

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF

UFAS (ALGERIE)

Faculté de Technologie

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique

Pour obtenir le diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option :

Commande électrique

Présenté par :

M^r : ROUABHI Riyadh

Thème

Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

Application : Energie éolienne

Soutenu publiquement le / / 2012 devant le jury composé de :

Dr. RADJELI Hammoud	M.C	Université de Sétif	Président
Dr. SAIT Belkacem	M.C	Université de Sétif	Rapporteur
Dr. HACHEMI Mabrouk	M.C	Université de Sétif	Examineur
Dr. KHAMLICHE Mabrouk	M.C	Université de Sétif	Examineur



Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude. je adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de L'université de SETIF, notamment à mon promoteur Mr. SAIT Belkacem, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Cette page ne serait être complète sans remercier mes meilleurs collègues et frères : M. Touil, M. Bourezg, H. Zouglache, B. Blaissag, I. Amroune, A. Mehachi, sans leurs soutiens je n'aurais sûrement pas pu mener à bien ce mémoire.

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

Mes vives salutations.



SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES SYMBOLES	III
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.	
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE	5
I.2.1 Historique de l'énergie éolienne	5
I.2.2 L'aérogénérateur.....	6
I.2.3 Les différents types d'éoliennes	7
I.2.4 Production d'une éolienne	10
I.2.5 L'énergie éolienne en quelques chiffres	11
I.2.6 Nécessité de stockage	11
I.2.7 Avantages et Inconvénients	13
I.3 CONVERSION D'ENERGIE CINETIQUE DU VENT EN ENERGIE MECANIQUE.....	14
I.3.1 Loi de BETZ.....	14
I.3.2 Utilité de la vitesse variable.....	17
I.4 MODELISATION ET STRATEGIE DE COMMANDE D'UNE TURBINE A VITESSE VARIABLE	18
I.4.1 MODELISATION DE LA TURBINE	18
I.4.1.1 Source primaire : le vent	18
I.4.1.2 La conversion aérodynamique.....	19
I.4.1.3 Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$	20
I.4.1.4 L'équation dynamique de la turbine.....	21
I.4.1.5 Modélisation du système d'orientation des pales	23
I.4.2 STRATEGIE DE COMMANDE DE LA TURBINE	29
I.4.2.1 La commande en dessous de la puissance nominale	24
I.4.2.2 Caractéristique de puissance.....	24
I.4.2.3 Commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale	25
I.4.2.3.1 Principe de la MPPT.....	26
I.4.2.3.2 Commande indirecte de vitesse (en dessous de la puissance nominale).....	26
I.4.2.4 Résultats de simulation	28
I.4.2.5 Interprétations des résultats	29
I.5 CONVERSION DE L'ENERGIE MECANIQUE EN ENERGIE ELECTRIQUE	29
I.5.1 Génératrices utilisées pour la production de l'énergie électrique	29
I.5.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe	29
I.5.1.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	30
I.6 APERÇU SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE	31
I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	31
I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	31
I.7 CONCLUSION	33

CHAPITRE II : MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.

II.1	INTRODUCTION	34
II.2	STRUCTURE DE LA MADA	34
II.2.1	MADA à rotor bobiné	34
II.2.2	MADA sans balais	35
II.2.3	MADA en cascade	35
II.3	MODE DE FONCTIONNEMENT	36
II.3.1	Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	36
II.3.2	Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	36
II.3.3	Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone	37
II.3.4	Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone	38
II.4	APERÇU SUR LES CONFIGURATIONS DE LA MADA A ROTOR BOBINE	38
II.4.1	Configuration pour application moteur	38
II.4.1.1	Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur	39
II.4.1.2	Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur	39
II.4.1.3	MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants	40
II.4.2	Configuration pour application génératrice	40
II.4.2.1	MADA à énergie rotorique dissipée	41
II.4.2.2	Structure de Kramer	42
II.4.2.3	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	42
II.4.2.4	Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	43
II.5	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA	44
II.5.1	Avantages de la MADA	45
II.5.2	Inconvénients de la MADA	46
II.6	APPLICATION DES MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION	46
II.6.1	Application moteur	46
II.6.2	Application génératrice	46
II.7	MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	47
II.7.1	Hypothèses simplificatrices	47
II.7.2	Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA	48
II.7.3	Modèle de la MADA dans le plan (dq)	49
II.7.3.1	La Transformation de Park	49
II.7.3.2	Application de la transformation de Park	50
II.7.4	Mise sous forme d'équation d'état	51
II.8	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME	52
II.8.1	Résultats de simulation pour le fonctionnement moteur (MADA)	52
II.8.2	Interprétation des résultats	53
II.8.3	Résultats de simulation pour le fonctionnement générateur (GADA)	54
II.8.4	Interprétation des résultats	56
II.9	CONCLUSION	56

CHAPITRE III : : COMMANDE VECTORIELLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

III.1	INTRODUCTION	57
III.2	PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA	57
III.3	MODELE DE LA GADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE	58
III.3.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé	58
III.3.2	Relation entre le courant statorique et le courant rotorique	59
III.3.3	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	59
III.3.4	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	60
III.3.5	Type de régulateurs utilisés	61
III.3.6	Résultats de simulation numérique du système sans turbine	62
III.3.7	Interprétation des résultats	64
III.3.8	Résultats de simulation numérique du système avec turbine	64
III.3.9	Interprétation des résultats	66
III.4	COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA AVEC UN ONDULEUR A DEUX NIVEAUX	67
III.4.1	Modélisation de l'onduleur à deux niveaux	67
III.4.2	Commande par modulation de largeur d'impulsion	69
III.4.3	Résultats de simulation numérique du système sans turbine	69
III.4.4	Interprétation des résultats	71
III.4.5	Schéma synoptique du système	72
III.4.6	Résultats de simulation numérique du système avec turbine	72
III.4.7	Interprétation des résultats	74
III.5	COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA AVEC UN CONVERTISSEUR A DEUX NIVEAUX	74
III.5.1	Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI	75
III.5.2	Modélisation du redresseur à MLI	75
III.5.2.1	La source d'alimentation	76
III.5.2.2	L'étage Convertisseur	77
III.5.2.3	La charge	77
III.5.3	Régulation en cascade du redresseur à MLI dans le repère (d,q)	78
III.5.3.1	Modélisation dans le repère (d,q)	78
III.5.3.2	Résultats de simulation	80
III.5.3.3	Interprétation des résultats	80
III.5.4	Résultats de simulation numérique du système sans turbine	81
III.5.5	Interprétation des résultats	82
III.5.6	Schéma synoptique du système	83
III.5.7	Résultats de simulation numérique du système avec turbine	83
III.5.8	Interprétation des résultats	85
III.6	CONCLUSION	86

CHAPITRE IV : COMMANDE PAR MODE GLISSANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE	
IV.1	INTRODUCTION 87
IV.2	INTRODUCTION AUX SYSTEMES DE REGLAGE A STRUCTURE VARIABLE 87
IV.2.1	Historique 87
IV.2.2	Objectif de la commande par mode glissant 88
IV.2.3	Principe 88
IV.3	DIFFERENTES STRUCTURES DU CONTROLE PAR MODE DE GLISSEMENT 88
IV.3.1	Structure par commutation au niveau de l'organe de commande 88
IV.3.2	Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état 89
IV.3.3	Structure de régulation avec ajout de la commande équivalente 90
IV.4	THEORIE DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT 90
IV.5	CONCEPTION DE L'ALGORITHME DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT 91
IV.5.1	Choix des surfaces de glissement 92
IV.5.2	Conditions d'existence et de convergence du régime glissant 93
IV.5.2.1	Approche directe..... 93
IV.5.2.2	Approche de Lyapunov 93
IV.5.2.3	Détermination de la loi de commande 94
IV.6	ELIMINATION DU PHENOMENE DU BROUITEMENT (CHATTERING) 96
IV.7	DOMAINE D'APPLICATION DU REGLAGE PAR MODE GLISSANT 97
IV.8	LES AVANTAGES DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT 98
IV.9	COMMANDE NON-LINEAIRE PAR MODE GLISSANT..... 98
IV.9.1	Modele de la GADA 98
IV.9.2	Choix des surfaces de glissements 99
IV.9.3	Loi de commande par mode glissant 100
IV.9.4	Résultats de simulation numérique du système sans onduleur et sans turbine 102
IV.9.5	Résultats de simulation numérique du système sans onduleur et avec turbine 104
IV.9.6	Interprétation des résultats..... 106
IV.9.7	Résultats de simulation numérique du système avec onduleur et sans turbine 106
IV.9.8	Résultats de simulation numérique du système avec onduleur et avec turbine 108
IV.9.9	Interprétation des résultats..... 110
IV.9.10	Résultats de simulation numérique du système avec convertisseur et sans turbine 110
IV.9.11	Schéma synoptique du système globale..... 112
IV.9.12	Résultats de simulation numérique du système avec convertisseur et avec turbine 112
IV.9.13	Interprétation des résultats..... 114
IV.10	ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE PROPOSEES..... 114
IV.11	CONCLUSION 117
CONCLUSION GENERALE 118	

BIBLIOGRAPHIE

ANNEX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GÉNÉRALE .

Figure IG-1 : Le classement mondial des pays producteur d'électricité par l'énergie éolienne.....	01
Figure IG-2 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol.....	02

CHAPITRE I : BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.

Figure I-1 : Correspondance taille & puissance des éoliennes	06
Figure I-2 : Structure de SAVONIUS	07
Figure I-3 : Structure de darrius	08
Figure I-4 : Aerogenerateur à axe horizontal	09
Figure I-5 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal	09
Figure I-6 : Niveau sonore d'une éolienne	13
Figure I-7 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne	14
Figure I-8 : Variations du coefficient de puissance	16
Figure I-9 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs	17
Figure I-10 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.....	17
Figure I-11 : Schema de la turbine éolienne	18
Figure I-12 : Profil du vent applique a la turbine	19
Figure I-13 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine	20
Figure I-14 : Modele de la turbine	21
Figure I-15 : Modele simplifie de la turbine.....	22
Figure I-16 : Schema bloc du modele de la turbine	23
Figure I-17 : Orientation des pales	23
Figure I-18 : Boucle de regulation de l'angle de calage des pales.....	24
Figure I-19 : Caracteristique ideale d'une éolienne a vitesse variable.....	25
Figure I-20 : Caracteristique couple-vitesse pour differentes vitesse de vent	26
Figure I-21 : Commande indirect de vitesse (ZoneI)	28
Figure I-22 : La vitesse du vent et mecanique et la puissance produit	28
Figure I-23 : Le coefficient de puissance et la vitesse specifique	28
Figure I-24 : Aerogénérateur à vitesse fixe	29
Figure I-25 : Aerogénérateur à vitesse variable	30
Figure I-26 : Alternateur dans une chaine de conversion éolienne	31
Figure I-27 : Machine asynchrone dans une chaine de conversion éolienne	32
Figure I-28 : MADA dans une chaine de conversion éolienne	33

CHAPITRE II : MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.

