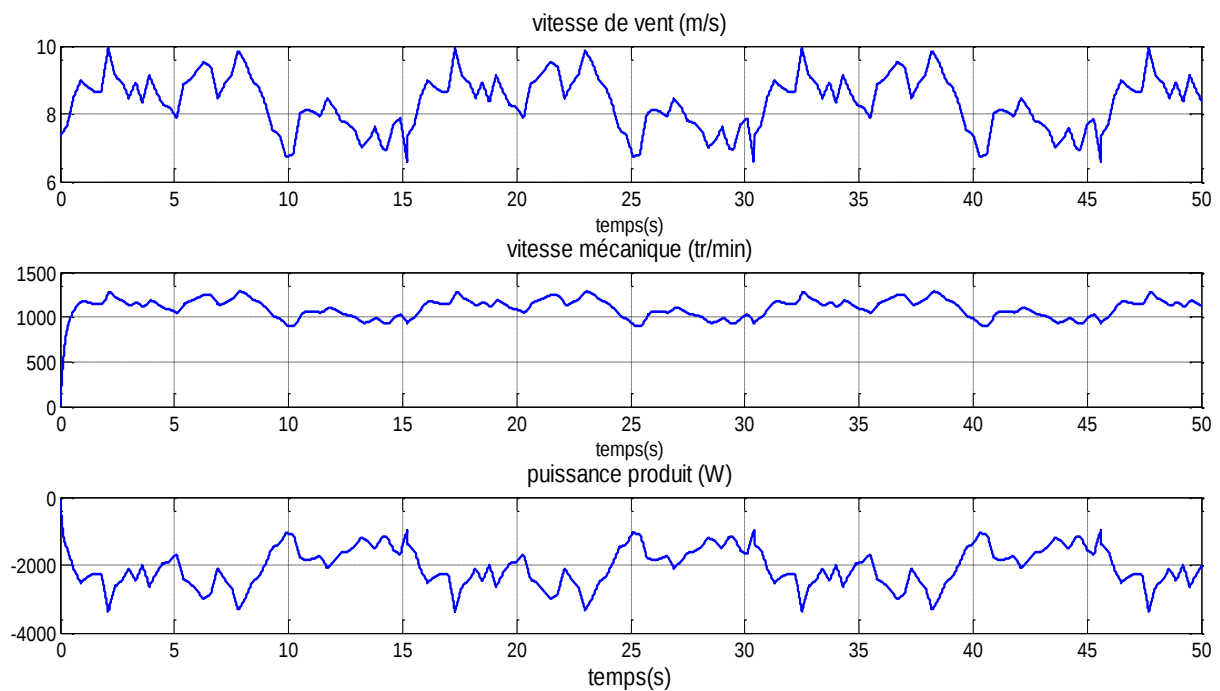


Figure III.36 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique et la puissance de turbine(produit).

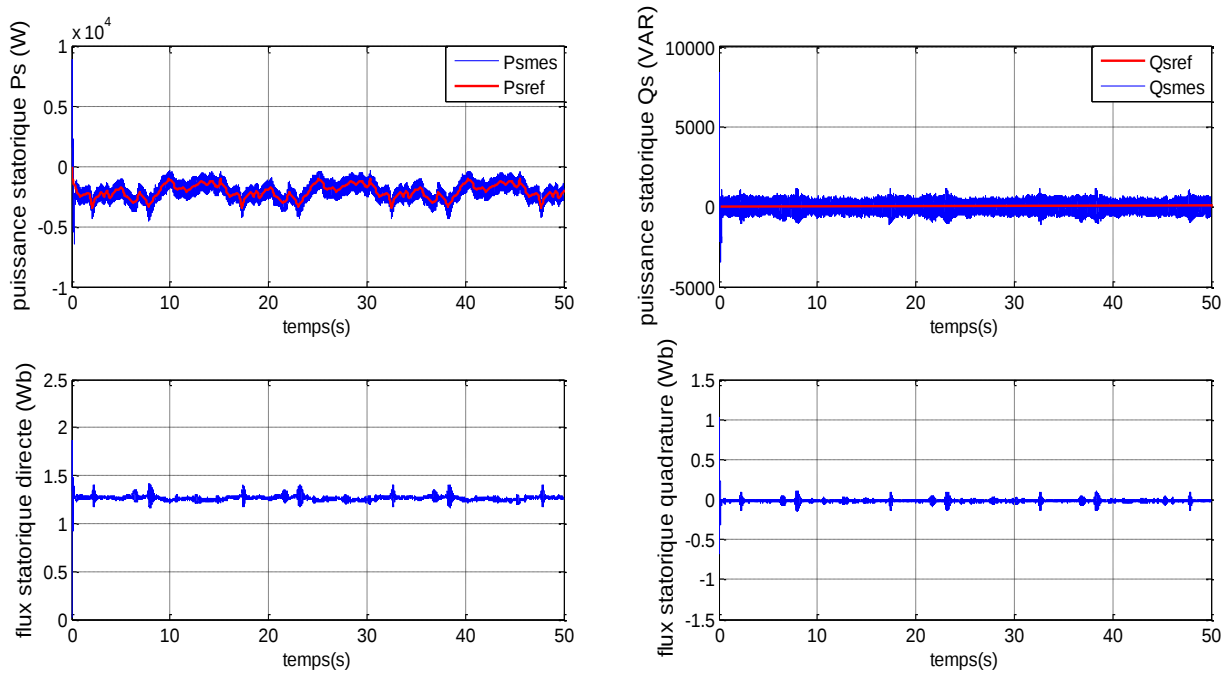


Figure III.37 : La puissance active et réactive statorique et les composantes de flux.

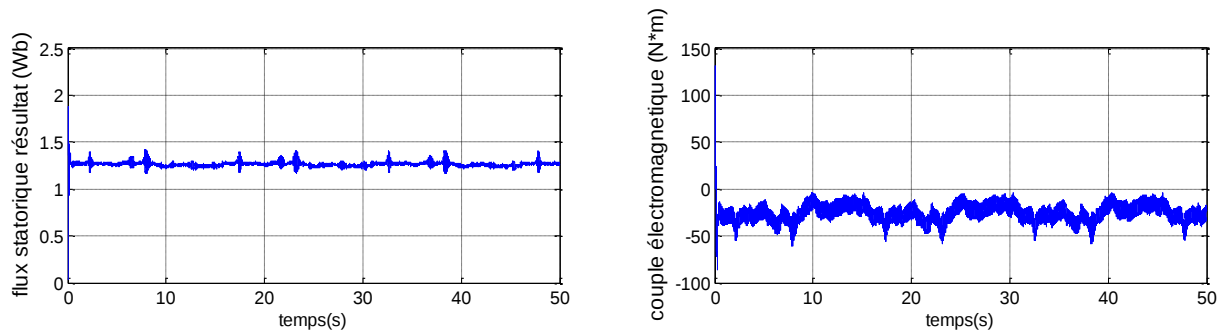


Figure III.38 : Le flux statorique résultat et la couple électromanétique.

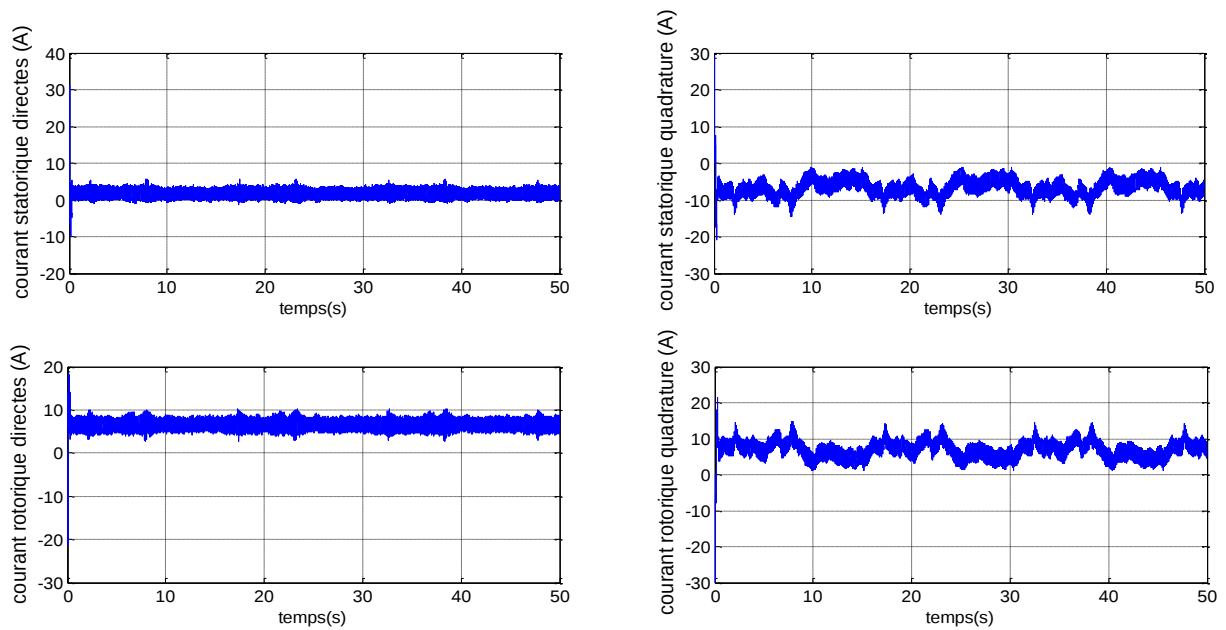


Figure III.39 : Les composantes du courant statoriques rotoriques.

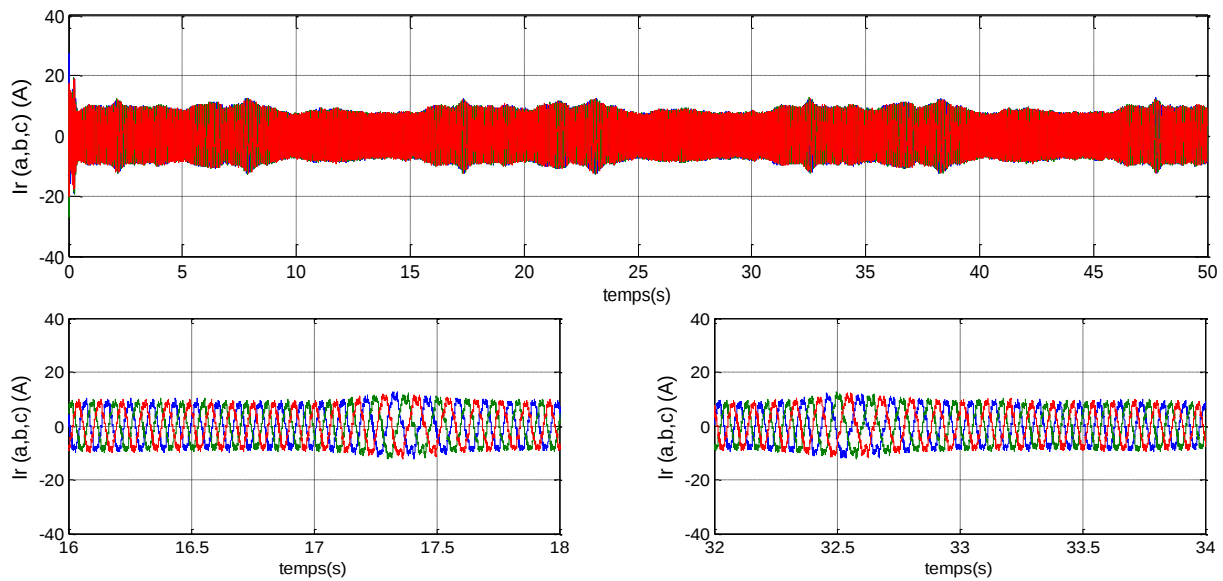


Figure III.40 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.

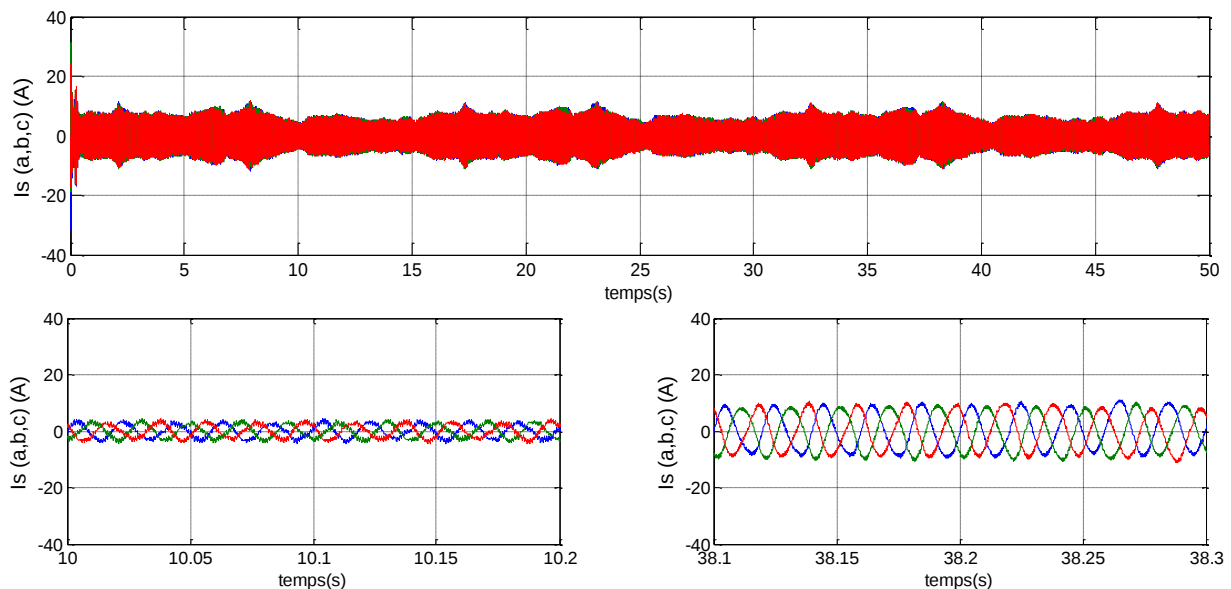


Figure III.41 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

III.6.6 Interprétation des résultats

Les figures présentées montrent les performances de la cascade utilisant un redresseur et un onduleur à deux niveaux connecté au rotor de la MADA qui est entraîné par une turbine éolienne. L'asservissement du redresseur consiste à deux boucles de régulation (une boucle interne et une autre externe). La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine. On constate un bon suivi de consigne pour la puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. On remarque aussi la chronologie de fonctionnement de l'éolienne par les variations des différentes grandeurs présentées. La tension redressée est asservie à sa référence

(400V). On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suivi de consigne pour puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. La fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

III.7 Conclusion

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

Ce chapitre nous a permis de modéliser les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur à MLI deux niveaux) et sa commande pour réguler la tension du bus continu. Ce travail a débouché sur la garanti d'un approvisionnement en tension continue constante et régulée aux bornes de l'onduleur coté rotor de la MADA.