Figure II-1 : Schéma du rotor de la MADA a rotor bobine	34
Figure II-2 : Structure de la MADA sans balais	35
Figure II-3 : Structure en cascade de deux machines asynchrones	35
Figure II-4 : Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.	36

LISTE DES FIGURES

Figure II-5 : Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone .	37
Figure II-6: Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone .	37
Figure II-7 : Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone .	38
Figure II-8 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur .	39
Figure II-9 : Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur .	39
Figure II-10 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs .	40
Figure II-11 : MADA énergie rotorique dissipée .	41
Figure II-12 : Effet de la variation de la resistance rotorique sur le couple électromagnetique .	41
Figure II-13 : MADA a structure de kramer .	42
Figure II-14 : Structure de scherbius avec cycloconvertisseur .	42
Figure II-15 : Structure de scherbius avec convertisseurs MLI .	43
Figure II-16 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA .	44
Figure II-17 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la cage et la MADA.....	45
Figure II-18 : Représentation de la MADA dans les deux repères.	47
Figure II-19 : Vitesse de rotation et le couple electromagnetique.	52
Figure II-20 : Les composantes du flux statorique avec son resultant.....	52
Figure II-21 : Les composantes du courant statoriques .	53
Figure II-22 : Les composantes du courant rotoriques.	53
Figure II-23 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.	54
Figure II-24 : Les courants statoriques triphasees avec un zoom .	54
Figure II-25 : Les courants rotoriques triphasees avec un zoom.	54
Figure II-26 : Le couple electromagnetique et le flux .	55
Figure II-27 : La puissance active et reactive statorique .	55
Figure II-28 : La puissance active et reactive rotorique .	55
CHAPITRE III : COMMANDE VECTORIELLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE.	
Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle .	57
Figure III-2 : Schema bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA .	61
Figure III-3 : Les composantes du flux statorique avec son resultant .	62
Figure III-4 : Les composantes du courant rotoriques.	62
Figure III-5 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique .	63
Figure III-6 : La puissance active et reactive statorique et la tension d'une phase rotorique .	63
Figure III-7 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.	63
Figure III-8 : Profil du vent applique et la vitesse mecanique.....	65
Figure III-9 : La puissance active et reactive statorique.....	65
Figure III-10 : Les composantes du flux statorique avec son resultant.	65
Figure III-11 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	65
Figure III-12 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant .	66

LISTE DES FIGURES

Figure III-13 : Les composantes du courant rotoriques et la tension d'une phase rotorique	66
Figure III-14 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant.....	66
Figure III-15 : Schema simplifie de l'onduleur triphase a deux niveaux.	67
Figure III-16 : Les composantes du flux statorique avec son resultat.	70
Figure III-17 : Les composantes du courant rotoriques.....	70
Figure III-18 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	70
Figure III-19 : La puissance active et reactive statorique et le flux rotorique resultat.....	71
Figure III-20 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.....	71
Figure III-21 : Schema synoptique du systeme (Convertisseur & GADA & Turbine)	72
Figure III-22 : La puissance active et reactive statorique.....	72
Figure III-23 : Les composantes du flux statorique avec son resultat.	73
Figure III-24 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	73
Figure III-25 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant.	73
Figure III-26 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulee rotorique.....	73
Figure III-27 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant.....	74
Figure III-28 : Structure du redresseur a MLI.	76
Figure III-29 : Schema fonctionnel du redresseur a MLI.....	77
Figure III-30 : Schema bloc de la commande en cascade du redresseur a MLI.	79
Figure III-31 : Bloc de regulation des courants avec compensation de la tension reseau.	79
Figure III-32 : Boucles de regulation equivalentes des courants et de la tension.	79
Figure III-33 : Tension du bus continu avec un zoom.....	80
Figure III-34 : Courant et tension de ligne.	80
Figure III-35 : Les composantes du flux statorique avec son resultat.	81
Figure III-36 : Les composantes du courant rotoriques.....	81
Figure III-37 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	81
Figure III-38 : La puissance active et reactive statorique et flux rotorique resultat	82
Figure III-39 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.....	82
Figure III-40: Schema synoptique du systeme (Convertisseur & GADA & Turbine)	83
Figure III-41 : Profil du vent applique et la vitesse mecanique.....	83
Figure III-42 : La puissance active et reactive statorique.....	84
Figure III-43 : Les composantes du flux statorique avec son resultat.	84
Figure III-44 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	84
Figure III-45 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant.	84
Figure III-46 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulee rotorique.....	85
Figure III-47 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant.....	85

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE IV : COMMANDE PAR MODE GLISSANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE .

Figure IV-1 : Structure de regulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	89
Figure IV-2 : Structure de regulation par commutation au niveau de la contre reaction d'etat.....	89
Figure IV-3 : Structure de regulation par ajout de la commande equivalente	90
Figure IV-4 : Convergence du systeme glissant.....	90
Figure IV-5 : Glissement ideal	91
Figure IV-6 : Glissement real	91
Figure IV-7 : Linearisation exacte de l'ecart.....	93
Figure IV-8 : La valeur continue U_{eq} prise par la commande lors de la commutation entre U_{max} et U_{min}	94
Figure IV-9 : Fonction sign (non linearite tout ou rien)	95
Figure IV-10 : Phenomene de broutement.	96
Figure IV-11 : Fonction SAT avec un seuil et deux seuils (zone morte).....	96
Figure IV-12 : Fonction de classe c1 ($\varepsilon > 0$ et petit)	97
Figure IV-13 : Schema bloc de la structure de commande par mode glissant.....	102
Figure IV-14 : Les composantes du flux statorique avec son resultant.	102
Figure IV-15: Les composantes du courant rotoriques.....	103
Figure IV-16 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique	103
Figure IV-17 : La puissance active et reactive statorique et la tension d'une phase rotorique.....	103
Figure IV-18 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.....	104
Figure IV-19 : Profil du vent applique et la vitesse.....	104
Figure IV-20 : La puissance active et reactive statorique.....	104
Figure IV-21 : Les composantes du flux statorique avec son resultant	105
Figure IV-22 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.....	105
Figure IV-23 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant.	105
Figure IV-24 : Les composantes du courant rotoriques et la tension d'une phase rotorique.....	105
Figure IV-25 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant	106
Figure IV-26 : Les composantes du flux statorique avec son resultant.	106
Figure IV-27 : Les composantes du courant rotoriques.....	107
Figure IV-28 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.....	107
Figure IV-29 : La puissance active et reactive statorique et flux rotorique resultat	107
Figure IV-30 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.....	108
Figure IV-31 : La puissance active et reactive statorique.....	108
Figure IV-32 : Les composantes du flux statorique avec son resultant	108
Figure IV-33 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique	109
Figure IV-34 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant.	109

LISTE DES FIGURES

Figure IV-35 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulee rotorique	109
Figure IV-36 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant	109
Figure IV-37 : Les composantes du flux statorique avec son resultant.	110
Figure IV-38 : Les composantes du courant rotoriques.....	110
Figure IV-39 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique	111
Figure IV-40 : La puissance active et reactive statorique et flux rotorique resultat.	111
Figure IV-41 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les defirent instant.....	111
Figure IV-42 : Schema synoptique du systeme (Convertisseur & GADA & Turbine).	112
Figure IV-43 : La puissance active et reactive statorique.....	112
Figure IV-44 : Les composantes du flux statorique avec son resultant	113
Figure IV-45 : Les composantes du courant statoriques et le couple electromagnetique.	113
Figure IV-46 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les defirent instant.	113
Figure IV-47 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulee rotorique.	113
Figure IV-48 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les defirent instant.	114
Figure IV-49 : La puissance active et reactive statorique et la tension d'une phase rotorique	115
Figure IV-50 : La puissance active et reactive statorique.....	115
Figure IV-51 : La puissance active et reactive statorique.....	116
Figure AN-52 : Schema bloc d'un systeme regle par un PI	126

LISTE DES SYMBOLES

<i>MADA</i>	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
<i>GADA</i>	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation
<i>DFIG</i>	: Double Fed Induction Generator
<i>MAS</i>	: Machine Asynchrone
<i>MLI</i>	: modulation de largeur d'impulsion
<i>PWM</i>	: Pulse-width modulation
<i>f_r</i>	: Fréquence des grandeurs rotorique
<i>f_s</i>	: Fréquence des grandeurs statorique
<i>f_e</i>	: Fréquence de la porteuse
<i>a, b, c</i>	: Indice correspondants aux trois phases a, b, c
<i>max, min</i>	: Valeur maximale (minimale)
<i>C.V</i>	: Commande vectorielle
<i>SCSV</i>	: Système de commande à structure variable
<i>C. M. G</i>	: Commande par mode glissant
<i>s, r</i>	: Indice du stator, du rotor
<i>d, q</i>	: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature
<i>R_s, R_r</i>	: Résistance statorique, rotorique
<i>L_s, L_r</i>	: Inductance propre statorique, rotorique
<i>σ</i>	: Coefficient de dispersion
<i>S</i>	: La surface de glissement
<i>T_r, T_s</i>	: Constant de temps rotorique (statorique)
<i>M_{sr}</i>	: Inductance mutuelle stator- rotor
<i>M_{rs}</i>	: Inductance mutuelle rotor - stator
<i>M_s</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
<i>M_r</i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
<i>Φ_s, Φ_r</i>	: Respectivement flux statorique et rotorique
<i>Φ_{sd}, Φ_{sq}</i>	: Les flux statoriques direct et en quadrature
<i>Φ_{rd}, Φ_{rq}</i>	: Les flux rotoriques direct et en quadrature
<i>I_s, I_r</i>	: Les courants de phase statorique et rotorique
<i>I_{sd}, I_{sq}</i>	: Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>I_{rd}, I_{rq}</i>	: Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>V_s, V_r</i>	: Tension simple respectivement statorique et rotorique
<i>V_{sd}, V_{sq}</i>	: La tension statorique directe et en quadrature
<i>V_{rd}, V_{rq}</i>	: La tension rotorique directe et en quadrature
<i>θ_s, θ_r</i>	: Angle électrique statorique, rotorique
<i>W_s, W_r</i>	: Pulsation statorique, rotorique
<i>W_m</i>	: Pulsation mécanique
<i>P</i>	: Nombre de paire de pole
<i>g</i>	: Glissement
<i>P_e</i>	: Puissance d'entrée

LISTE DES SYMBOLES

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
$C_{T_{opt}}$: Le couple optimal de la turbine
$C_{g_{opt}}$: 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
PLL	: Phase Locked Loop

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 20% [MUL 08]. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi à l'épuisement des ressources non renouvelables (combustibles fossiles et Uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des énergies renouvelables pour la production d'électricité.

Les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires pour satisfaire la demande toujours croissante de l'énergie électrique. Cette source d'énergie présente un facteur de charge record, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement des déchets et le réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

De ce fait, l'énergie éolienne apparaît en bonne place parmi les autres formes d'énergie renouvelable, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas des Etats Unis, première mondial avec une puissance éolienne installée de 35,15 GW, l'Allemagne, numéro deux mondialement et le premier dans l'Union Européen avec 25,77 GW et l'Espagne avec 19,4 GW à la fin de l'année 2009. Sans oublier la Chine avec une capacité de production qui atteint les 25,10 GW seulement en quelques années après avoir adopté à l'investissement dans ce domaine [ZAR 11]. Un classement mondial des pays producteur d'électricité par l'énergie éolienne est présenté par le diagramme de la figure(IG1).

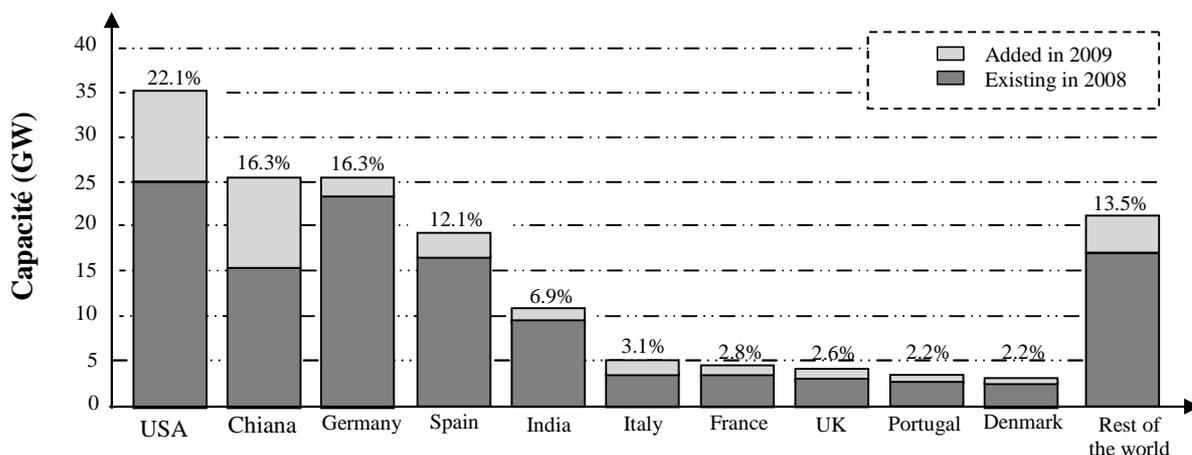


Figure IG.1 : Le classement mondial des pays producteur d'électricité par l'énergie éolienne [ZAR 11]

Quant à notre pays, il dispose d'un potentiel considérable en énergie renouvelable techniquement exploitable. Les études faites sur ce sujet affirment la rentabilité de certains gisements tout en présentant un ensemble d'avantages précieux :

- les énergies renouvelables constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du grand sud.
- Elles permettent aussi un développement durable avec un impact limité sur l'environnement contribuant à la préservation de nos ressources fossiles [MER 08].
- En ce qui concerne l'énergie éolienne en Algérie, la figure (IG.2) suivante montre que le régime de vent modéré (*de 2 à 6 m/s*) convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara.

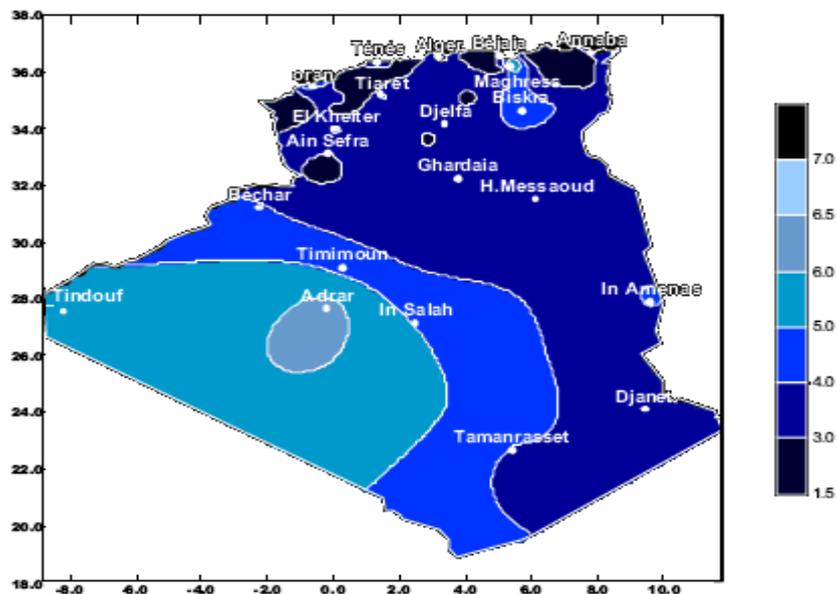


Figure IG.2 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [MER 08]

Le potentiel énergétique est énorme sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s. C'est pour cela que plusieurs éoliennes sont installées actuellement à Adrar [BEN 07]. L'énergie éolienne reste l'une des solutions les plus prometteuses des énergies renouvelables à développer avec l'énergie solaire en Algérie pour la production de l'électricité dans les sites isolés.

Dans le domaine éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de celui-ci. Son circuit statorique est connecté

directement au réseau électrique, tandis que son circuit rotorique est relié au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est faible, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit par rapport à une éolienne à vitesse variable alimentée par le stator. 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 de la génératrice au point de connexion.

Notre travail vise essentiellement à l'étude de système de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique en utilisant une machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les grandeurs rotoriques, et alimentée par une cascade de deux convertisseurs MLI à deux niveaux. La fonction principale de ces convertisseurs est le contrôle et l'optimisation du flux énergétique pendant les périodes de fonctionnement de ce système. Pour ce faire, plusieurs stratégies de commande sont proposées dans ce travail afin de contrôler ces convertisseurs.

La structure de notre mémoire est donnée comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques et les techniques de stockage associées, Ensuite la modélisation et l'optimisation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible, puis les résultats de simulation. Enfin nous exposons les différents types de machines utilisées comme génératrices.

Le deuxième chapitre est consacré à la machine asynchrone à double alimentation on présentant en premier temps la topologie et les différentes configurations de cette machine en fonctionnement moteur et génératrice on précisant sa particularité par rapport aux machines classiques, ensuite la modélisation de la MADA. Enfin la simulation du fonctionnement de la machine en mode moteur et génératrice.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe et variable (avec turbine). Nous présentons dans le premier lieu le stator de la MADA et alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans le seconde lieu nous présentons le système complet constitué de : la machine asynchrone double alimentation et 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

INTRODUCTION GÉNÉRALE

fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Les résultats de simulation sous Matlab simulik seront présentés.

Le quatrième chapitre traite en premier lieu des rappels de notions de base sur la théorie de la commande par mode de glissement. Puis il présente la stratégie de commande par mode glissant appliquée au 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. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.

Finalement, nous concluons ce travail par une conclusion générale et on proposant quelques perspectives pour les futurs travaux de recherche.

CHAPITRE I

BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

I.1 INTRODUCTION:

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 17 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée qui dépassera les 160 GW [GWE 10].

Dans ce chapitre, on présentera les différentes structures d'éoliennes existantes. Puis, les principes de conversion des énergies à partir de la source primaire (le vent) et jusqu'à arriver à une forme finale (électricité) en exposant les principales stratégies utilisées pour arriver à cela.

Ce chapitre est consacré à la modélisation des différentes parties de la turbine. En suite, la stratégie de commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale, lorsque les vents sont faibles, d'atteindre l'objectif de maximiser l'énergie capturée et donc l'énergie produite par l'éolienne.

I.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE:

I.2.1 Historique de l'énergie éolienne

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

L'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice est mise au point par Poul La Cour En 1890. Cette 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) [MIR 05]. La crise pétrolière de 1973 a alerté les états 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, pour 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 [MER 08].

I.2.2 L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [MUL 08] :

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

La figure (I-1) illustre la correspondance taille & puissance des éoliennes.

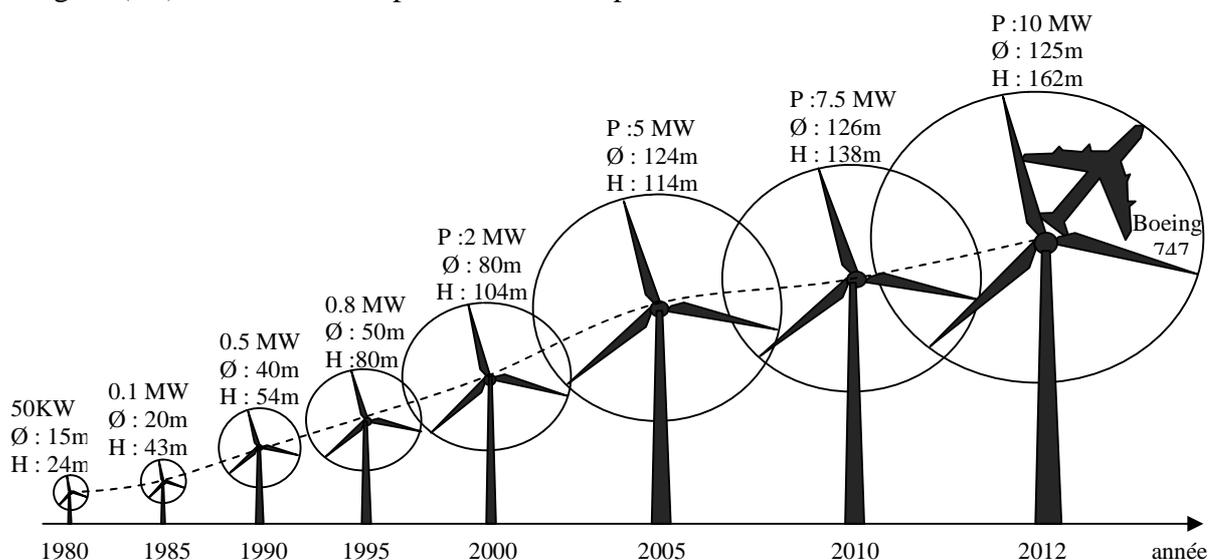


Figure I-1 : Correspondance taille et puissance des éoliennes [ZAR 11]

I.2.3 Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes: Les aérogénérateurs à axe vertical et ceux à axe horizontal [BOY 06], [POI 03].

I.2.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Ils ont tiré leur nom de la disposition verticale de l'arbre. Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais seulement deux ont atteint l'étape d'industrialisation.

➤ **Rotor de Savonius:**

Basé sur le principe de traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

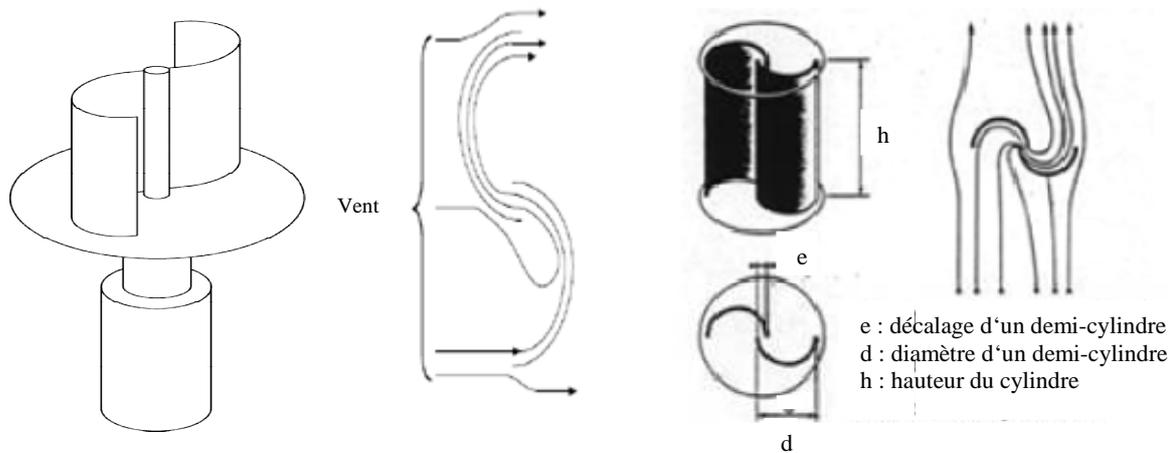


Figure I-2 : Structure de Savonius [POI 03]

➤ **Rotor de Darrieus :**

Ou éoliennes à variation cyclique d'incidence. Basées sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

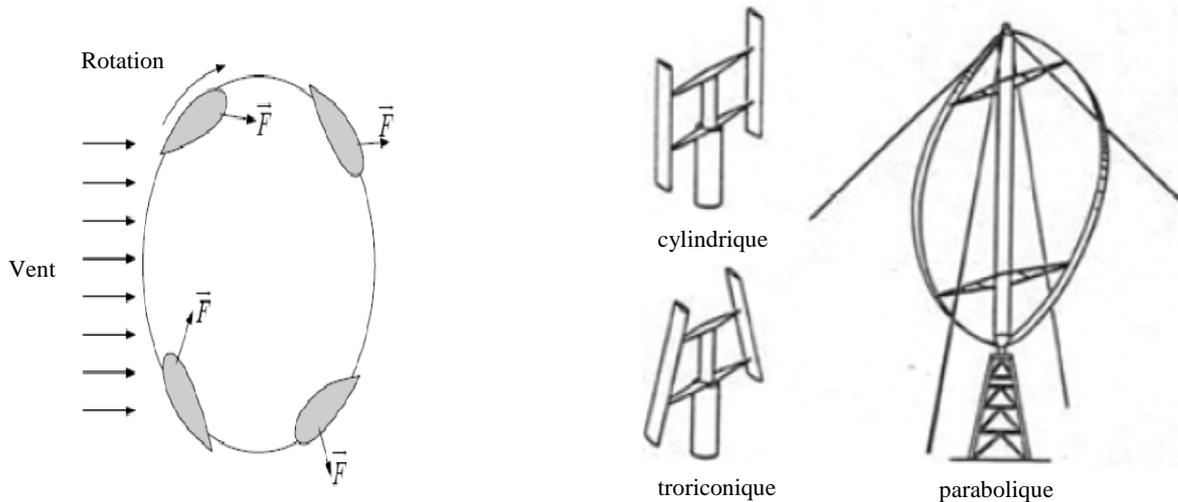


Figure I-3 : Structure de Darrieus [POI 03]

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- ✚ Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- ✚ La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- ✚ Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- ✚ Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- ✚ Faible vitesse du vent à proximité du sol.

I.2.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Ils sont de loin les structures les plus répandus dans le monde grâce à une faible emprise au niveau du sol et une meilleure efficacité énergétique, en effet ces éoliennes peuvent atteindre des hauteurs très importantes où l'impact du relief sur la vitesse du vent est minimal. Nous orienterons par la suite notre étude que sur ce type d'aérogénérateurs.

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales [ROG 04], mais il existe d'autres structures à une ou deux pales.