Pour pallier au problème de la sensibilité de la commande aux perturbations et aux incertitudes paramétriques (telle que la résistance de la charge non linéaire ...), nous allons introduire un deuxième type de commande non linéaire, en l'occurrence, la commande par mode glissant. Ce la dernière fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre

IV

**Commande par mode glissant
des puissances actives et
réactives**

IV.1 Introduction

Dans la formulation de n'importe quel problème de commande il y a typiquement des anomalies entre le système réel et le modèle mathématique développé pour la conception de contrôle. Cette distinction peut être due à la variation des paramètres de la dynamique du système ou à l'approximation du comportement complexe de système par un modèle. Ceci a mené à un intérêt intense pour l'élaboration des méthodes de contrôle robustes qui cherchent à résoudre ce problème.

En effet, des techniques de commande sont demandées, dans le but de résoudre le problème des variations paramétriques, avec une erreur statique nulle, une réponse ferme et rapide, un système de contrôle stable et robuste. Cette méthode s'appelle la commande par mode glissement [13].

La commande par mode de glissant a connu un grand succès ces dernières années. Cela est dû à la simplicité de mise en œuvre et la robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus [31].

Afin d'obtenir ce régime glissant, une loi de commande est requise pour avoir une nature discontinue, c'est à dire que la structure du système a besoin d'être modifiée dans le temps. Un tel système est appelé système à structure variable (Vss) (Variable Structure System) [13].

Dans ce chapitre, seront présentés les concepts généraux de la commande de système à structure variable ainsi que des notions générales sur la technique des modes glissants.

IV.2 Système à structure variable

IV.2.1 Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

- Synthétiser une surface $S(x, t)$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Déterminer une loi de commande (commutation) $U(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

IV.2.2 Principe

La commande par mode glissement consiste à ramener la trajectoire d'état de système boucle vers une surface de glissement et la faire de comète autour de cette surface jusqu'à point

d'équilibre [23]. D'où le phénomène de glissement figure (IV.1), En résumé, une commande par régime glissant est divisée en deux parties :

- Détermination d'une région d'espace d'état telle qu'une fois que le système se trouve dans cette région, il ait le comportement désiré.
- Définition d'une loi de commande qui conduit le système jusqu'à cette région de l'espace d'état.

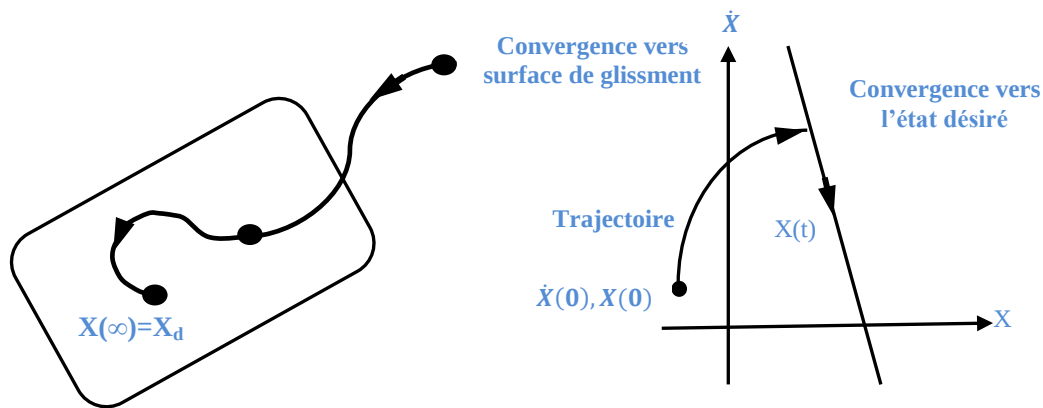


Figure IV.1: Convergence du système glissant.

IV.2.1.1 régime glissant idéal

En théorie l'organe de commutation est supposé insensible aux bruits, et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation $S(x) = 0$. Le régime glissant idéal à une oscillation de fréquence infinie et d'amplitude nulle, le point représentatif de l'évolution du système glisse parfaitement sur l'hyper surface de commutation s .

IV.2.1.2 Régime glissant réel

En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir de relais qui présentent des imperfections comme les retards de commutations, dans ce cas la trajectoire de phase du régime glissant reste au voisinage de la surface de commutation donnant naissance à des oscillations indésirables qui éliminent la précision du système et néanmoins sa stabilité.

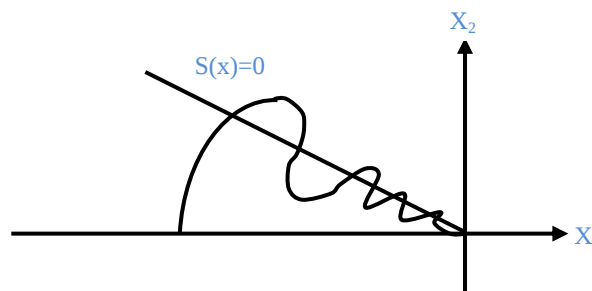


Figure IV.2 : Glissement réel.

IV.3 Différentes structures du contrôle par mode de glissement

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Et en fin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente".

IV.3.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Un système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande peut être représenté par la figure (IV.3)

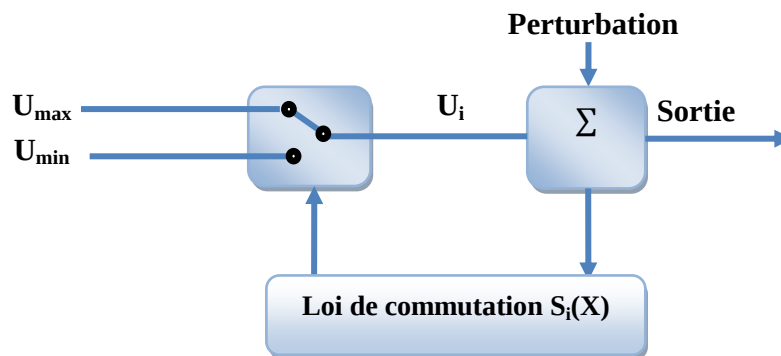


Figure IV.3 : régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.

L'application du réglage par mode de glissement selon la configuration représentée nécessite, un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation très rapide d'une position à une autre [23]. Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas.

IV.3.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Le principe d'une telle commande est illustré dans la figure (IV.4) k_1 et k_2 représentent les gains de commutation, u_i la commande du système pour chaque gain et s_i la surface de commutation, $i=1, 2$.

Cette structure est la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande des machines à induction. Le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système [25].

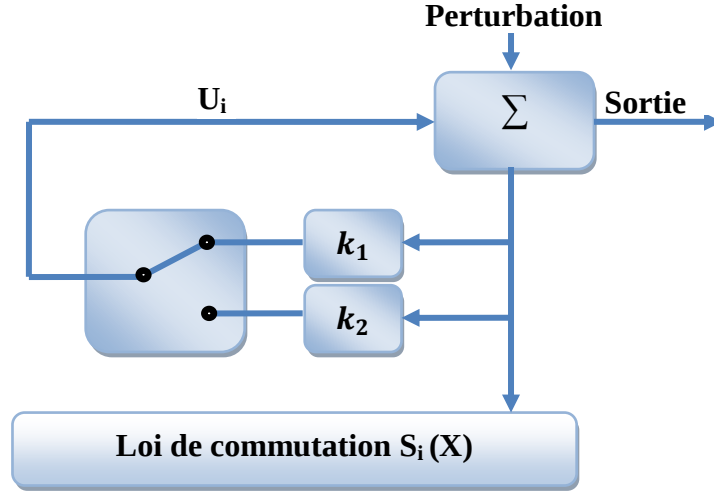


Figure IV.4 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.

IV.3.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (IV.5), présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [25].

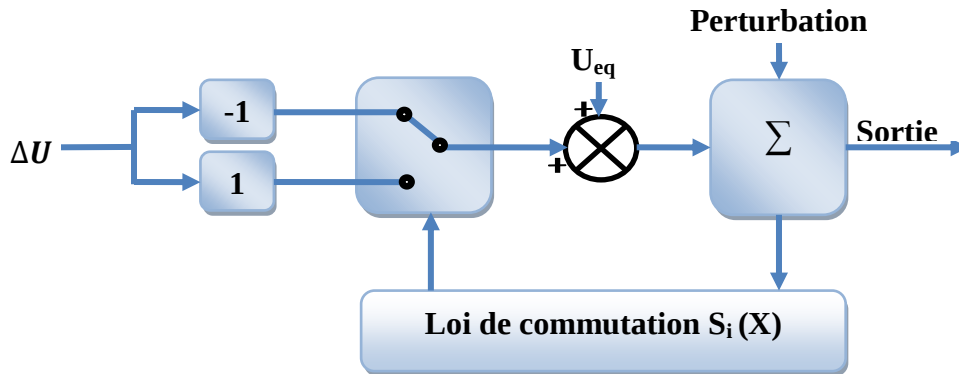


Figure IV.5 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.

IV.4 Synthèses de la commande robuste par mode glissant

Considérant un système non linéaire décrit par :

$$\dot{X}(t) = f(x, t) + g(x, t)u \quad (IV.1)$$

Avec :

$x(t) = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ le vecteur d'état. $f(x, t)$ et $g(x, t)$ des fonctions nonlinéaires du vecteur

d'état décrivant le système. Le but du contrôle de la poursuite est de trouver une loi de commande telle que, étant donné une trajectoire désirée $x^d(t)$ l'erreur de poursuite $x(t) - x^d(t)$ tend vers zéro malgré la présence des perturbations [32].

L'erreur de poursuite est définie par :

$$e(t) = x(t) - x^d(t) = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T \quad (IV.2)$$

La mise en œuvre d'une commande par mode glissant passe par trois étapes :

IV.4.1 Choix des surfaces de glissement

on propose une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x^d cette fonction est donnée par l'équation [33] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (IV.3)$$

Avec :

x : variable à réguler,

$e(x)$: l'écart de la variable à réguler,

λ_x : Constante positive,

r : degré relatif c'est le plus petit entier positif tel que : $\frac{\delta s}{\delta u} \neq 0$.

$\frac{\delta s}{\delta u} \neq 0$: assure le commanditaire.

Pour :

$$r = 1 : S(x) = e(x).$$

$$r = 2 : S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x).$$

$$r = 3 : S(x) = \lambda_x^2 e(x) + \lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x).$$

$S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correcte du gain λ_x .

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart à pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre r .

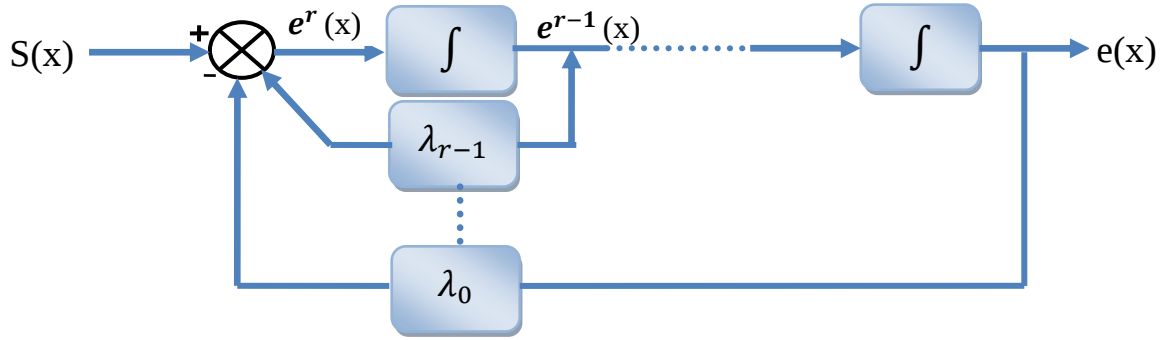


Figure IV.6 : Linéarisation exacte de l'écart.

IV.4.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Le mode glissant existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre $U_{\max}$ et $U_{\min}$. Ce phénomène est illustré dans la Figure (IV.7) pour le cas d'un système de réglage du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état x_1 et x_2 [13].

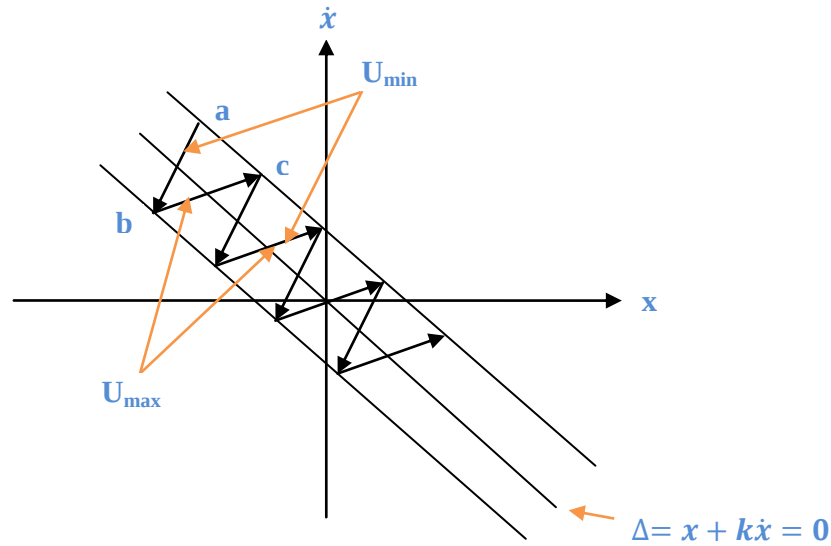


Figure IV.7 : Démonstration du mode de glissement.