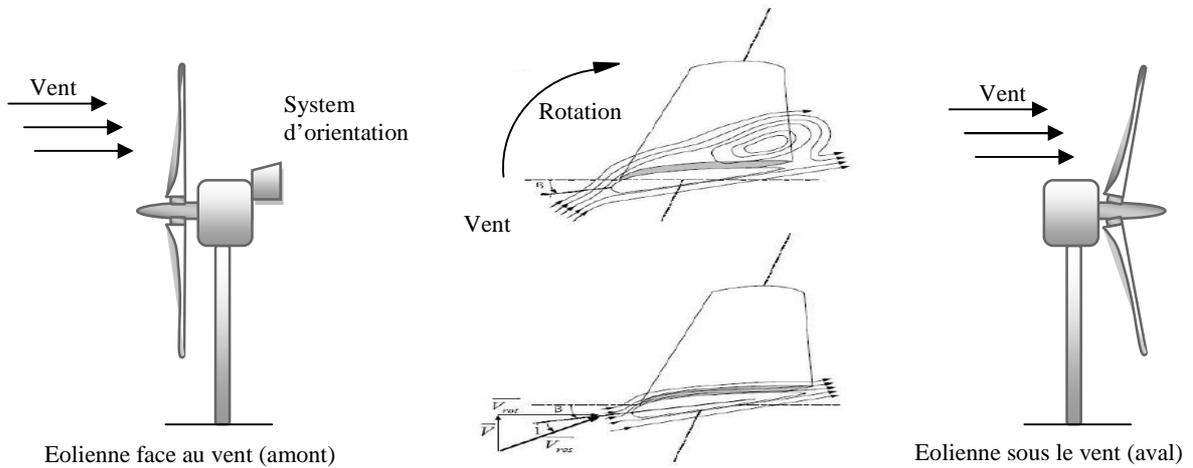


Figure I-4 : Aérogénérateur à axe horizontal [POI 03].

I.2.3.3 Principaux composants des aérogénérateurs à axe horizontal :

Comme l'aérogénérateur à axe horizontal est le plus utilisé, on s'intéresse à la structure interne de cet aérogénérateur. Les trois principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal sont : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [HAM 08].

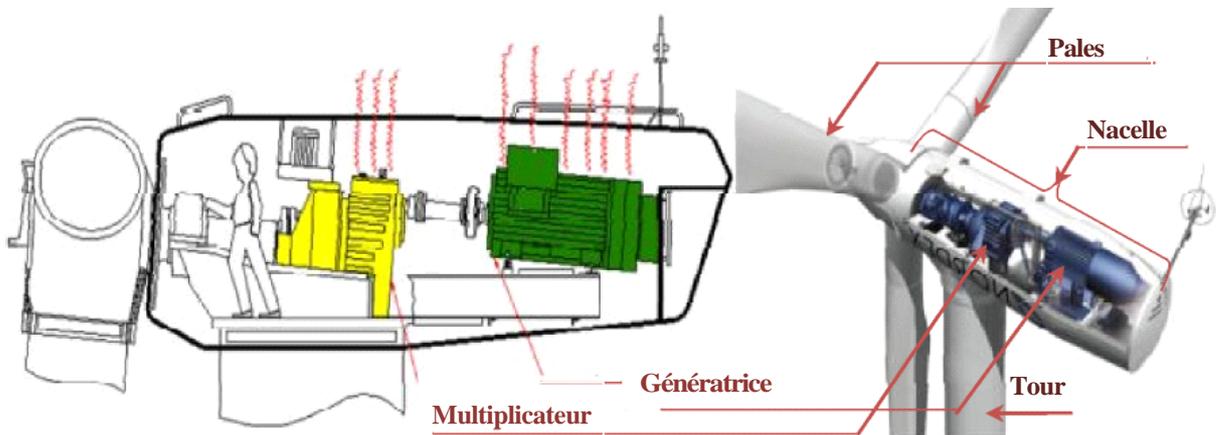


Figure I-5 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal [HAM 08].

La tour : C'est un pylône qui supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Généralement un tube en acier ou un treillis métallique, sa hauteur et son diamètre sont fonction de la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les perturbations près du sol mais surtout pour permettre l'utilisation de pales plus longues. A l'intérieur, on trouve les câbles de

transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

Les pales : Leurs rôle est de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Dans la plus part des aérogénérateurs Leur nombre est de trois, car ce nombre procure un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien en plus de la stabilité. Ces pales sont fixées par le biais d'un moyeu.

La nacelle : Située en haut du mat, c'est le cœur de l'éolienne. Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique.

I.2.4 Production d'une éolienne :

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières ; selon qu'elle soit connectée au réseau ou alimentant une charge isolée.

I.2.4.1 Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines, mais on peut retrouver aussi des machines isolées connectées au réseau [BOY 06].

Le courant électrique acheminé à travers le réseau doit avoir une fréquence de 50 Hz avec une tension d'amplitude bien définie. Une éolienne raccordée au réseau se doit donc de fournir une tension respectant ces exigences, quelle que soit la vitesse du vent. Une première technique consiste à garder la vitesse de rotation de la génératrice constante. Cette dernière est alors obtenue par régulation notamment avec l'orientation des pales. Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence tel qu'un cycloconvertisseur.

A vitesse trop faible du vent, l'éolienne s'arrête en raison des forces de frottement sec qui s'opposent à la rotation de l'hélice. Cette diminution de la vitesse de rotation ne permet plus de fournir cette fréquence. Dans ce cas, l'éolienne devienne consommatrice d'électricité, elle est donc automatiquement déconnectée du réseau.

Si la vitesse du vent est trop forte (supérieure à 100 km/h par exemple), l'éolienne est mise en sécurité et déconnectée du réseau, ses pales sont *mises en drapeau* et s'arrêtent pour éviter des sollicitations qui pourraient les briser. Certaines éoliennes récentes continuent à tourner mais à vitesse réduite, diminuant ainsi le nombre de déconnexions du réseau et augmentant la production moyenne par vent fort.

I.2.4.2 Eolienne alimentant une charge isolée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

I.2.5 L'énergie éolienne en quelques chiffres [GWE 10], [BAR 09]

La puissance d'un outil de production d'électricité se mesure en *GW* (GigaWatt) et son multiple par 1000, le *TW* (TéraWatt). La production d'électricité (l'énergie produite) se mesure en *GWh* (GigaWatt-Heure).

- La consommation électrique mondiale : 16 millions de *GWh* par an sachant que la production d'une éolienne de *5MW* est de plus de *15 GWh* par an, Il faut donc environ 1 million d'éoliennes pour répondre à la totalité de la demande électrique mondiale.
- L'installation d'une éolienne nécessite une surface de 1km^2 , cela représente une surface d'1 million de km^2 pour la totalité du parc mondial, soit un carré de 1000km de côté, Cela ne représente que 0,2% de la surface terrestre [GWE 10].
- Comme presque toutes les énergies renouvelables (excepté les énergies géothermique et marémotrice), l'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. Or, la Terre reçoit en 30 *minutes* l'équivalent en énergie solaire de la consommation annuelle de l'humanité, tous types d'énergies confondus. De 1 à 2 % de cette énergie provenant du soleil est convertie en vent, soit 50 à 100 fois plus que l'énergie convertie en biomasse par la photosynthèse.

I.2.6 Nécessité de stockage

Le stockage d'énergie associé à une gestion adéquate permet d'obtenir un service réseau appréciable de telle façon à garantir une production constante et continue tout au long de l'année. Nous nous intéresserons aux modes de stockage qui peuvent être associés à une éolienne, il y a deux types de stockage à envisager : d'une part le stockage à court terme permettant de faire face aux bourrasques de vent et aux turbulences, et d'autre part le stockage de longue durée qui permettrait de restituer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent [BAR 09].

Le but est double : stocker de l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne et stockage. Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande des conversions énergétiques plus complexes. Le rendement global du stockage est donc très variable en fonction des procédés choisis.

I.2.6.1 Techniques de stockage à court terme

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes. On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants tels que les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques.

- **Les systèmes de stockages inertiels** : sont constitués de très lourds volants d'inerties accouplés à des machines classiques, le stockage s'effectue désormais à très grande vitesse en utilisant des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques.
- **Les super capacités** : Elles ont un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance par leur dynamique plus rapide que celle des batteries. Leurs capacité augmente et l'on trouve désormais des super capacités de 1800F, utilisées en association avec un convertisseur alternatif/continu permettant l'échange avec le réseau.

I.2.6.2 Techniques de stockage à long terme

Le stockage à long terme s'effectue essentiellement au moyen de batteries, comme il existe beaucoup d'autres systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associée à une pile à combustible.

- **Les batteries** : Elles ont évolué durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère tout en optimisant leur durée de vie.
- **Les systèmes à air comprimé** : utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure. De plus, un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associée à une génératrice pour le déstockage.
- **Les systèmes utilisant un électrolyseur** : pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à l'aide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude.

Ces deux dernières techniques sont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible. Par contre, elles permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker.

I.2.7 Avantages et Inconvénients

I.2.7.1 Avantages environnementaux et économiques des systèmes éoliens

- ✚ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✚ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme c'est le cas de l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- ✚ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✚ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains :
- ✚ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- ✚ C'est l'énergie la moins chère parmi toutes les autres énergies renouvelables [GWE 10], [THE 10].
- ✚ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer et s'intègre facilement dans un système électrique existant.

I.2.7.2 Inconvénients [BAR 09], [GRI 06] :

S'ils sont pour leurs majorités anodines, les systèmes éoliens présentent certains inconvénients:

Nuisance sonore : Des expertises acoustiques ont montrés qu'une éolienne produit un bruit de 55 *dB* au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Ce niveau sonore est en général considéré comme acceptable.

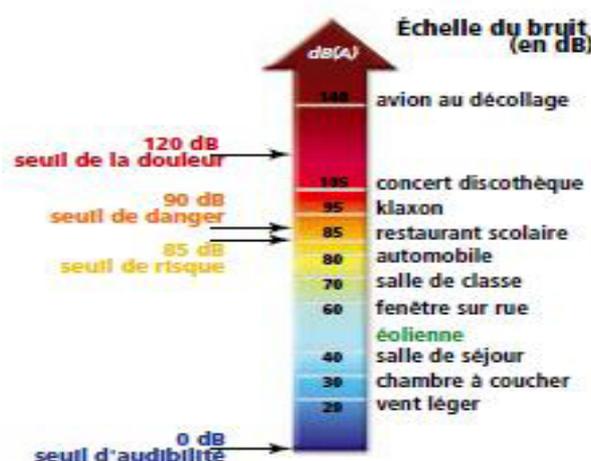


Figure I-6 : Niveau sonore d'une éolienne

Risque d'accident éolien : Les éoliennes présentent des risques d'accidents (un fort vent est susceptible de rompre les structures des éoliennes). La majorité des accidents connus sont liés à l'utilisation de matériels d'occasion. Les éoliennes aujourd'hui installées bénéficient de certifications réalisées par des organismes indépendants, et sont construites sous contrôle qualité sévère, réduisant significativement les risques de rupture du matériel. Dans le monde, personne n'a encore jamais été reconnu victime d'un accident éolien.

Esthétique : Comparativement aux premiers parcs éoliens, très denses, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grande taille et puissance. Ils ont donc perdu leur aspect surpeuplé. Les éoliennes peuvent être disposées le long des autoroutes, ce qui réduit significativement les soucis d'esthétiques.

Impact des installations : Interférence potentielle avec les radars militaires dans le cadre de la détection d'un aéronef volant à basse altitude ou pour les radars météorologiques pour la détection de la précipitation. En effet, les éoliennes constituent un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données

Encombrement des éoliennes : Les éoliennes actuelles nécessitent une importante surface au sol, imposée par la rotation nécessaire en fonction de la direction du vent, par la taille des pales, par l'interférence entre éoliennes voisines sur le flux du vent et par mesure de sécurité en cas de chute.

I.3 CONVERSION D'ÉNERGIE CINÉTIQUE DU VENT EN ÉNERGIE MÉCANIQUE

I.3.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » [LEG EY].

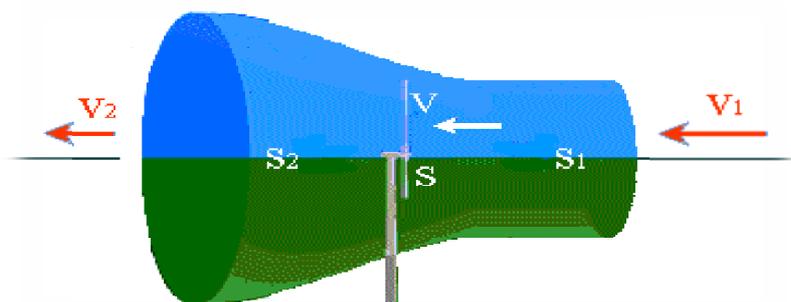


Figure I-7 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [POI 03]

De la figure (I-7) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement [LEG EY, POI 03] :

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (\text{I. 1})$$

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

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 2})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

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

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 4})$$

On

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

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

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 6})$$

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

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 :

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

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 :

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

Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ [POI 03, HAM 08]. 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 [POI 03].