On considère d'abord une hystérésis sur la loi de commutation $S(x) = 0$ (droite continu), les commutations ont lieu sur les droites décalées parallèlement de $\pm \Delta S$. Une trajectoire avec $U = U_{\max}$ touche au point "a" le seuil de basculement inférieur. Si avec $U = U_{\min}$, la trajectoire est orientée vers l'intérieur de la zone de l'hystérésis, elle touche au point "b" le seuil de basculement supérieur ou lieu de commutation sur $U = U_{\min}$. Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'inférieur et ainsi de suite. Il y'a donc un mouvement continu à l'intérieur de la zone de l'hystérésis. Par conséquent la loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de $S(x) = 0$ et le vecteur x suit une trajectoire qui respecte cette condition.

Les conditions de convergence permettent à la dynamique du système, dans le plan de phase, de converger vers la surface de glissement, nous citons deux conditions :

IV.4.2.1 La condition directe de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est sous la forme :

$$s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{IV.4})$$

IV.4.2.2 La fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V} < 0$.

En définissant la fonction de Lyapunov :

$$v(x) = \frac{S^2(x)}{2} \quad (\text{IV.5})$$

Sa dérivée sera :

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) \quad (\text{IV.6})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que :

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{IV.7})$$

Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de robustesse et garantit la stabilité du système non linéaire [27].

IV.4.2.3 Détermination de la loi de commande

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement doit être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée [28]. En présence d'une perturbation, la commande discontinue a pour but de vérifier les conditions d'attractivité. La structure du contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}), et l'autre stabilisante (ΔU), Elle est donnée par :

$$u = u_{eq} + \Delta U \quad (\text{IV.8})$$

u_{eq} : Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x)$. La commande équivalente est déduite en considérant que le dérivé de la surface est nul $\dot{S}(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme

étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{max} et u_{min} [29].figure (IV.8).

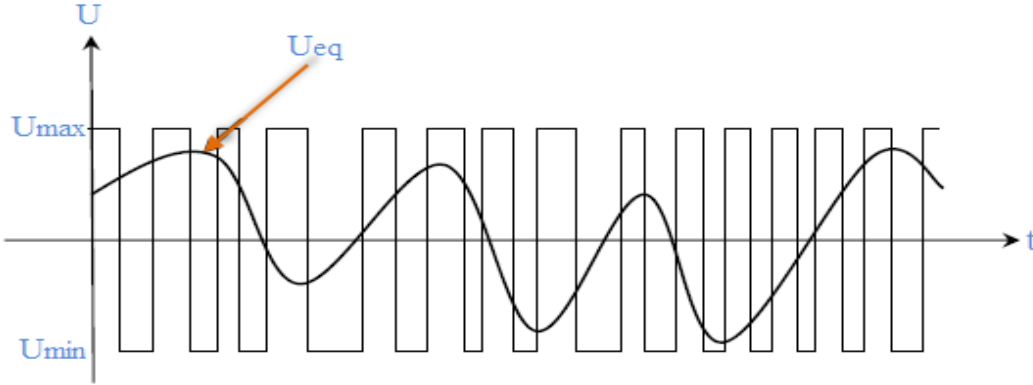


Figure IV.8 : Commande équivalente.

ΔU :est La commande discontinue sert à retirer cette variable vers sa référence dans le cas où elle n'est pas sur la surface de glissement [29]. Elle est alors déterminée pour vérifier la condition de convergence.

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (IV. 9). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande U.

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (IV.9)$$

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S} = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (IV.10)$$

En remplaçant (IV. 9) et (IV. 8) dans (IV. 7), on trouve :

$$\dot{s}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial s}{\partial t} [B]\Delta U \quad (IV.11)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente.

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} [A][X] \right\} \quad (IV.12)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que : $\frac{\partial s}{\partial x} [B] \neq 0$

Durant le mode de convergence et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (IV. 11), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} [B] \Delta U \quad (\text{IV.13})$$

et la condition d'attractivité $s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0$ devient :

$$s(x) \frac{\partial s}{\partial x} [B] \Delta U < 0 \quad (\text{IV.14})$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de ΔU doit être opposé à celui de $s(x) \frac{\partial s}{\partial x} [B]$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction sign Figure (IV.9).

$$\Delta U = k_x \text{sign } s(x) \quad (\text{IV.15})$$

Le signe de k_x doit être différent de celui de $\frac{\partial s}{\partial x} [B]$.

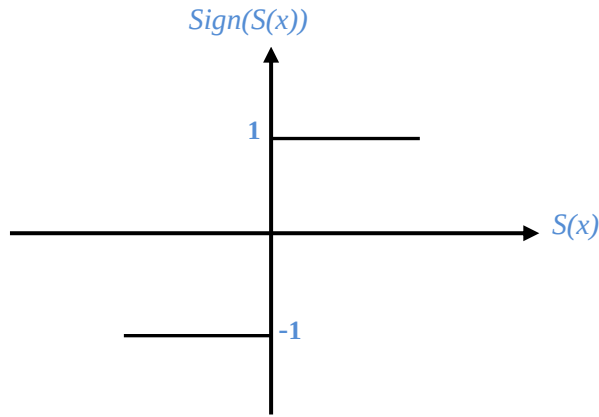


Figure IV.9 : Fonction sign.

IV.5 Le phénomène du Chatterings

Dans une commande à structure variable, la commande discontinue nécessite une haute activité (commutations infiniment rapides) pour compenser la dynamique non modélisée. En pratique, cette commutation n'est pas instantanée et la commande n'est ainsi pas aussi rapide qu'il est exigé, à cause du temps mis dans le calcul de la commande et les limitations technologiques des dispositifs de commutation. De plus, la valeur de $S(x)$ n'est pas connue avec une précision infinie. Cette limite sur la rapidité de commutation conduit à l'apparition d'oscillations indésirables de haute fréquence (couramment appelées chatterings) autour de la surface de glissement [30].

Plusieurs techniques ont alors été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Les solutions par limitation de la condition de glissement sont les plus utilisées dans les applications en temps réel.

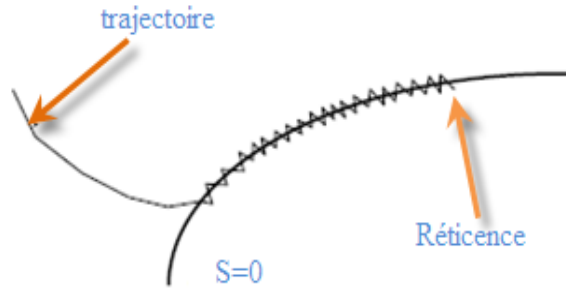


Figure IV.10 : Commande équivalente.

Dans cette section nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement. Ces techniques sont basées sur la définition d'une zone autour de la surface s , à l'intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la condition *signe* est appliquée. Ainsi, le terme $sign(s)$ dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce [29], par exemple :

IV.5.1 La proposition de Slotine

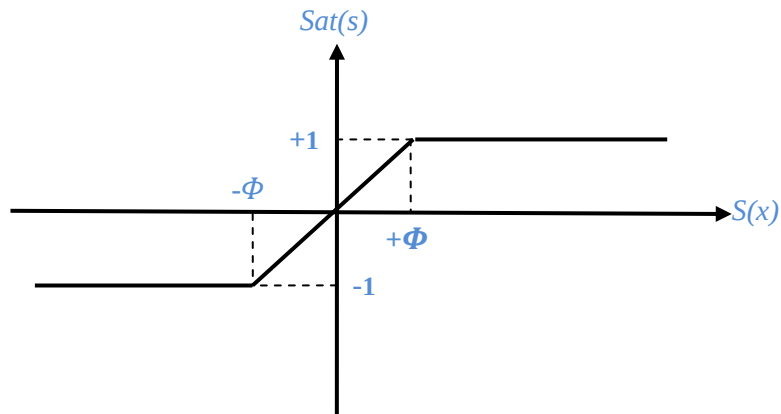
Elle consiste à approximer la commande discontinue par une loi continue au voisinage de la surface, cette fonction a le nom « *sat* ». Dans ce cas la commande devient :

$$u = -ksat(s) \quad (IV.16)$$

La fonction « *sat* » est donnée par :

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{k} & si \quad |s| \leq \Phi \\ sign(s) & si \quad |s| > \Phi \end{cases} \quad (IV.17)$$

Qui peut être illustrée par la Figure (IV.11)

Figure IV.11 : Fonction de saturation « *sat* ».

IV.5.2 La proposition de Harshima

Dans celle-ci, la fonction signe est remplacée par une fonction de lissage appelée «cont». Dans ce cas la commande devient :

$$u = -k\text{cont}(s) \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{Tel que : } \text{cont}(s) = \begin{cases} \frac{s}{|s|+\delta} & \text{si } |s| \leq \Phi \text{ avec } \delta > 0 \\ \text{sign}(s) & \text{si } |s| > \Phi \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

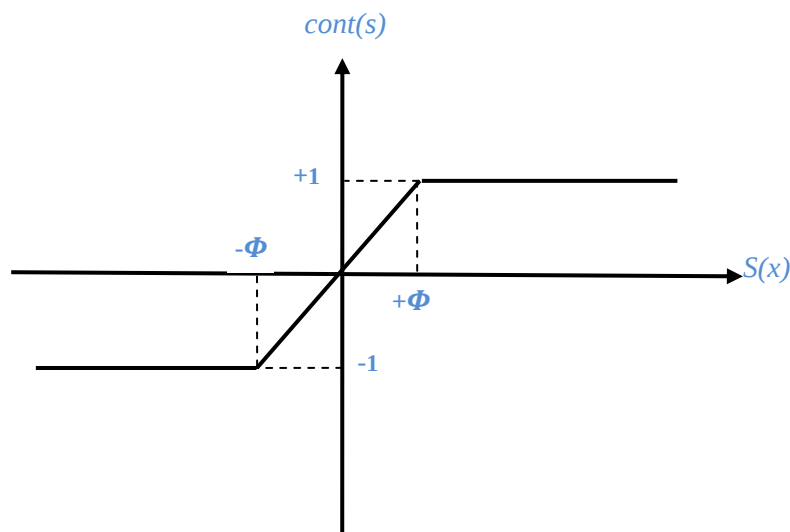


Figure IV.12 : Fonction de saturation « cont ».

IV.6 Domaine d'applications de la commande par mode glissant

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables: ou complètement ouvertes ou complètement fermées. Une autre application consiste à l'utilisation des onduleurs monophasés ou triphasés à pulsation pour l'alimentation des machines asynchrones ou synchrones [24].

Les entraînements électriques pour des machines ou des robots, entraînement qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur de réglage par mode glissant [31].

IV.7 Avantages de la commande par mode glissant

Cette commande présente les caractéristiques suivantes:

- Elle est robuste, rejetant la perturbation P.
- Il suffit de connaître une borne pour P, ce qui simplifié le réglage.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de V.
- On peut étendre la technique à des surfaces autres que des droites et de dimensions quelconques.

IV.8 Commande non linéaire par mode glissant

Ce travail présente une stratégie de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire robuste aux incertitudes du modèle. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques [31].

IV.8.1 Modèle de la GADA

Le modèle utilisé est le modèle a flux statorique oriente trouvé dans le chapitre (III) dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator et qui sera qualifié de modèle(d,q). Le modèle d'état est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = W_s \varphi_s = V_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.20)$$

IV.8.1.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (IV.21)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{M V_s} Q_s^{ref} \end{cases} \quad (IV.22)$$

IV.8.1.2 Relations de la dérivée de courants rotoriques

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \omega_s \cdot L_s \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (IV.23)$$

IV.8.2 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 ($r=1$), l'expression de la surface de contrôle de la puissance active et réactive pour forme :

$$S(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV.24)$$

$$S(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (IV.25)$$

IV.8.3 Conditions de convergence

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

$$\begin{cases} S(P) = 0 \\ S(Q) = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \frac{d}{dt} (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt} (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (IV.26)$$

Par conséquent pour une surface de glissement nulle $S(P, Q)$ la puissance active et réactive convergeant exponentiellement vers leurs références. Alors pour suivre P_s^{ref} et Q_s^{ref} , il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante. La réalisation d'un mode glissant est conditionnée par la vérification par la relation d'attractivité de Lyapounov $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$ et celle d'invariance. $\dot{S}(x) = 0$.

IV.8.4 Loi de commande par mode glissant

L'algorithme de commande est défini par la relation :

$$V_{rq} = V_{rq_Equi} + V_{rq_attr} \quad (IV.27)$$

$$V_{rd} = V_{rd_Equi} + V_{rd_attr} \quad (IV.28)$$

Avec :

V_{rq}, V_{rd} : Grandeur de commande.

V_{rq_Equi}, V_{rq_attr} : Grandeur de commande équivalente.

V_{rd_Equi}, V_{rd_attr} : Terme de commutation de commande.

IV.8.4.1 Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance on prend ($r = 1$), l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$S(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV.29)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (IV.30)$$

On tire l'expression du courant $\dot{I}_{rq}^{ref}$ et $\dot{I}_{rq}$:

$$\dot{S}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (IV.31)$$

$$\dot{S}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (IV.32)$$

$$\dot{S}(P) = -v_1 \cdot \text{sgn}(S(P)) \quad (IV.33)$$

$$-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) = -v_1 \text{sgn}(S(P)) \quad (IV.34)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} - \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \text{sgn}(S(P)) \quad (IV.35)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \text{sgn}(S(P)) \quad (IV.36)$$

$$\begin{cases} V_{rq_Equi} = -\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_S^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \\ V_{rq_attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \operatorname{sgn}(S(P)) \end{cases} \quad (IV.37)$$

IV.8.4.2 Contrôle de la puissance réactive

Pour contrôler la puissance on prend ($r = 1$), l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$S(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (IV.38)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{I}_{rd}^{ref} - \dot{I}_{rd}) \quad (IV.39)$$

On tire l'expression du courant $\dot{I}_{rd}^{ref}$ et $\dot{I}_{rd}$:

$$\dot{S}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (IV.40)$$

$$\dot{S}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (IV.41)$$

$$\dot{S}(Q) = -v_2 \cdot \operatorname{sgn}(S(Q)) \quad (IV.42)$$

$$\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) = -v_2 \cdot \operatorname{sgn}(S(Q)) \quad (IV.43)$$

$$V_{rd} = L_r \cdot \sigma \cdot \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) - (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \operatorname{sgn}(S(Q)) \quad (IV.44)$$

$$V_{rd} = L_r \cdot \sigma \cdot \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \operatorname{sgn}(S(Q)) \quad (IV.45)$$

$$\begin{cases} V_{rd_Equi} = L_r \cdot \sigma \cdot \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_S^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} \\ V_{rd_attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \operatorname{sgn}(S(Q)) \end{cases} \quad (IV.46)$$

Les équations (IV.37), (IV.46) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (IV.13).

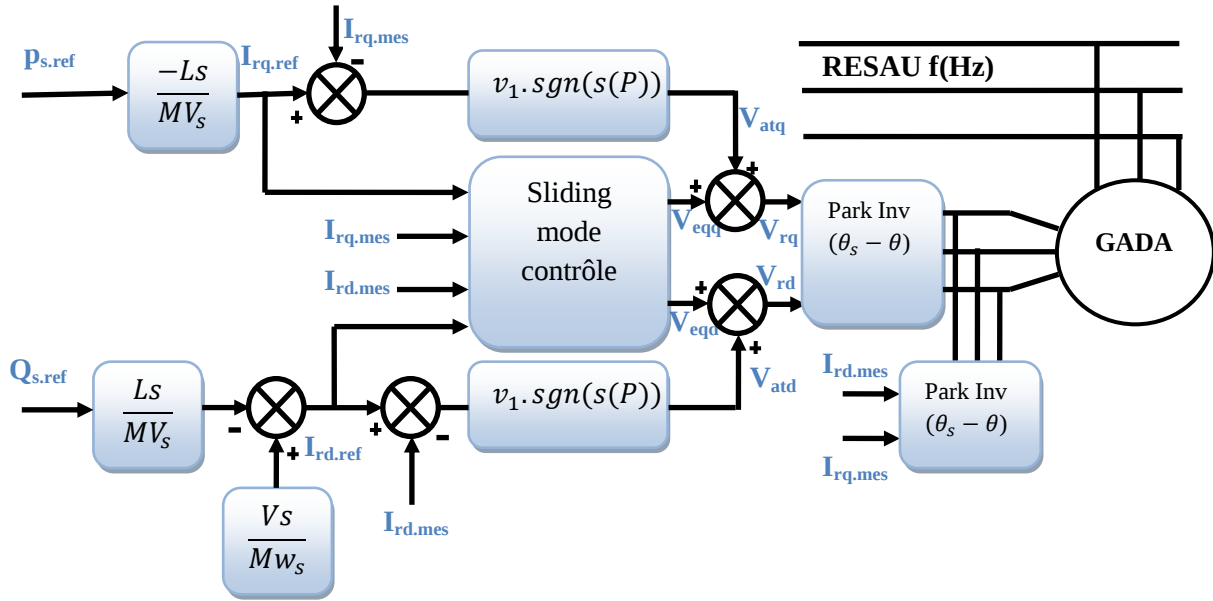


Figure IV.13 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

IV.8.5 Résultats de Simulation numérique du système sans turbine

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande par mode glissant des puissances actives et réactives statorique appliquée à la MADA.

- démarrage à vide.
- Machine entraînée à une vitesse fixe 1440 tr/min.
- Entre les instants $t = 1s$ et $t = 3s$: échelon négatif pour la puissance active (P_{sref} passe de 0 à -3000 W).
- Entre les instants $t = 2s$ et $t = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR).

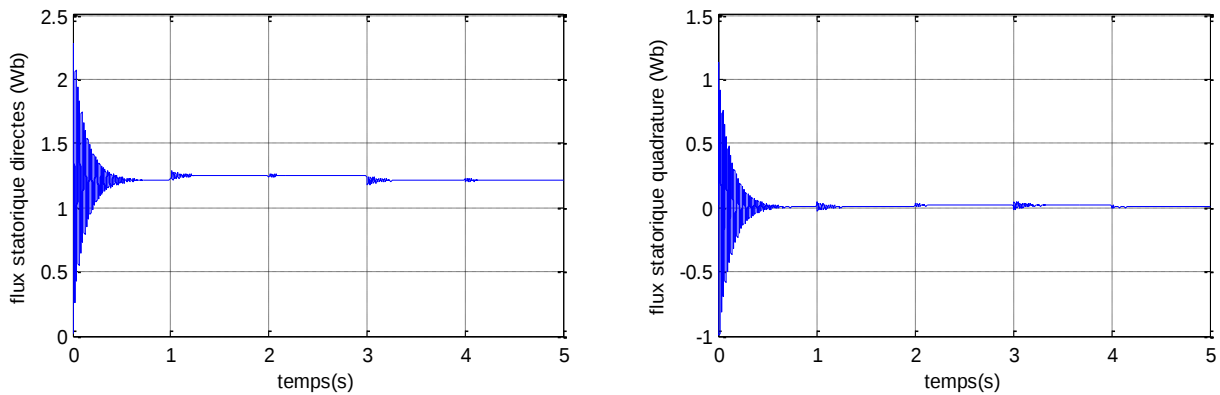


Figure IV.14 : Les composantes du flux statorique.

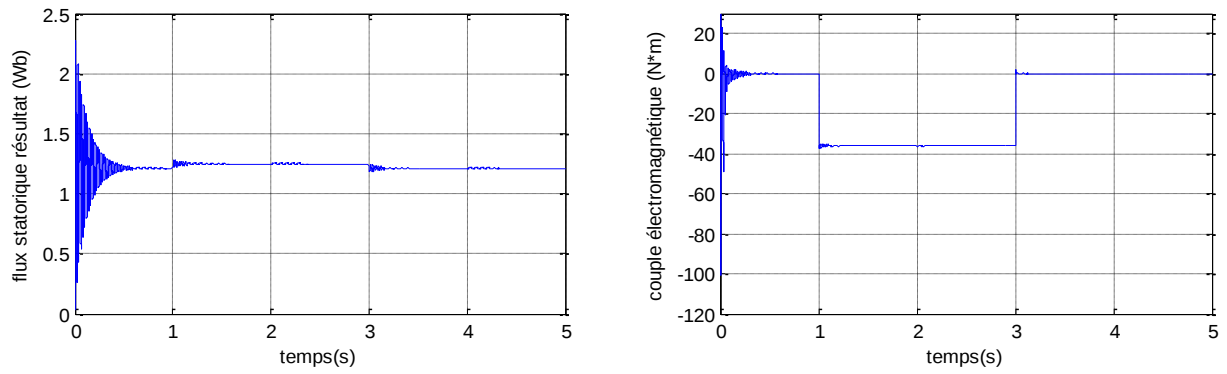


Figure IV.15 : Le flux statorique résultant et le couple électromagnétique.

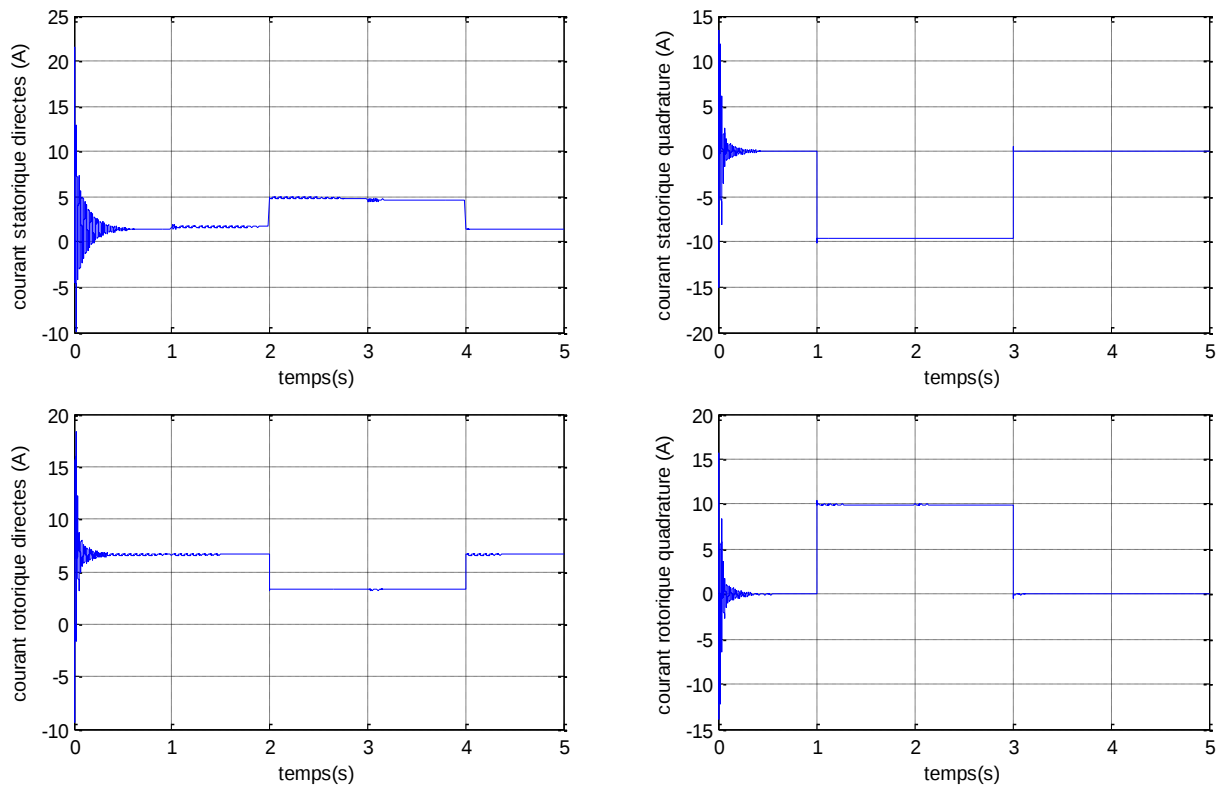


Figure IV.16 : Les composantes du courant statoriques et rotorique.

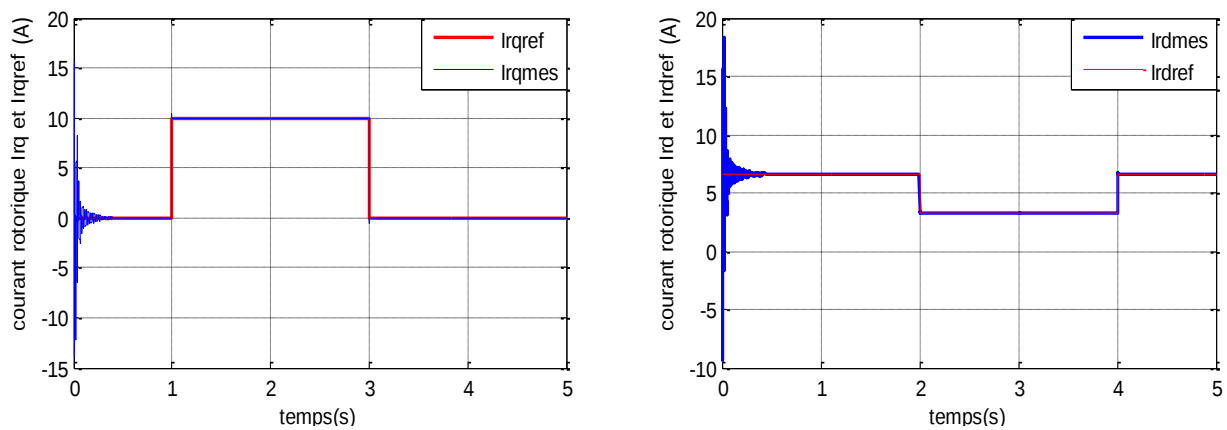


Figure IV.17 : les composantes du courant rotorique.

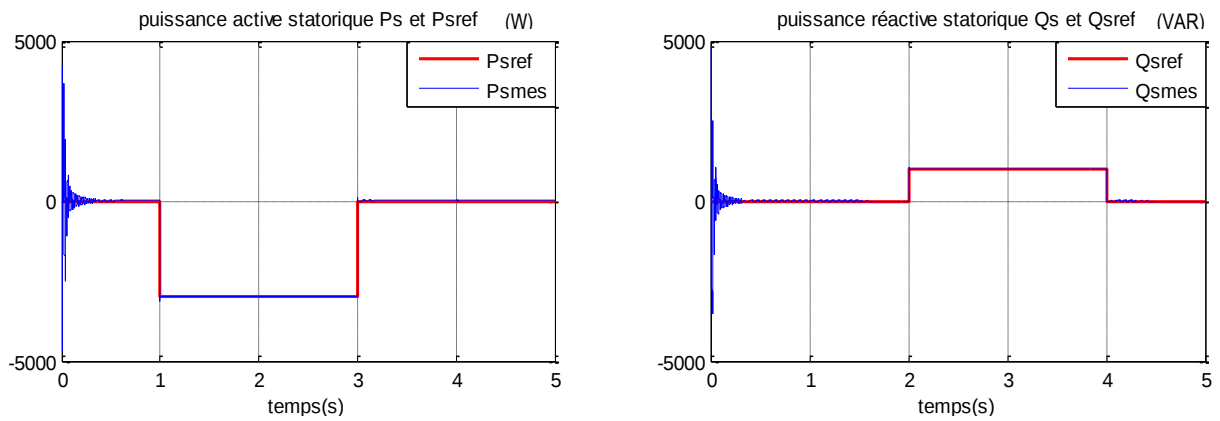


Figure IV.18 : La puissance active et réactive statorique.