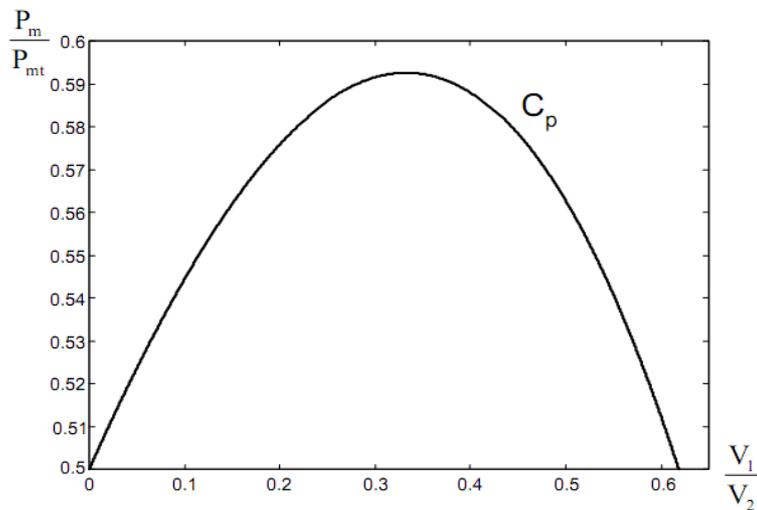


Figure I-8 : Variations du coefficient de puissance [POI 03]

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

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

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \quad (I.11)$$

Ω_T : vitesse de rotation de la turbine

R_T : la longueur (rayon) de la pale

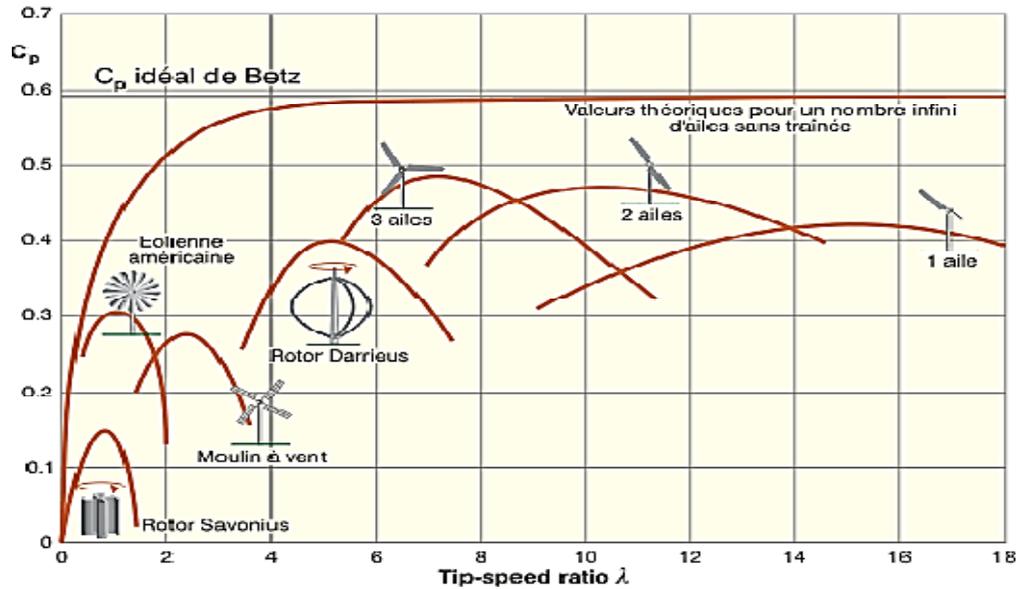


Figure I-9 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs [POI 03]

I.3.2 Utilité de la vitesse variable

Pour une vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A) (Figure I-8). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 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.

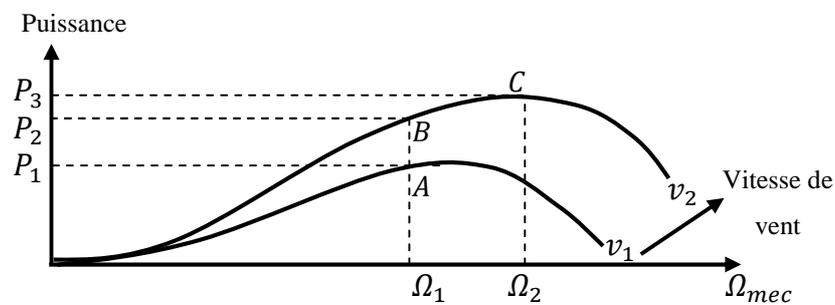


Figure I-10 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses [GWE 10].

I.4 MODELISATION ET STRATEGIES DE COMMANDE DES TURBINES A VITESSE VARIABLE

I.4.1 MODELISATION DE LA TURBINE

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

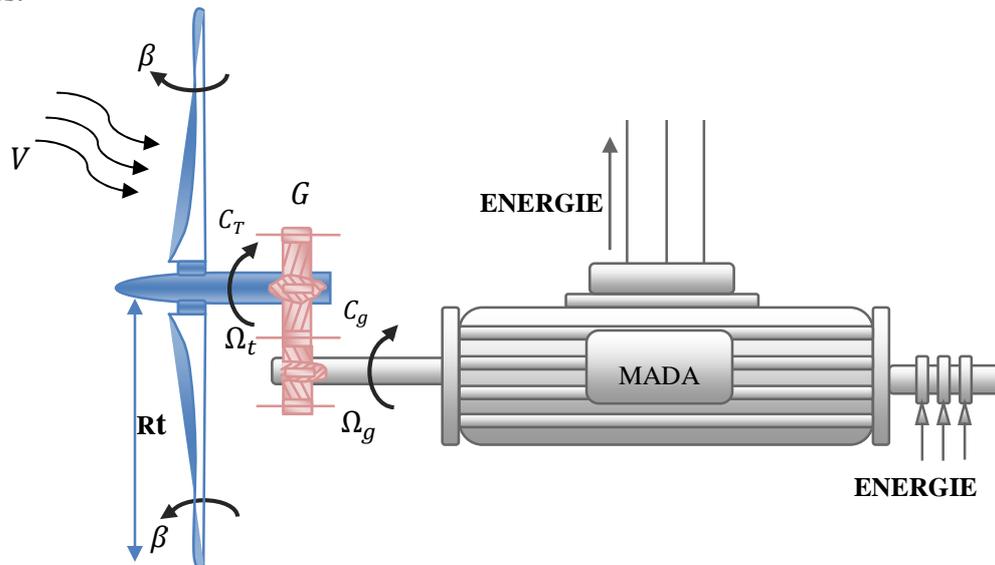


Figure I-11 : Schéma de la turbine éolienne

I.4.1.1 Source primaire : « Le vent »

L'énergie cinétique du vent constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air. La distribution spatiale de ce champ au niveau de la turbine éolienne est complexe et son évolution au cours du temps présente de fortes variations ce qui nous empêche de le représenter par des expressions exclusivement déterministes.

La vitesse du vent en un point peut être décomposée en deux composantes : une composante moyenne variant lentement et des fluctuations.

L'expression de la vitesse du vent devient donc :

$$V_0(t) = V + V(t) \quad (I.12)$$

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.

$V = 6 \text{ m/s}$ Pour un vent faible vitesse.

$V = 12 \text{ m/s}$ Pour un vent moyen vitesse.

$V = 18 \text{ m/s}$ Pour un vent fort vitesse.

- ✓ Des fluctuations ou turbulences « $v(t)$ », décrites par l'écart type suivant :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} v(t)^2 dt} \quad (\text{I. 13})$$

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

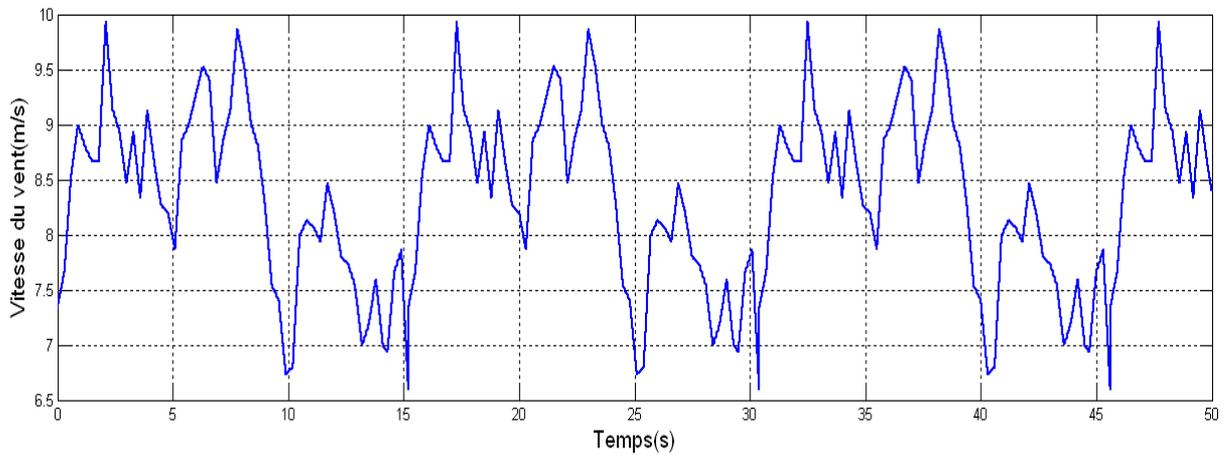


Figure I-12 : Profil du vent appliqué à la turbine

I.4.1.2 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 :

$$P_T = C_p \cdot P_{amont} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \quad (\text{I. 14})$$

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

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \quad (\text{I. 15})$$

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

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (I.16)$$

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

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad (I.17) \quad \text{et} \quad \Omega_T = \frac{\Omega_g}{G} \quad (I.18)$$

I.4.1.3 Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 kw pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β . A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 4Kw est approximé par l'équation [HAM 08]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (I.19)$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure (I-13), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.5$) est atteint pour une valeur du rapport d'avance $\lambda = 9.2$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta = 2$. 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.

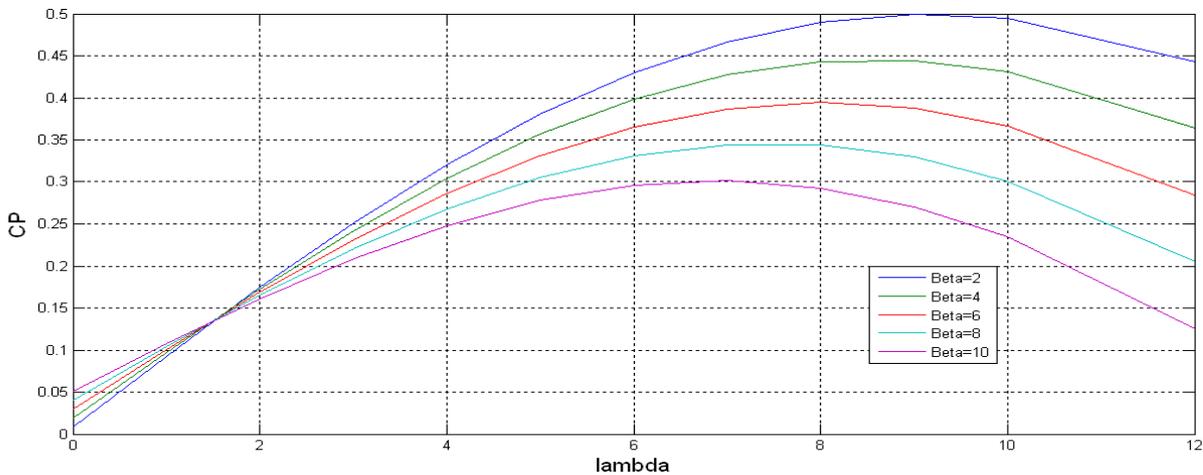


Figure I-13 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

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

I.4.1.4 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 [LOU 10].

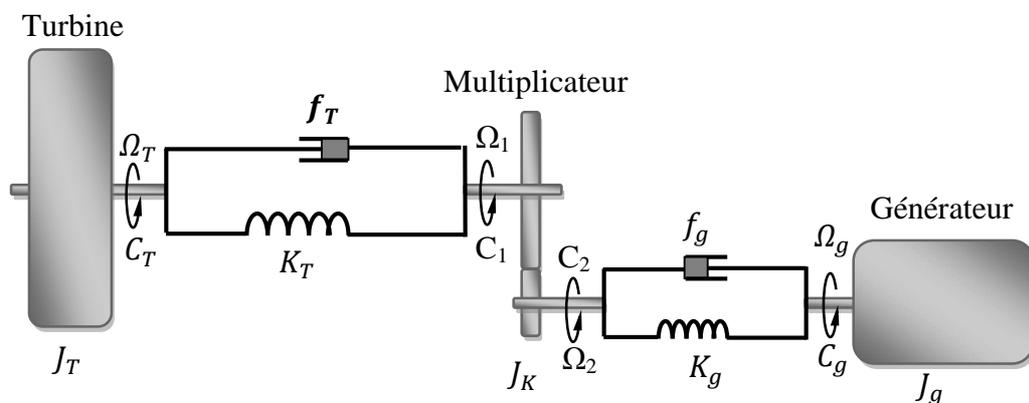


Figure I-14 : Modèle de la turbine.

Le modèle à trois masses équivalent de la chaîne de conversion éolienne est présenté sur la Figure I. 14. 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 [MUY 09, MUN 08]. En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres [LOU 10], ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [LAV 05].

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'une 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 $1/G$.

- les arbres de transmission sont parfaitement rigides.

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

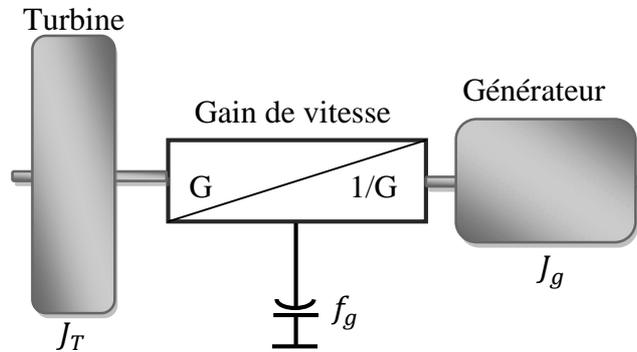


Figure I-15 : Modèle simplifié de la turbine.

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (I.20)$$

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

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

f_T, 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 :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \quad (I.21)$$

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

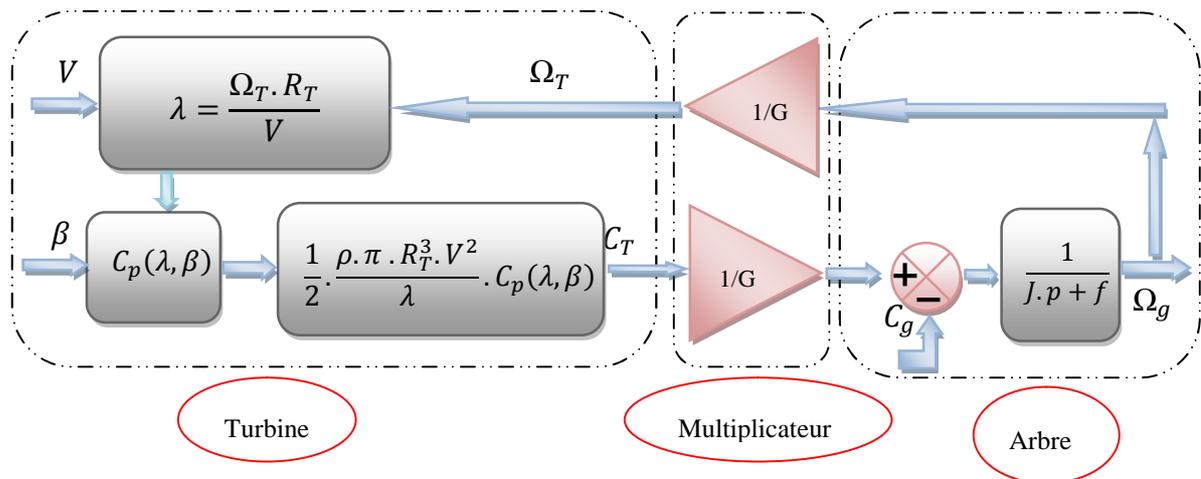


Figure I-16 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.4.1.5 Modélisation du système d'orientation des pales

La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale :

- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au delà d'une certaine vitesse de vent. Les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances utilisent généralement ce système.
- Un système d'orientation des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante (Zone 3 de la figure I.19). Les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieure, utilisent ce système.

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. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance [ELA 04].

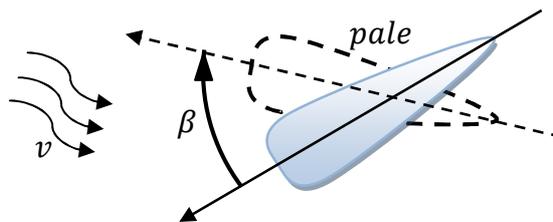


Figure I-17 : Orientation des pales.

Généralement, le système d'orientation de l'angle d'orientation est approché par une fonction de transfert de 1^{er} ordre avec une constante de temps T_β . Lors de la modélisation du système de commande de l'orientation des pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à environ $10^\circ/s$ lors d'un fonctionnement normal et à $20^\circ/s$ pour des cas d'urgence [ELA 04].

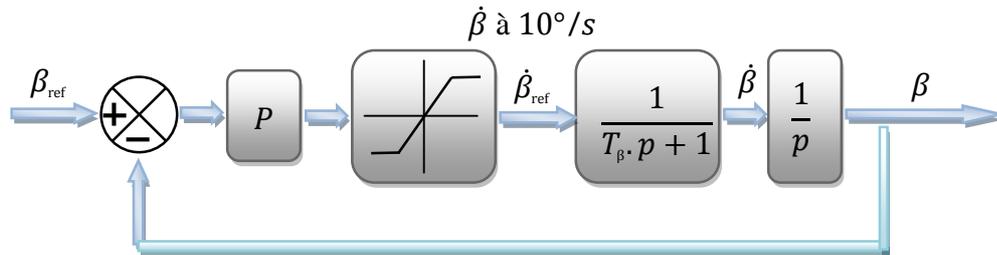


Figure I-18 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.

I.4.2 STRATEGIE DE COMMANDE DE LA TURBINE

Dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, on distingue deux régions: en dessous et au dessus de la vitesse nominale du vent. La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. Il est alors important d'étudier le rôle et les effets du système de commande en fonctionnement à charge partielle, c'est à dire en dessous de la puissance nominale [POI 03].

I.4.2.1 la commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale

Dans cette zone de fonctionnement, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement. Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, ces deux variables doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de $C_{p_{opt}} = (\lambda_{opt}, \beta_{opt})$. On fixe donc l'angle de calage à sa valeur optimale β_{opt} . La vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} [POI 03].

I.4.2.2 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.

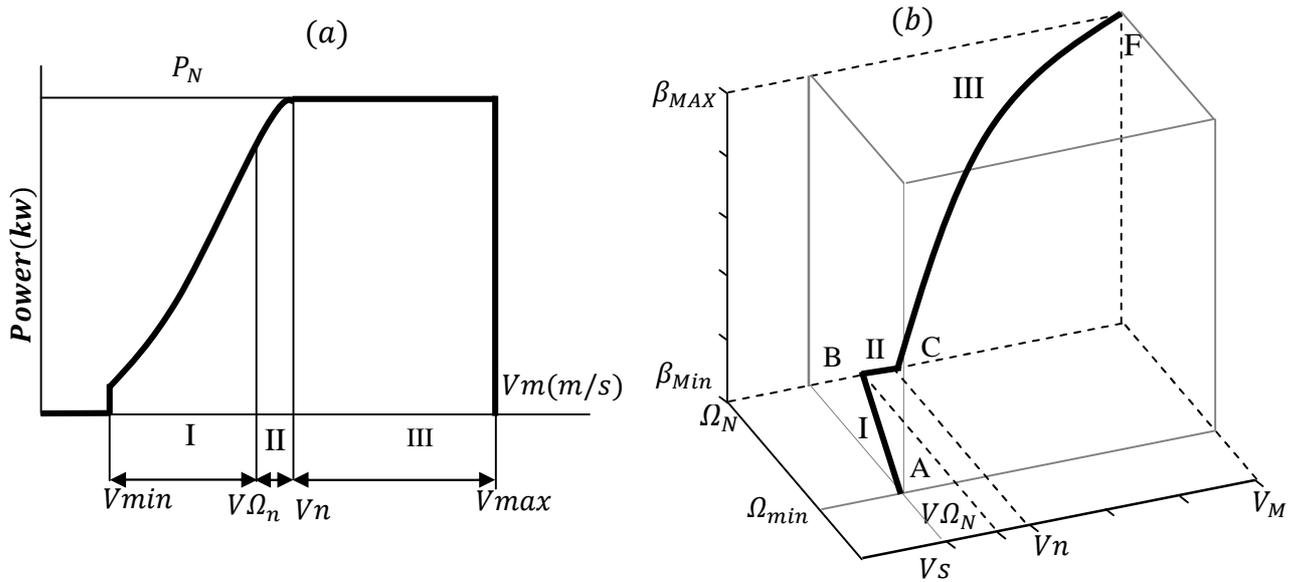


Figure I-19 : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.

(a). dans le plan (V, P) . (b). dans le plan (V, Ω, β) .

Cette caractéristique, idéale, montre trois zones différentes avec des objectifs de commande distinctifs [BIA 07, ELA 04, ROG 04].

- ❖ **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 (Maximum Power Point Tracking).
- ❖ **Zone II** : Zone de transition entre la zone de charge partiel (Zone I) et la zone de charge nominale (Zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés).
- ❖ **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.

I.4.2.3 Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance)

Dans cette zone, 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_{pmax} [BOU 06, CAM 03, CAL 08]. La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la *MPPT*.

I.4.2.3.1 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. 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. On le déduit à partir de l'équation [LAV 05] :

$$\frac{dP}{d\Omega_T} = \frac{dP}{dt} \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right)^{-1} \quad (I.21)$$

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

I.4.2.3.2 Commande indirecte de vitesse

Cette technique a la particularité de considérer que l'éolienne est en régime permanent. Quoique simples d'utilisation, elles présentent quelques inconvénients. Il est naturel de considérer qu'un système éolien est stable autour d'un point d'équilibre quelconque de la courbe de rendement maximal pour un couple du générateur et une vitesse du vent constants .La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan (Ω_T, C_T) par l'ensemble des points $E(\Omega_{Topt}, C_{Topt})$ correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans la quelle l'éolienne fonctionne (Figure I.20)

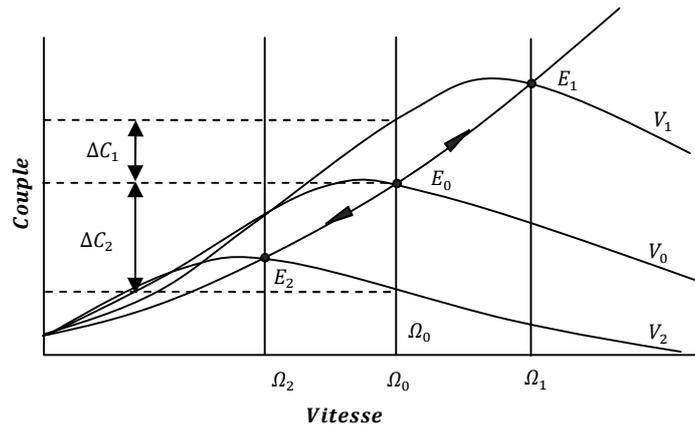


Figure I-20 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (I.22)$$

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 .

$$C_{gopt} = \frac{1}{2G} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (I.23)$$

Si le couple électromagnétique C_g est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal [BIA 07, MUN 08, BOU 06, SIG 06]. Cependant, l'équation (I.23) exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre situé sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace d'une part, et très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation d'une autre part [MUY 09, EL A 04, ROG 04].

L'utilisation d'un filtre spatial peut corriger le problème des turbulences en faisant un filtrage passe-bas de la mesure de l'anémomètre, mais le phénomène du cisaillement (variation de la vitesse du vent avec la hauteur des pales) reste non prés en charge.

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème [BOU 06]. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit [BOU 08].