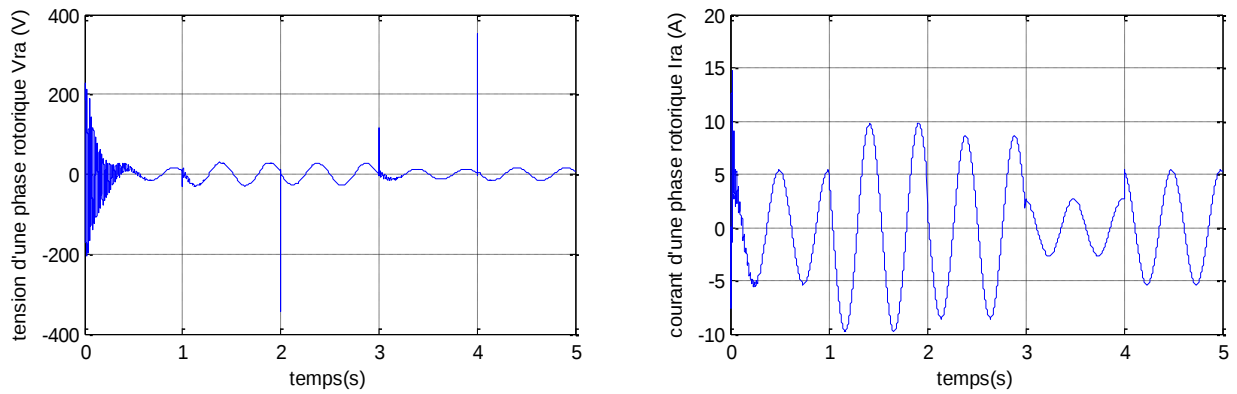


Figure IV.19 : tension et courant d'une phase rotoriques.

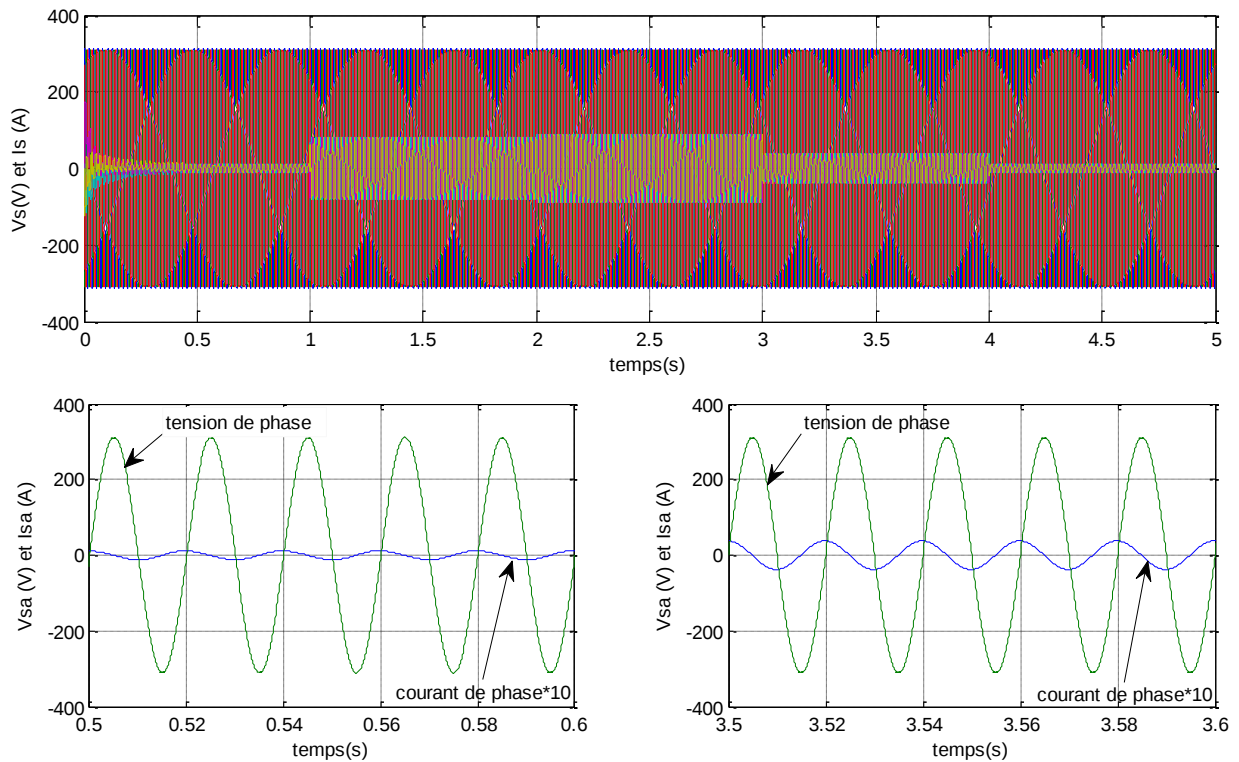


Figure IV.20 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les différents instants.

IV.8.6 Résultats de Simulation du système avec turbine

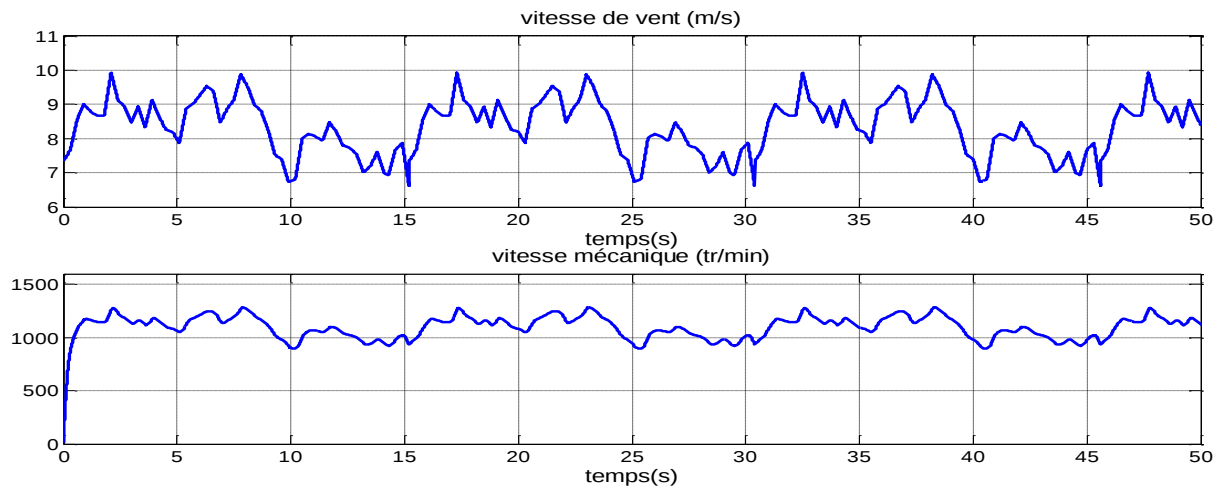


Figure IV.21 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.

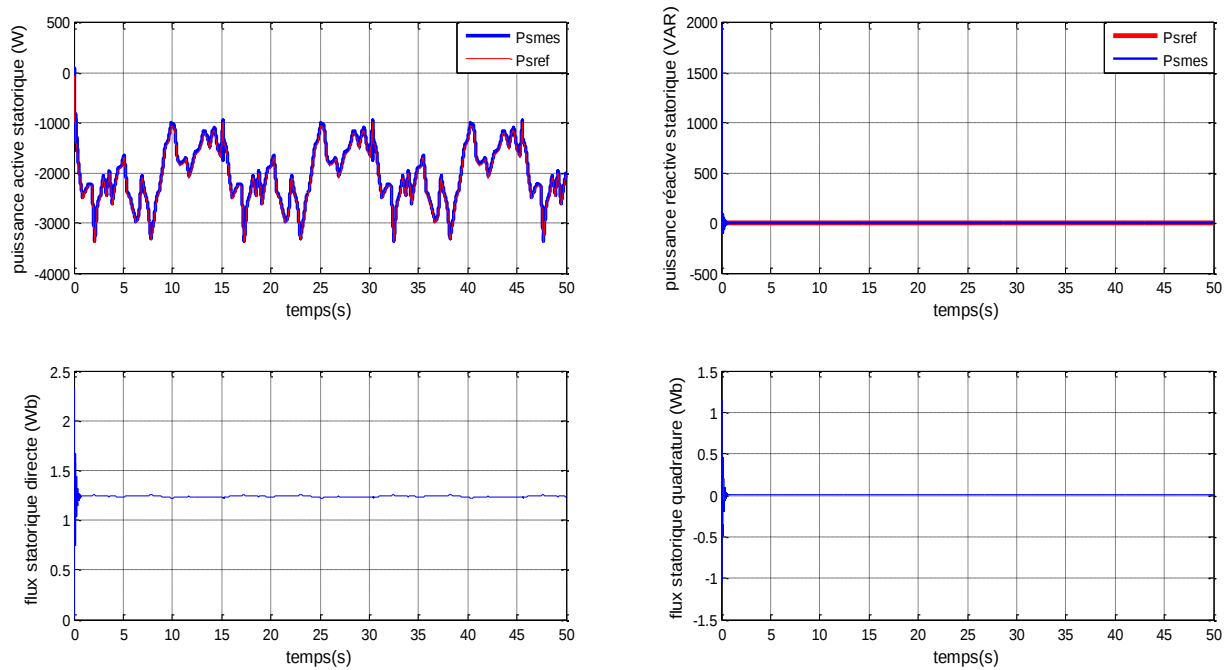


Figure IV.22 : La pissance active et réactive et flux statorique.

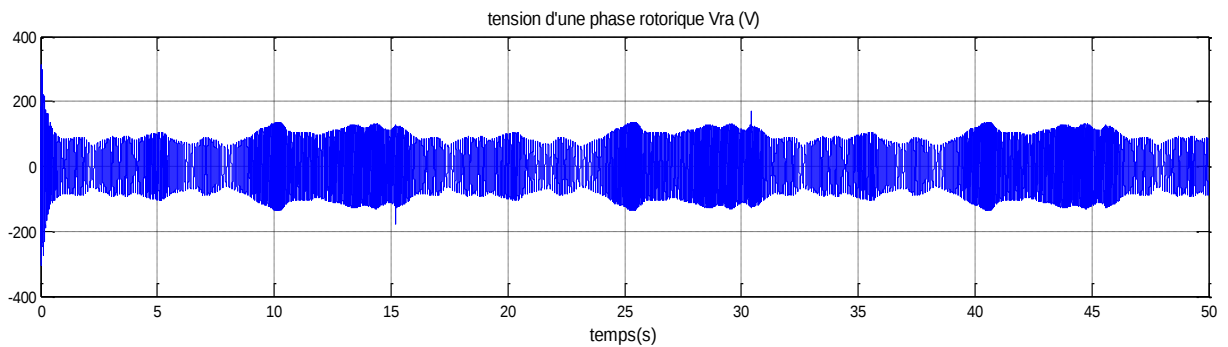


Figure IV.23 : La tension d'une phase rotorique Vra (V).

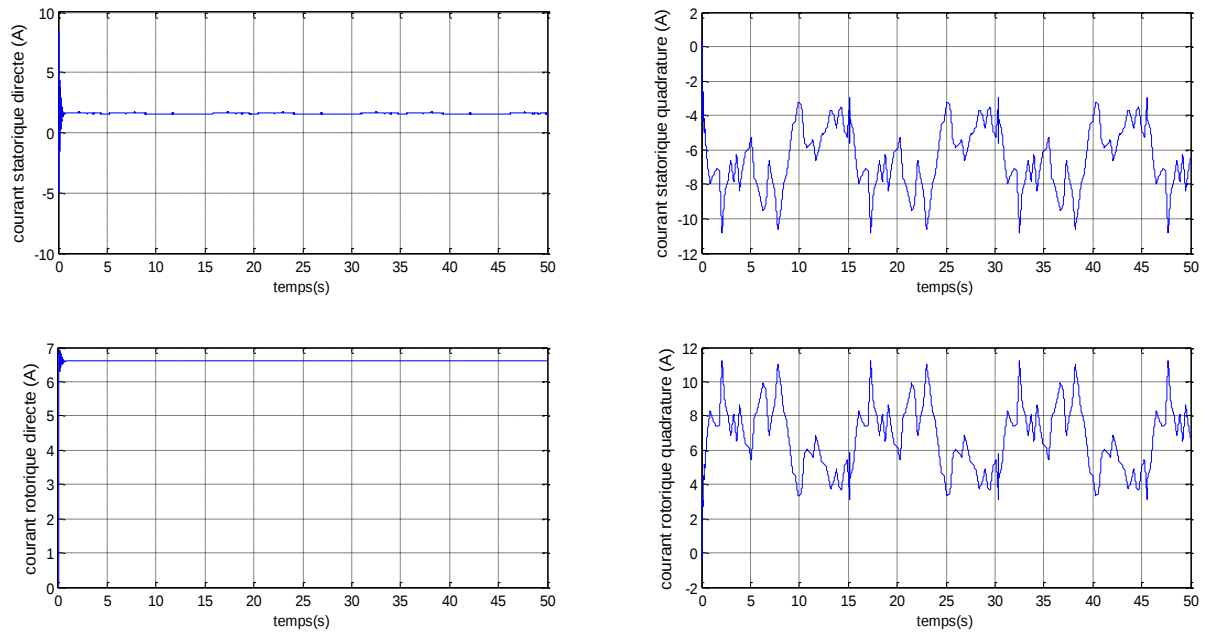


Figure IV.24 : Les courants rotoriques et statoriques (d,q) (A) .