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \quad (I.24)$$

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_T^2 \quad (I.25)$$

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

$$C_{Topt} = k_{opt} \cdot \Omega_T^2 \quad (I.26)$$

Tel que :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (I.27)$$

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

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (I.28)$$

En remplaçant par son expression, on trouve.

$$\frac{k_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \quad (I.29)$$

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

$$D'où \quad C_{gopt} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g \quad (I.30)$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne [BOU 06, MOL 08, SIG 06]. Le schéma block de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous.

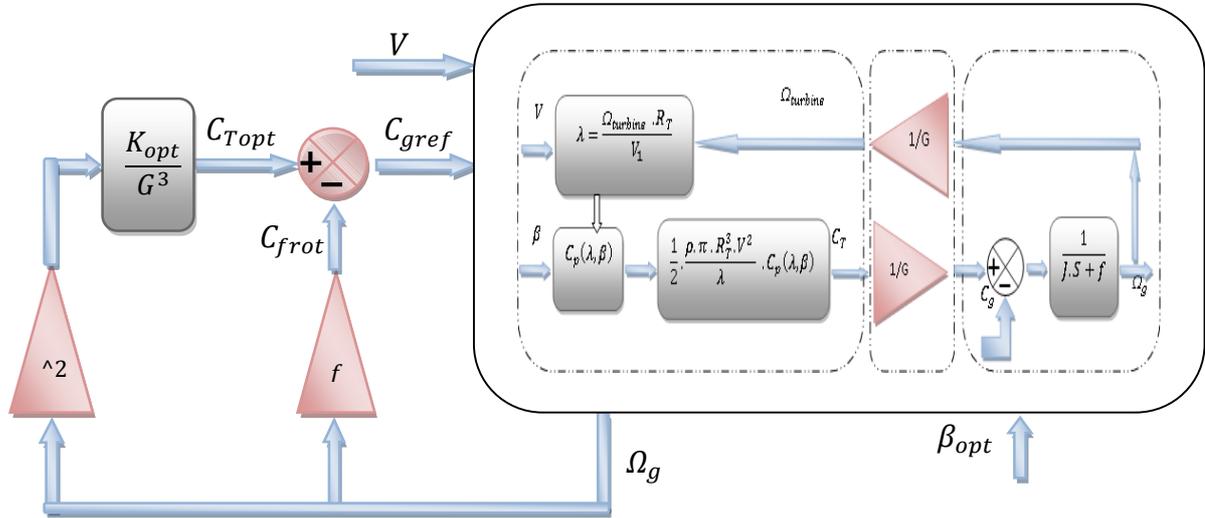


Figure I-21 : Commande indirect de vitesse (Zone I).

1.4.2.4 Résultats de simulation (en dessous de la puissance nominale)

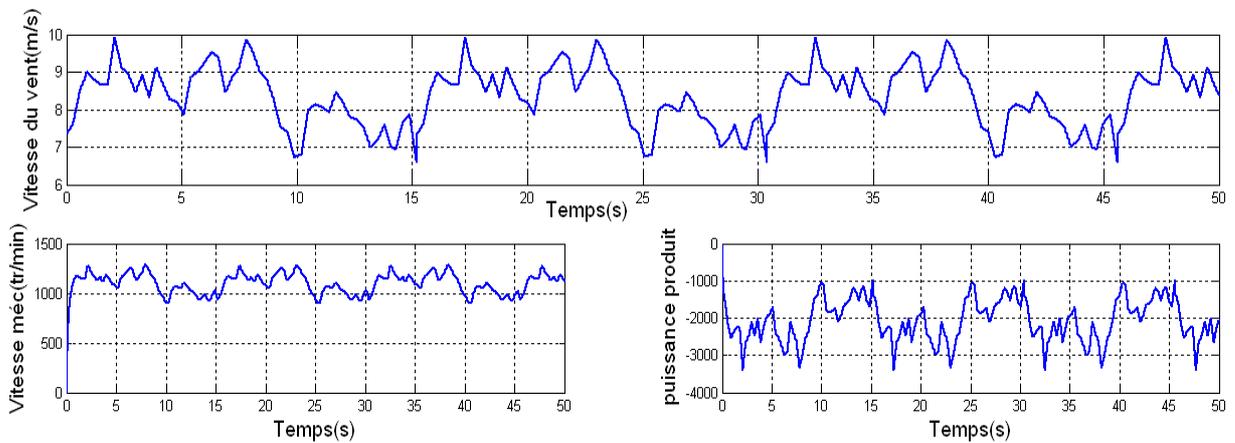


Figure I-22 : la vitesse du vent et mécanique et la puissance produit

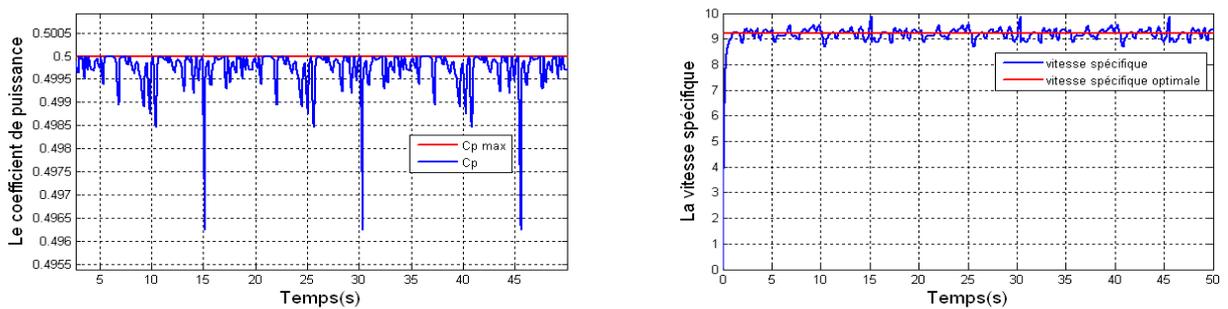


Figure I-23 : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique.

I.4.2.5 Interprétations des résultats

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. La figure (I-22) présente le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faibles est autour de (8.5m/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 fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

I.5 CONVERSION DE L'ENERGIE MECANIQUE EN ENERGIE ELECTRIQUE

I.5.1 Génératrices utilisées pour la production de l'énergie électrique

I.5.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe

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

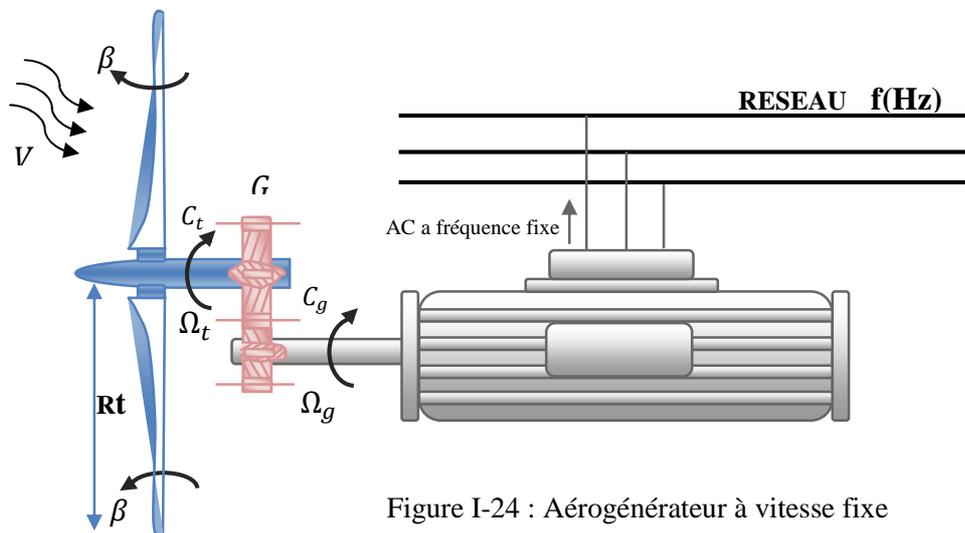


Figure I-24 : Aérogénérateur à vitesse fixe

I.5.1.1.1 Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

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

I.5.1.1.2 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

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

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

I.5.1.2 Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I-24) [MUL 08, BOU 08].

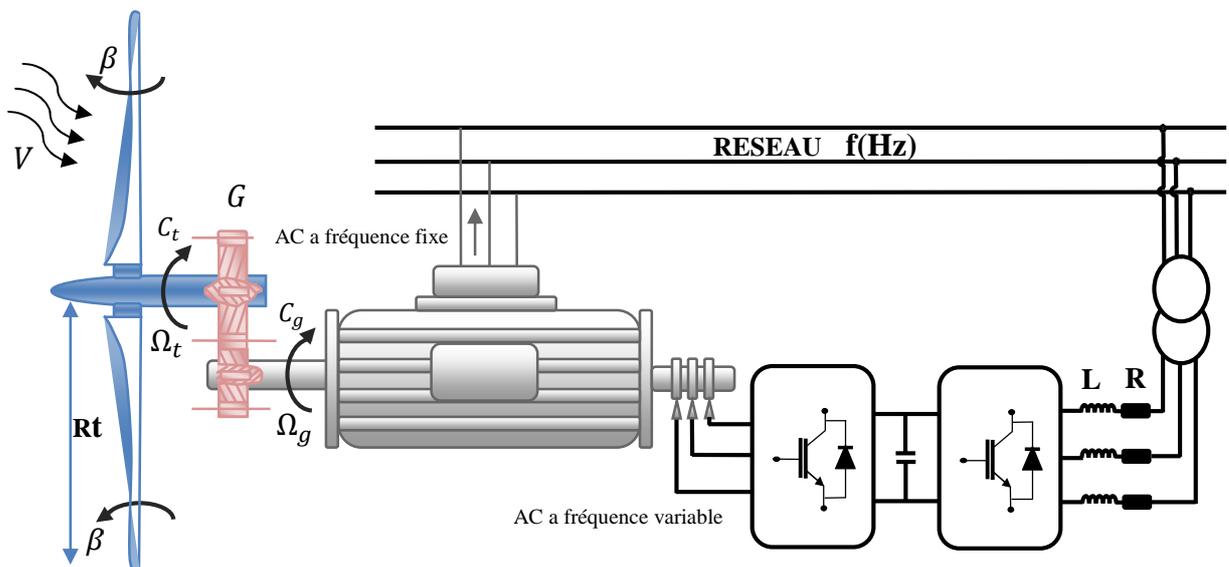


Figure I-25 : Aérogénérateur à vitesse variable

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe) [POI 03].

I.6 APERÇU SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

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

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

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. Donc il nous faut des composants de puissance plus performants voire spéciaux. En conséquence, les alternateurs sont abandonnés à cause du coût et des problèmes de l'intégration à un système de production d'énergie éolien.

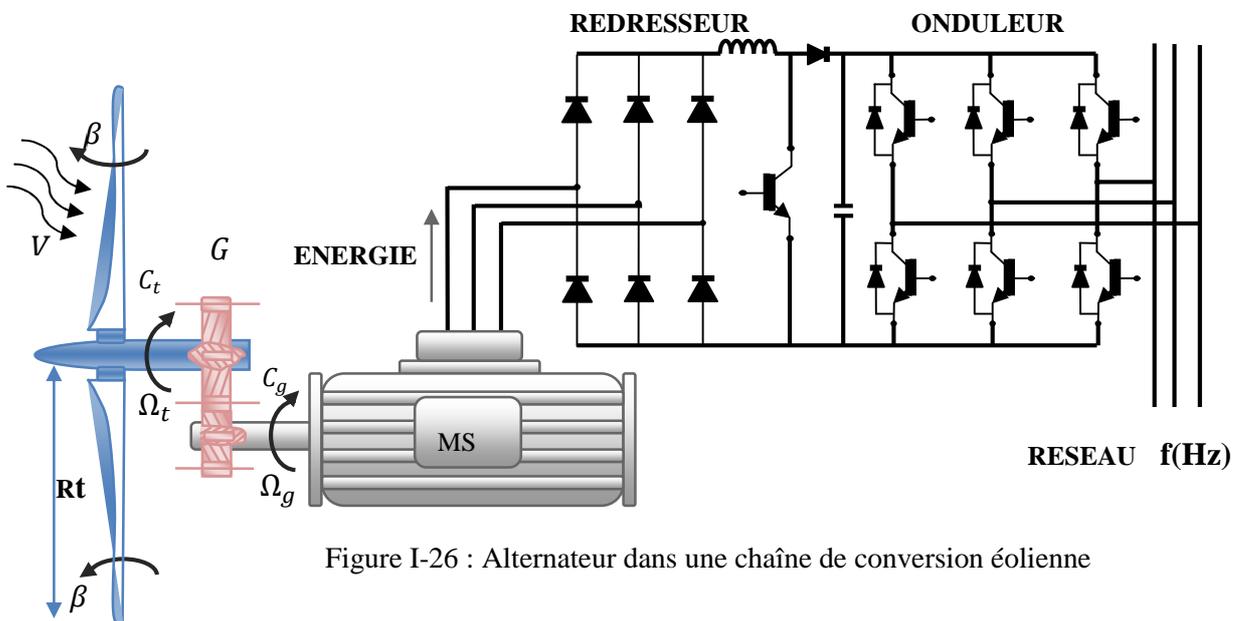


Figure I-26 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne

I.6.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible

et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écurueil 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%) [POI 03].