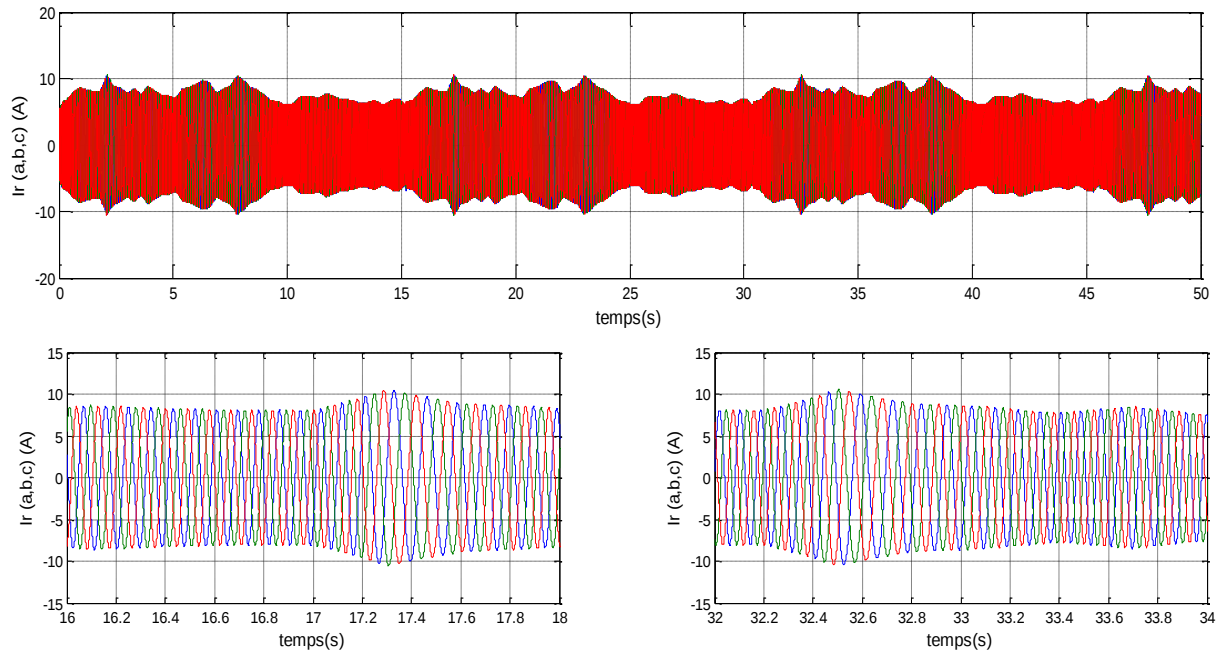


Figure IV.25 : Les composantes du courant rotorique avec un zoom entre les différents instants.

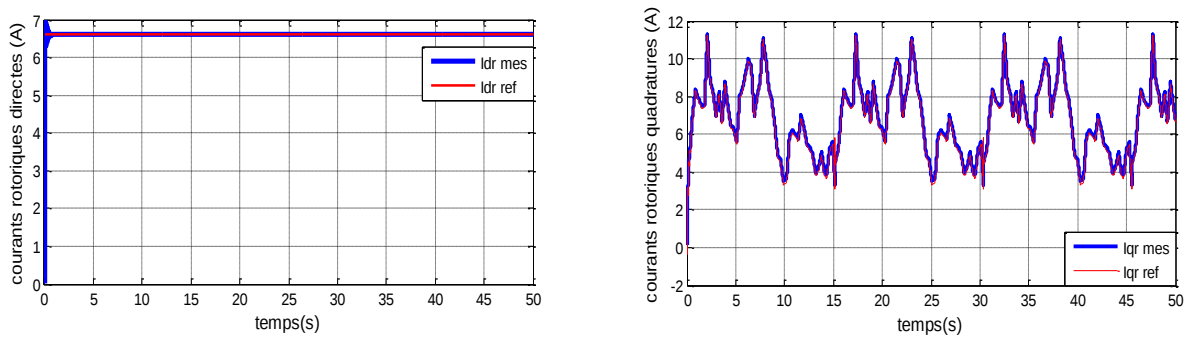


Figure IV.26 : Les composantes du courants rotoriques (d,q) (A).

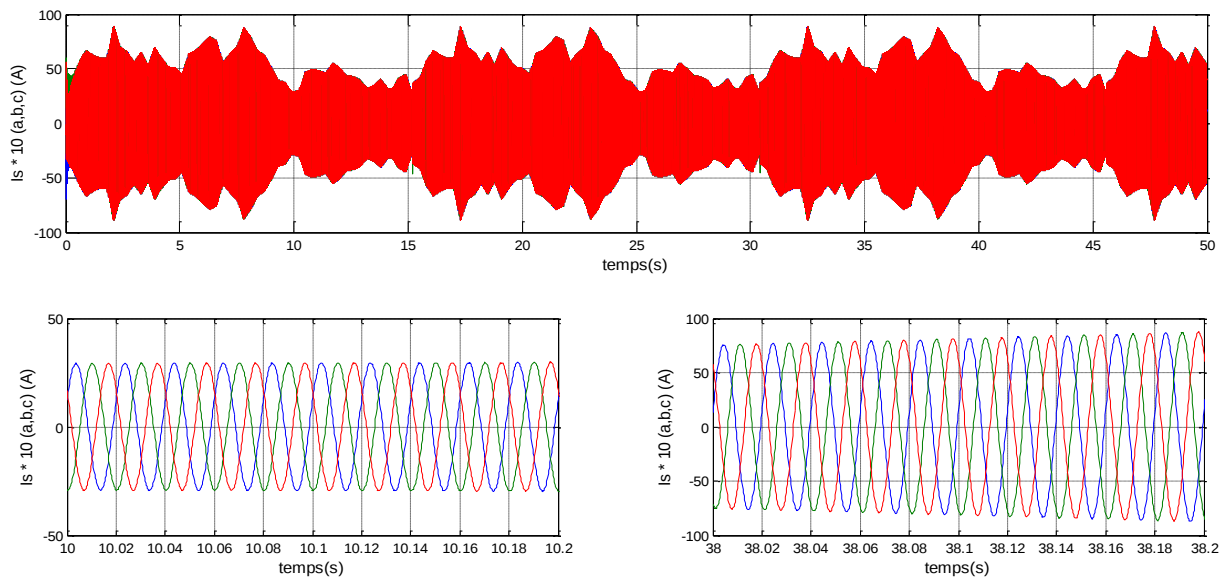


Figure IV.27 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

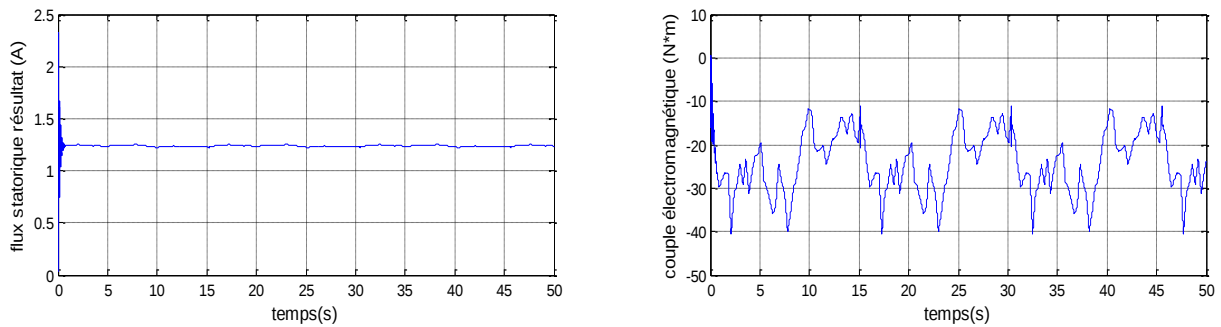


Figure IV.28 : Le flux statorique résultant et le couple électromagnétique.

IV.8.7 Schéma synoptique du système global

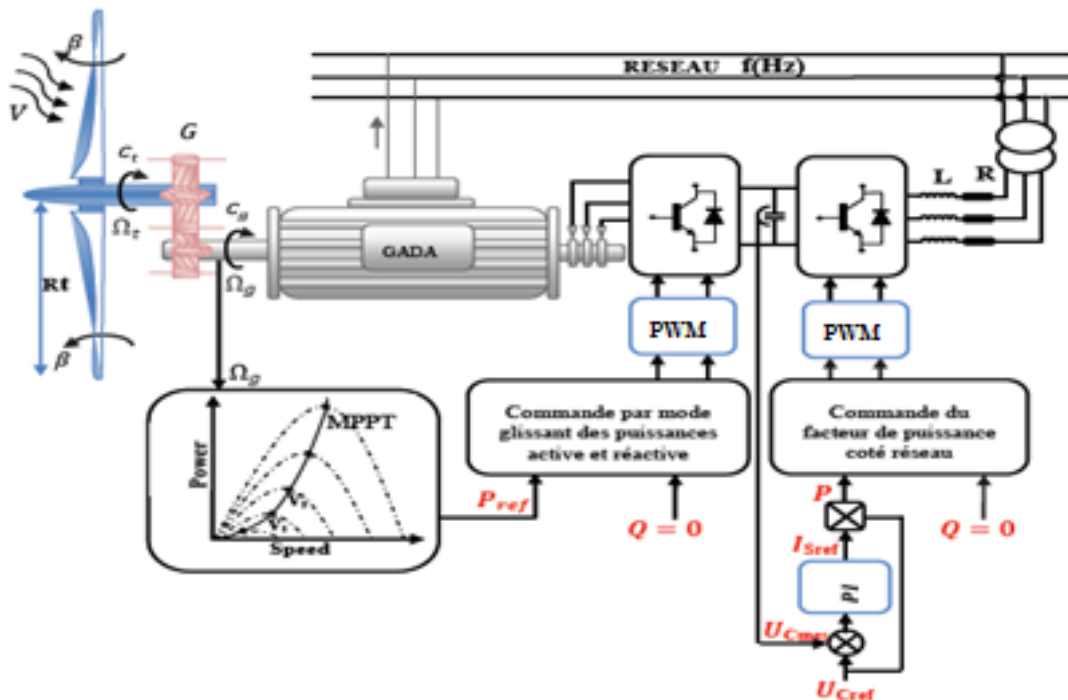


Figure IV.29 : Schéma synoptique du système (convertisseur et GADA et turbine).

IV.8.8 Résultats de Simulation du système avec convertisseur et avec turbine

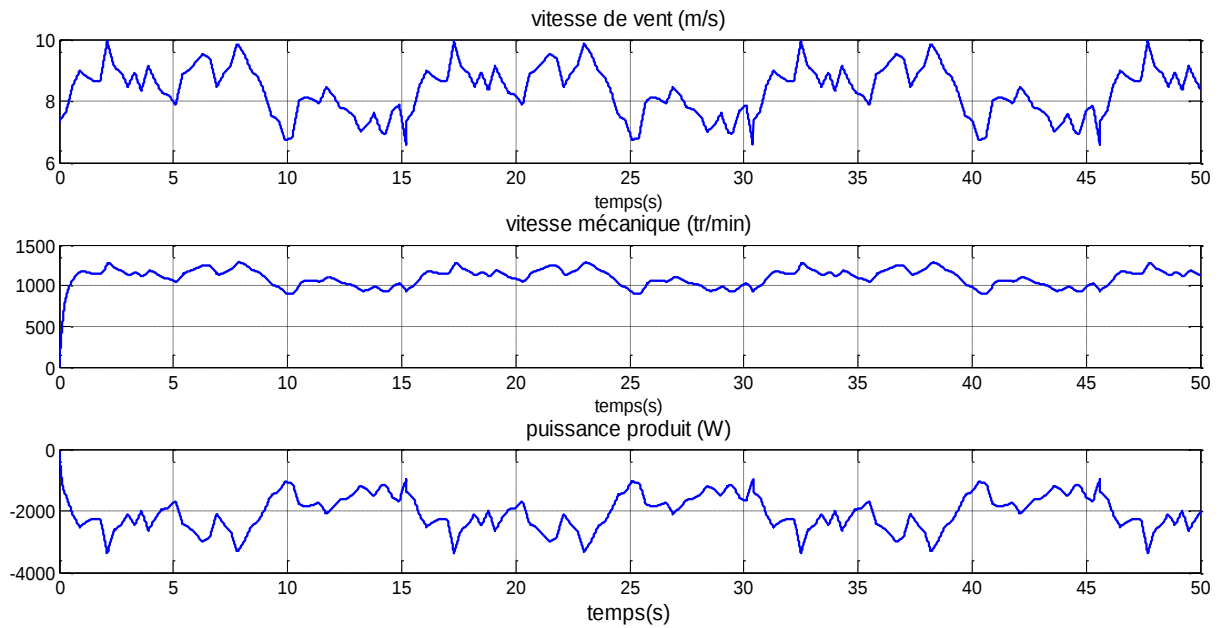


Figure IV.30 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique et la puissance de turbine (produit).

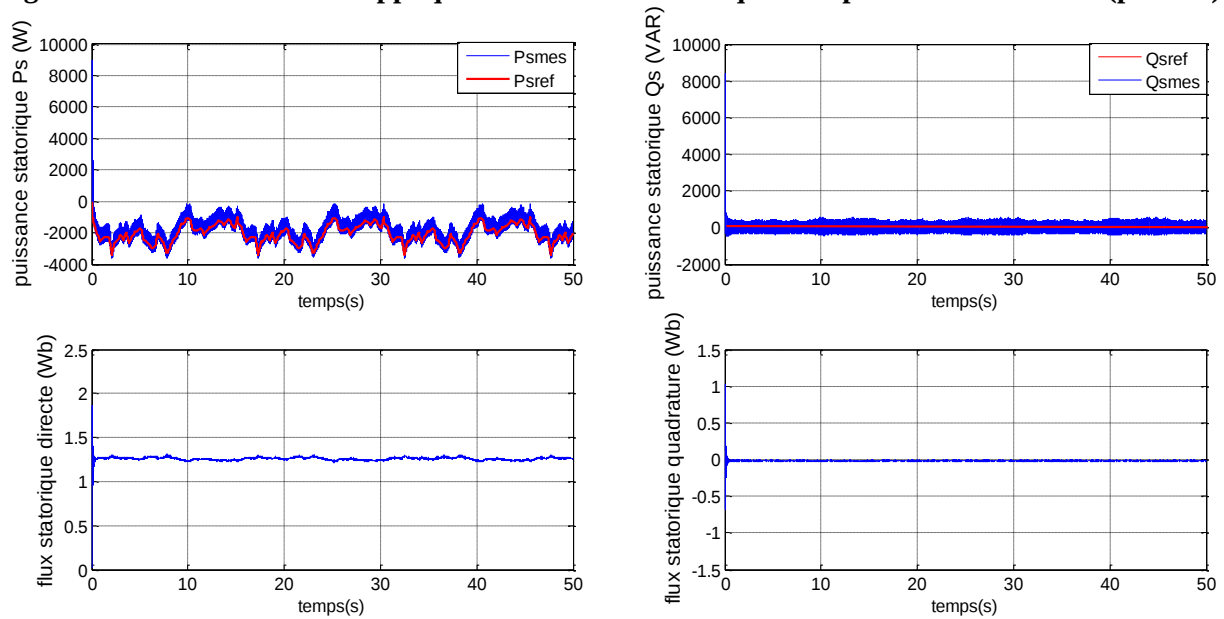


Figure IV.31 : La puissance active et réactive statorique et les composantes de flux.

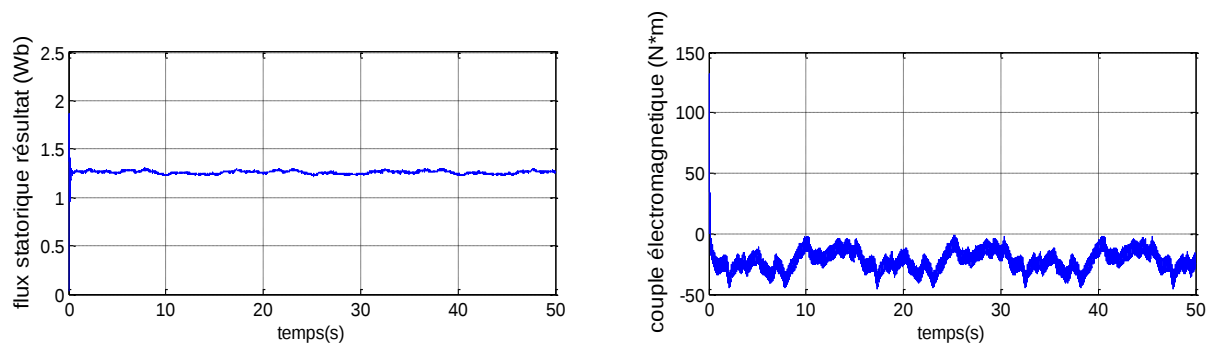


Figure IV.32 : le flux statorique résultat et le couple électromagnétique.

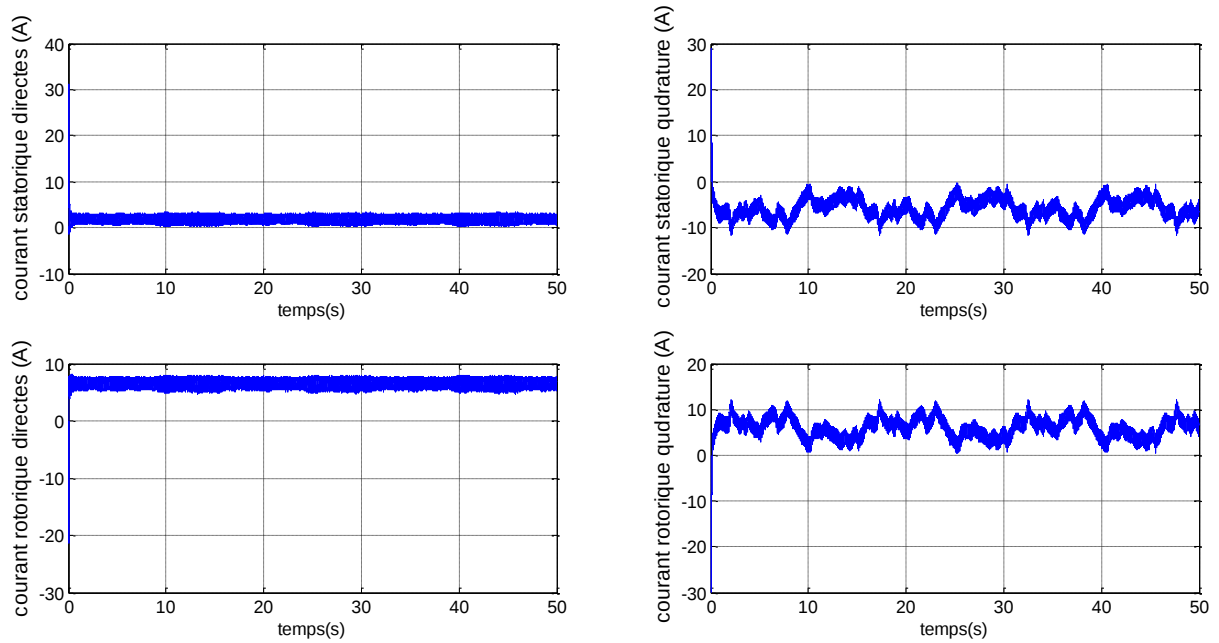


Figure IV.33 : Les composantes du courant statoriques rotoriques.

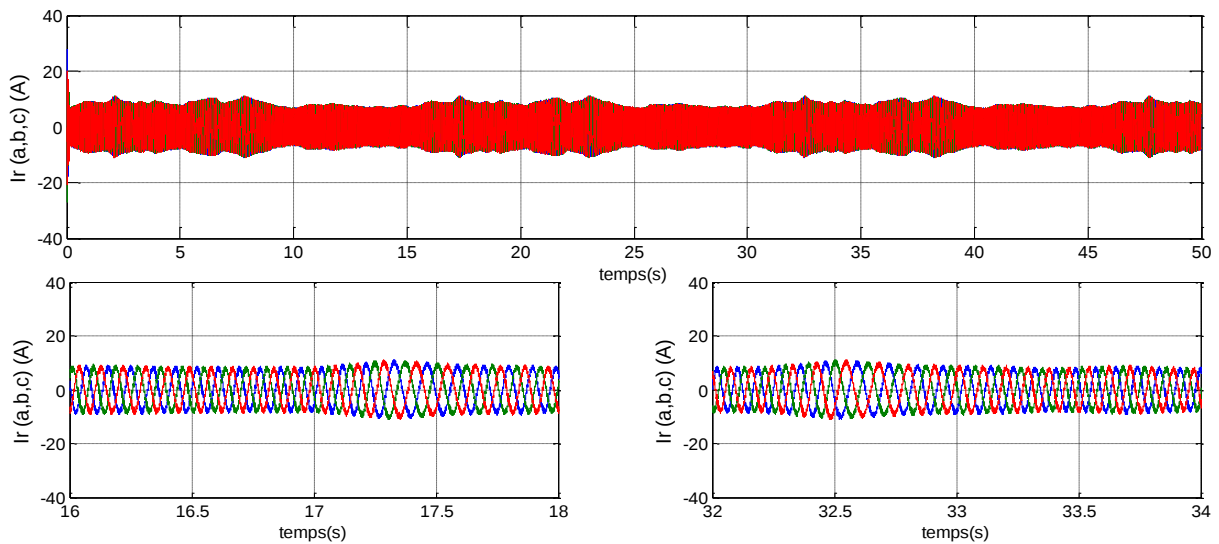


Figure IV.34 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.

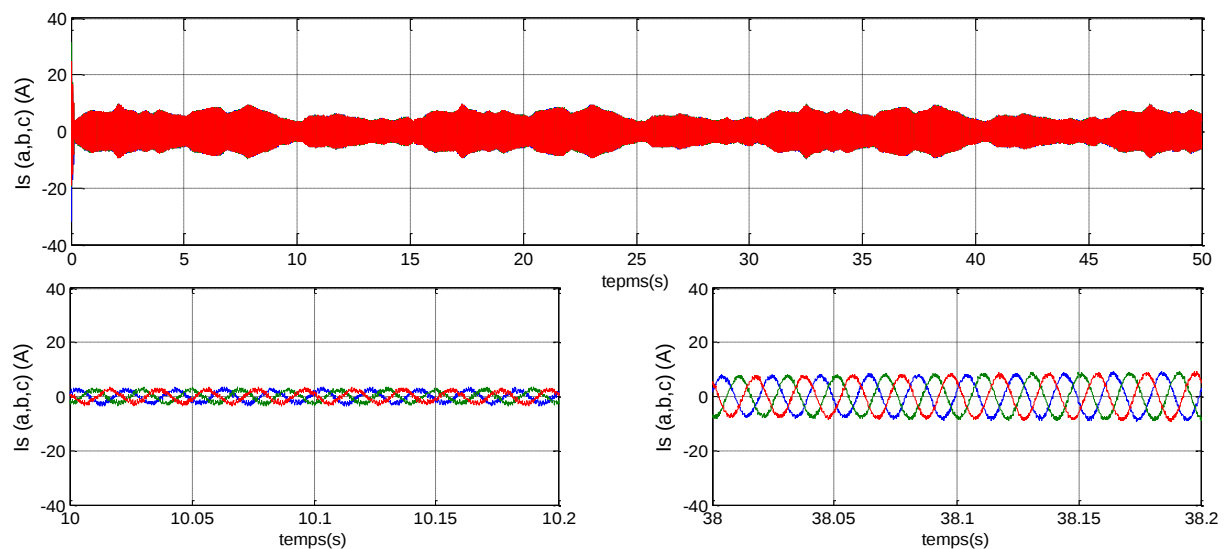


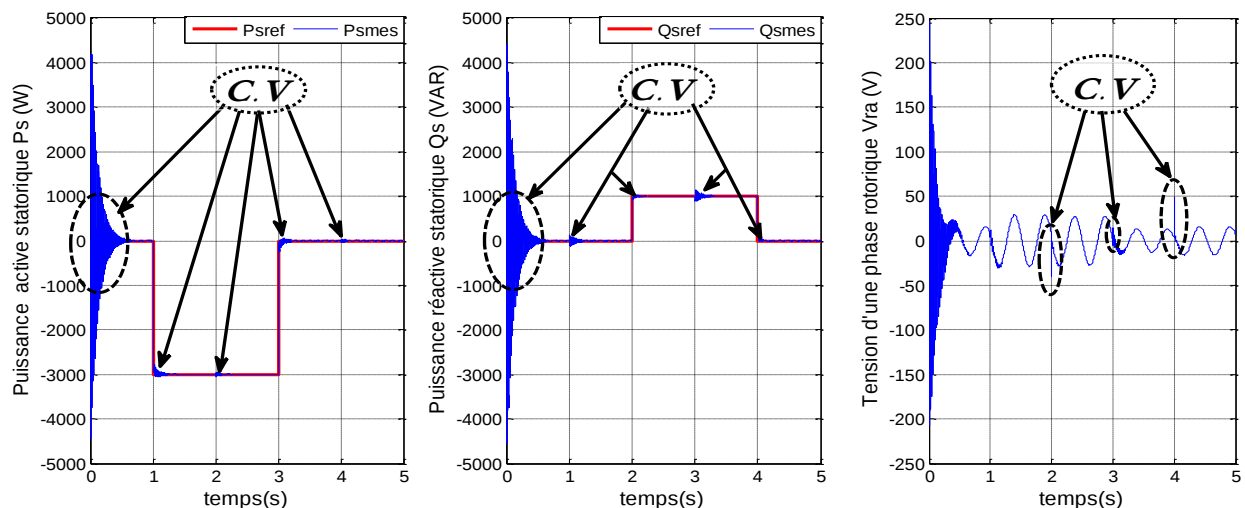
Figure IV.35 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

IV.8.9 Interprétation des résultats

Pour illustrer les performances de commande du RMG (Régulateur par Mode Glissant) appliqué à une GADA, un bloc diagramme du système est proposé dans la figure 29. Il est simulé les réponses en puissances, générées à des consignes ; les figure ci-dessus montre la réponse avec le régulateur par mode glissant (RMG). La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine, on remarque que Les puissances active et réactive poursuivent parfaitement les variables désirées. En commande par mode glissant les réponses sont sans dépassement, rapide en régime transitoire et l'erreur statique tend vers zéro. Dans notre cas, le réglage des puissances active et réactive par mode glissant apporte une amélioration remarquable par rapport aux régulateurs classiques PI. Cette technique a permis d'obtenir un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique.

IV.9 Etude comparative entre les techniques de commande proposées

Les résultats obtenus dans les chapitres trois et quatre par simulation numérique de la génératrice asynchrone à double alimentation dans une chaîne de production d'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent, nous permettent d'effectuer une comparaison entre la commande vectorielle (C.V) et la commande par mode de glissement (C.M.G) pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Les figure (IV.36 et IV.37) représentent respectivement les résultats de simulation d'obtenus pour la variation de la puissance active et réactive avec vitesse constant et l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux(système global).



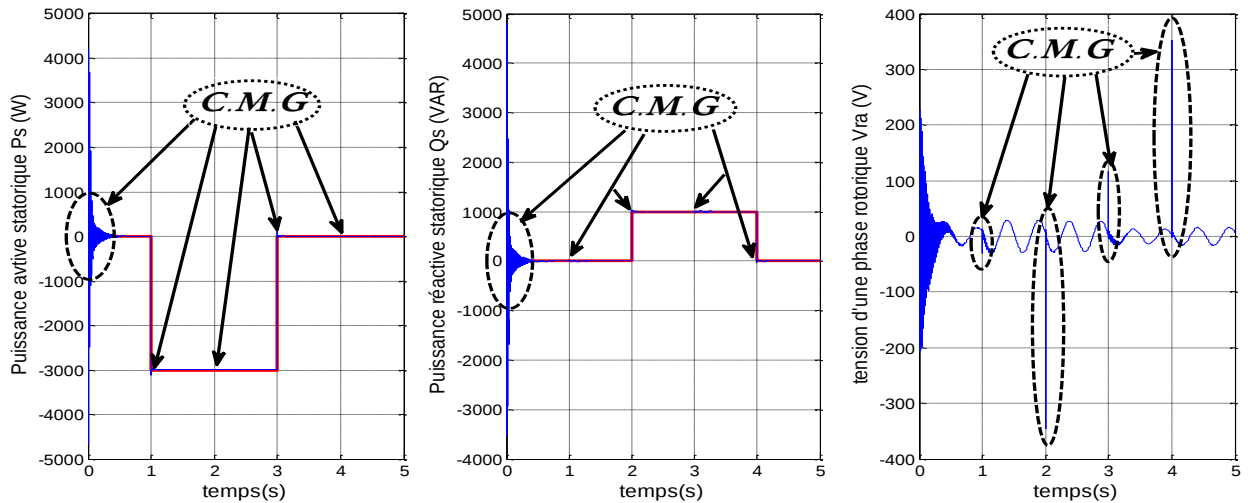


Figure IV.36 : La puissance active et réactive statorique et la tension d'une phase rotorique.

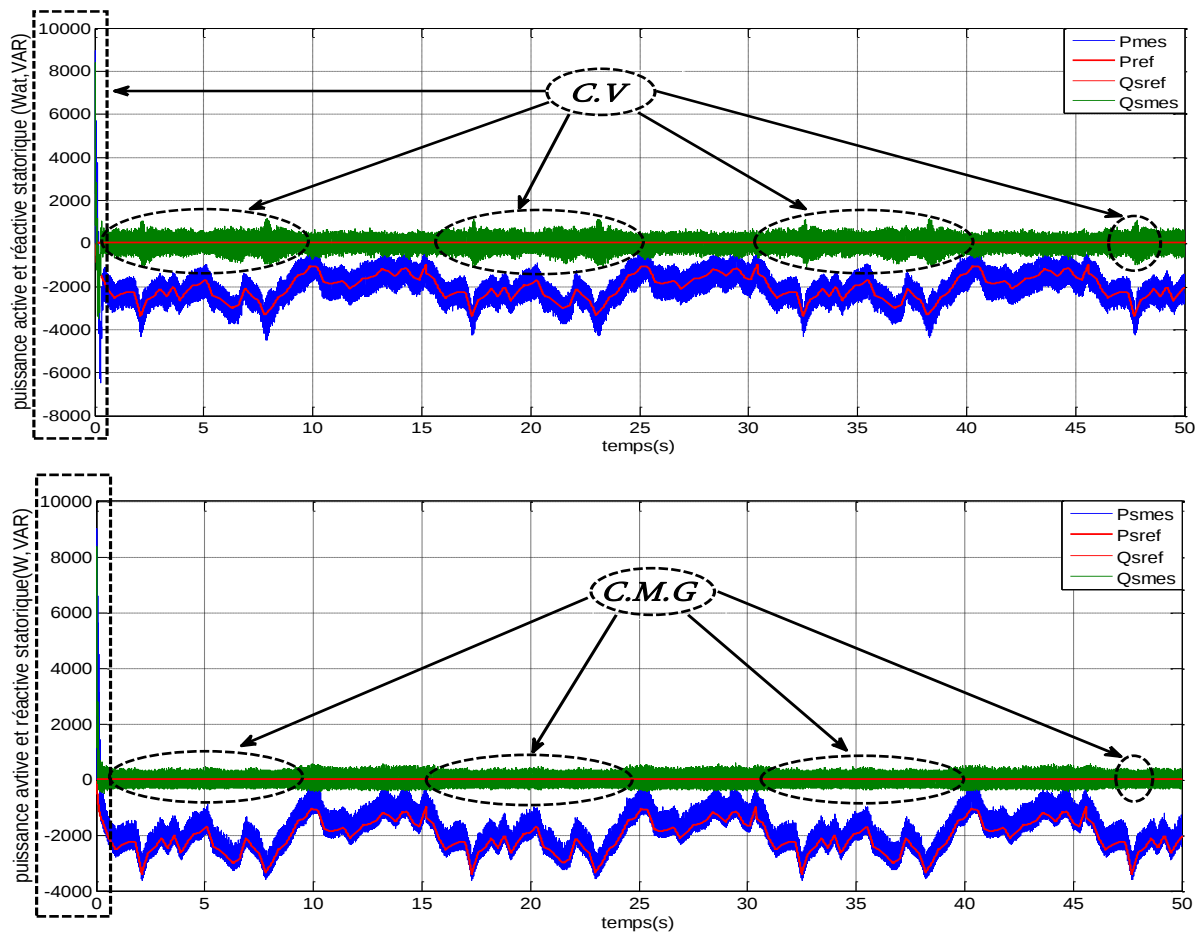


Figure IV.37 : La puissance active et réactive statorique.

Les résultats obtenus montrent que les performances de poursuite de la puissance active et réactive sont satisfaisantes pour les deux types de commande, mais ceux de la commande par mode glissant obtenus sont meilleures, comme il est apporté sur le tableau (IV.1).

Comparaison P/P aux Type de commande	temps de réponse	Régime transitoire au démarrage (dépassements)	Sensibilité aux variation des consignes (variation des puissances active et réactive)
Commande vectorielle (Régulateur PI)	faible	une perturbation importante	Sensible
Commande par Mode Glissant	plus faible	une perturbation plus faible	insensible

Tableau IV.1 : Critères de comparaison entre la commande vectorielle et la commande par mode glissant.

Finalement on peut conclure que le réglage par mode de glissement présente des meilleures performances (robuste) que celles de la commande vectorielle.

IV.10 Conclusion

Ce chapitre est un rappel de la théorie des systèmes à structure variable et des modes glissants. La commande par mode glissant a été synthétisée pour le fonctionnement des systèmes non-linéaires afin que les paramètres incertains et variables ne puissent pas influencer la robustesse de cette technique. Par ailleurs, on peut choisir plusieurs formes de la surface de glissement.

Dans cet travail, il a été présenté la commande d'un système de récupération de l'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Dans un premier temps, un modèle de la génératrice a été proposé. Ensuite, une stratégie de commande par mode glissant de la génératrice asynchrone permettant un contrôle indépendant des puissances a été proposé.

Les régulateurs des puissances actives et réactives par mode glissant ont été proposés. Nous avons présenté dans ce dernier chapitre, une étude comparative des résultats obtenus par les deux commandes (commande vectorielle par orientation de flux statorique et la commande par mode de glissement).

Les résultats de simulation nous ont permis de juger les qualités de la commande à base du RMG associé à une commande adoucie. A travers les caractéristiques de réponse, on observe des bonnes performances (c'est-à-dire qu'elle est robuste donc elle augmente la fiabilité, elle améliore le rendement énergétique) même en présence des variations de consignes. La poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre sont assurés. De plus, ce réglage présente un algorithme de commande robuste très simple et qui a l'avantage d'être facilement implantable dans une commande par calculateur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs suivants :

- Assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne.
- Amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique.

Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, nous avons étudié chaque partie du système dans un chapitre séparé.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques notions sur l'énergie éolienne ainsi que son actualité et la théorie associée à ce domaine. Ensuite, les différentes structures utilisées pour la conversion électromécanique ont été décrites. Et ensuite nous nous sommes intéressés à l'étude de la partie mécanique et à sa commande. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle simplifié de la turbine a été élaboré. Après avoir identifié les différentes zones de fonctionnement du système et définir l'objectif pour chaque zone, nous avons développé deux techniques de maximisation et de limitation de la puissance extraite. Les résultats de simulation des deux algorithmes ont montré l'efficacité du contrôle que se soit pour la poursuite du point de fonctionnement optimale ou pour la limitation de la vitesse de rotation et de la puissance convertie par action sur l'angle de calage des pales. Parmi lesquelles figure le système étudié à base d'une machine asynchrone à double alimentation qui a été détaillée dans le chapitre suivant.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons développée la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK. Une étude comparative entre les deux types de fonctionnement Moteur et Générateur a été faite et ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée pour un fonctionnement générateur que moteur.

La génératrice asynchrone été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le **troisième chapitre** est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en fonction des grandeurs

rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives statoriques a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue supposé parfaite. Or cela n'est vrai en pratique que dans le cas des installations de faible puissance qui utilisent des batteries. Pour cela, on a proposé l'asservissement d'un redresseur MLI à deux niveaux comme dispositif pour générer la source de tension pour l'alimentation de l'onduleur à deux niveaux.

Dans ce sens, nous avons poursuivi cette investigation en testant une méthodologie de commande robuste liée aux systèmes à structures variables, dont le but est de palier les inconvénients des commandes classiques. La commande par mode glissant est, par nature, une commande non linéaire et sa loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Ce contrôle est caractérisé par sa robustesse vis à vis des perturbations externes et internes. La surface de glissement est déterminée en fonction des performances désirées, tandis que la loi de commande est choisie dans le but d'assurer les conditions de convergence et de glissement c'est à dire, l'attractivité et l'invariance des surfaces de commutation.

Enfin, nous avons étudié l'application du mode glissant de la MADA présente une stratégie de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire robuste aux incertitudes du modèle. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques. Les performances obtenues avec la commande par mode glissant sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leur référence désirée.

- **Perspective :**

- L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique flou, réseaux de neurones, mode glissant...etc.
- L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la MADA.
- Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SAKI Ali et BELAIDI Mourad, « Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne » mémoire d'ingénieur d'état, polytechnique. juin 2006.
- [2] TOUAL Belkacem , « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Mémoire de Magister, Université de Batna .17/10/2010.
- [3] GOUDJIL Djamal , AIT Samir, « Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire d'ingénieur d'état, Université de Bejaia 2007.
- [4] DEHOUM Fawzi, « Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état, université de m'sila 2010/2011.
- [5] AIT RAMDANE Naima, « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double Alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou. 03/07/2012.
- [6] BOUHEDDA ALI,« Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne » Mémoire de Magister , Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou.07/07/2011.
- [7] GHENNAM Tarak, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat, par l'école centrale de Lille et l'école militaire polytechnique d'Alger. 29/09/2011.
- [8] HAMZAOUI Ihssen, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique 20/01/2008.
- [9] POITIERS Frédéric, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ».Thèse de Doctorat ,Université de Nantes.19 décembre 2003.
- [10] KHETACHE Laid, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée» Mémoire de Magister, Université de Batna 2007.
- [11] Site Internet, <httpwww.gwec.net>.
- [12] YACINE Abderrahmane Bencherif, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique 2008.
- [13] ABBAS Mourad et MECHENTEL Mohamed « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne » mémoire d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique 2006.
- [14] SAID Drid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation ». Thèse doctorat, l'Université de Batna, Algérie 2005.
- [15] RACHID Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux » Mémoire de Magister, Université de université de Boumerdes 2008.
- [16] NAOUEL Hamdi, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine .24 /01/2008.
- [17] MEKHICHE Youcef , « L'optimisation de puissance des éoliennes à vitesse variable » Mémoire de Master, université de M'sila. 2011/2012.

- [18] ARMAND Boyette « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de Doctorat de l'Université de Henri Poincaré Nancy .11décembre 2006.
- [19] MERRAHI Farid, « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique 2007.
- [20] DENDOUGA Abdelhakim, « Commande par mode glissant de la machine à double alimentation alimentée par un onduleur de tension » Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [21] ROUABHI Riyadh , « Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne» Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif 2012.
- [22] METATLA Samir «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA» Mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2009.
- [23] KECHICH Abderrahmane et all, « La commande par mode glissant : Application à la machine synchrone à aimants permanents », Afrique SCIENCE, 04(1) (2008), Pages 21 – 37.
- [24] KHEBBACHE Hicham, « Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires », Mémoire de Magistère , Université Ferhat Abbas-Sétif 2011.
- [25] Zeghad Hemza et all, « commande à structure variable d'un moteur a commutation électrique », mémoire d'ingénieur d'état, Université de m'sila. 2009 / 2010.
- [26] MAYOUF Messoud « Contribution à la modélisation de l'aerogenerateur synchrone a aimants permanents » Mémoire de Magister, Université de Biskra 2008.
- [27] HOCINE, « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, Mai 2008.
- [28] CHATCHANA Yuenyong,« A fast series active filter using sliding mode control to correct and regulate unbalance voltage in three-phase system »American J. of Engineering and Applied Sciences 2 (2): 393-398, 2009.
- [29] MANDALEK Hanna,« Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation », Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure. Université de Québec, 2003.
- [30] BregeaultTVincent, « Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants », Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes. 3 Décembre 2010.
- [31] ADJOUDJA Mouhamed et all « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne » Université Djillali Liabes sidi bel abbes, Algérie 22000 Revue « Nature et Technologie ». n° 02/Janvier 2010. Pages 27 à 34.
- [32] KECHICH* Abderrahmane et MAZARI** Benyounes « La commande par mode glissant : Application à la machine synchrone à aimants permanents (approche linéaire) » Afrique SCIENCE 04(1) (2008) 21 – 37 ISSN 1813-548X.
- [33] R.Ouiguiini*, R.Bouزيد** et Y.Sellami*** « Une commande robuste par mode glissant flou Appliquée à la poursuite de trajectoire d'un robot mobile non holonome » Laboratoire de Robotique et d'intelligence artificielle, CDTA. Haouch Oukil BP N°17, BABA HASSEN, Alger, Algérie** Institut d'électronique, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie CISTEMA'2003.

ANNEXES

1. Les paramètres de la machine à induction double alimentée

Valeurs nominales :

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

Paramètre

Résistance du stator	: $R_s = 1.2\Omega$
Résistance du rotor	: $R_r = 1.8\Omega$
Inductance stator	: $L_s = 0.1554\text{H}$
Inductance du rotor	: $L_r = 0.1568\text{H}$
Inductance Mutuelle	: $M = 0.15\text{H}$

Constantes mécaniques

Moment d'inertie	: 0.2 Kg.m^2
Coefficient de frottement	: 0.001 N.m.s/rd

2. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

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

3. Paramètres du filtre :

Résistance du filtre	: $R_f = 0.25\Omega$
Inductance du filtre	: $L_f = 0.005\text{H}$

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

$$C = 4400\text{ }\mu\text{F}$$

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DU L'OBTENSION
DU DIBLÔME MASTER EN GENIE ÉLECTRIQUE
SPECIALITÉ : AUTOMATIQUE**

PROPOSÉ ET DIRIGÉ PAR : M^{me}. BELOUNIS Ouassila

M^r. ROUBHI Riyadh

PRESENTÉ PAR : MEZERZI Imad

Thème :

**Contribution à la modélisation et la commande
d'une éolienne à base d'une génératrice
asynchrone à double alimentation**

Résumé :

Ce travail a pour objectif l'étude d'une génératrice éolienne asynchrone à double alimentation. Après avoir présenté un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de machines utilisées, nous avons opté pour l'utilisation la machine asynchrone à double alimentation à travers une alimentation constituée par deux convertisseurs statiques triphasés à MLI deux niveaux. La modélisation dans le repère de Park de cette machine a été présentée que nous avons simulé en utilisant MATLAB, ainsi que sa commande vectorielle, et en fin on présentée une stratégie de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne.

Mots clés

Machine asynchrone à double alimentation « MADA », Turbine éolienne, Modélisation, Commande vectorielle, Convertisseur AC/AC « Redresseur MLI à deux niveaux - Onduleur MLI à deux niveaux », mode glissant.

N° d'ordre : 073