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'écurueil est connecté directement au réseau. De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau [POI 03].

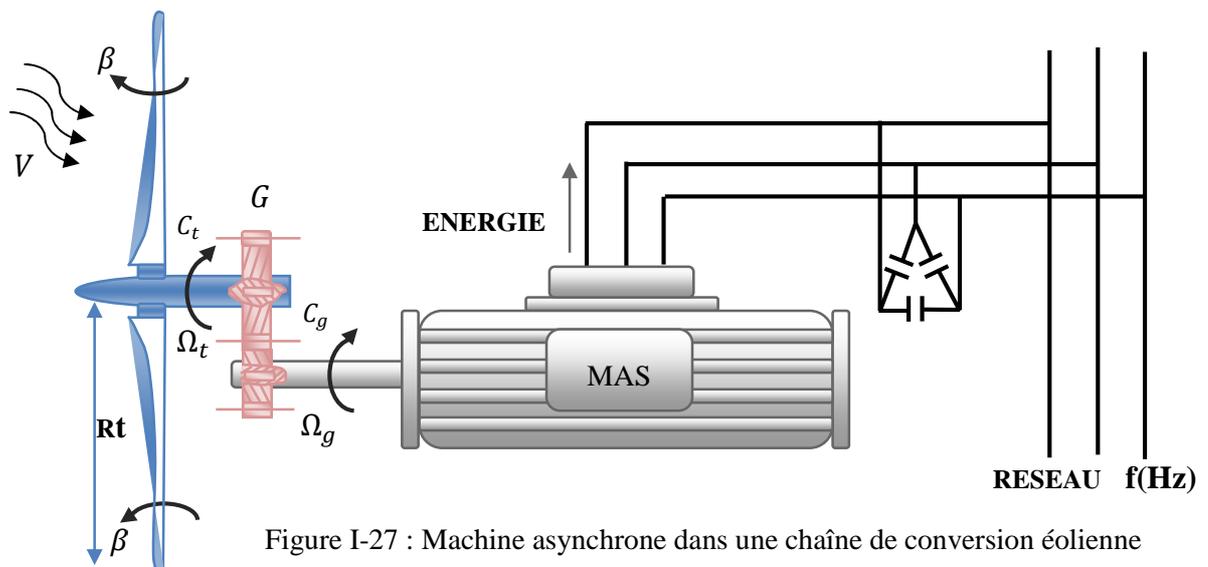


Figure I-27 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne

Par conséquent, la machine asynchrone doublement alimentée a trouvée la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux [POI 03].

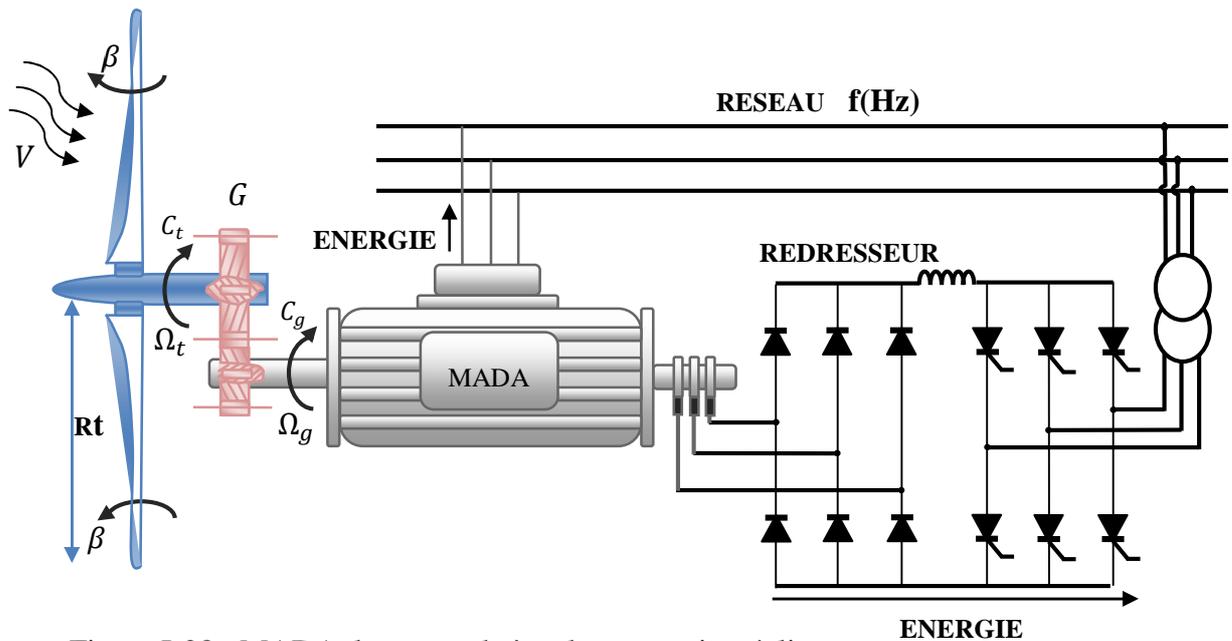


Figure I-28 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne

I.7 CONCLUSION :

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

Nous nous sommes intéressés aux 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 génère. Pour ce faire, nous avons développé un technique de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées. Cet algorithme ont été valides par des résultats de simulation, qui ont montre leurs inconvénients et leurs avantages.

Un point très important abordé dans ce chapitre a été la présentation des différentes structures utilisées pour la conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées.

Donner les avantages et les inconvénients de chacune de ces structures était dans l'intérêt de trouver une meilleure solution qui convient au critère d'exploiter un maximum de puissance quelque soit la vitesse du vent. Cette recherche s'est conclue par le choix de la machine asynchrone à double alimentation qui va être étudiée en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

**MACHINE ASYNCHRONE A
DOUBLE ALIMENTATION**

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.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation en mode moteur et générateur, ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement, éventuellement lors de son contrôle (commande).

II.2 STRUCTURE DE LA MADA:

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

II.2.1 MADA à rotor bobiné :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants [BOY 06]

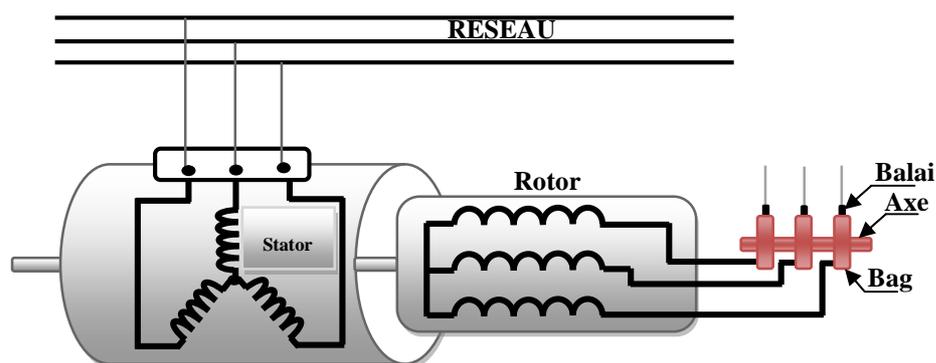


Figure II-1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné [VID 04]

II.2.2 MADA sans balais :

Cette machine est très proche à 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'écurueil.

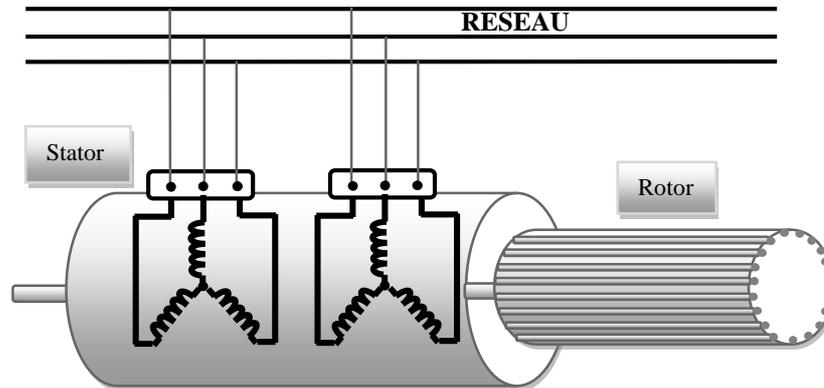


Figure II-2 : Structure de la MADA sans balais [VID 04]

Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

II.2.3 MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation côté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées [VID 04].

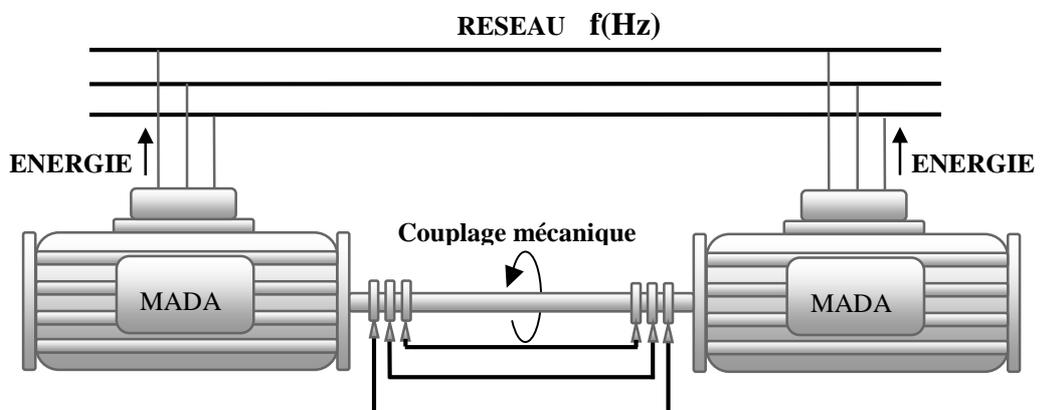


Figure II-3 : Structure en cascade de deux machines asynchrones [VID 04]

II.3 MODE DE FONCTIONNEMENT :

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau (Figure II-4). Cette puissance est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage [BOY 06]. Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone est dans le même sens que le champ statorique [SEG 06, HAM 08].

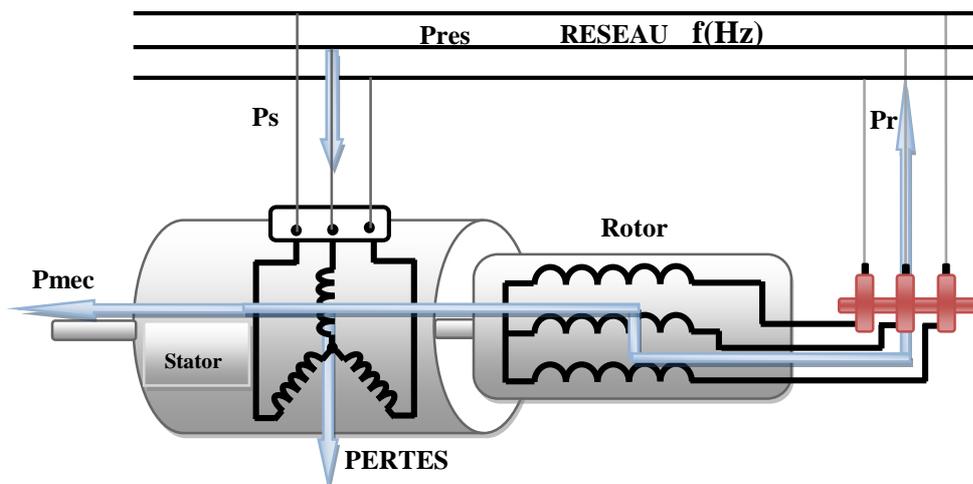


Figure II-4 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques afin de la convertir en puissance mécanique (Figure II-5). Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator [SEG 06, HAM 08]

car la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

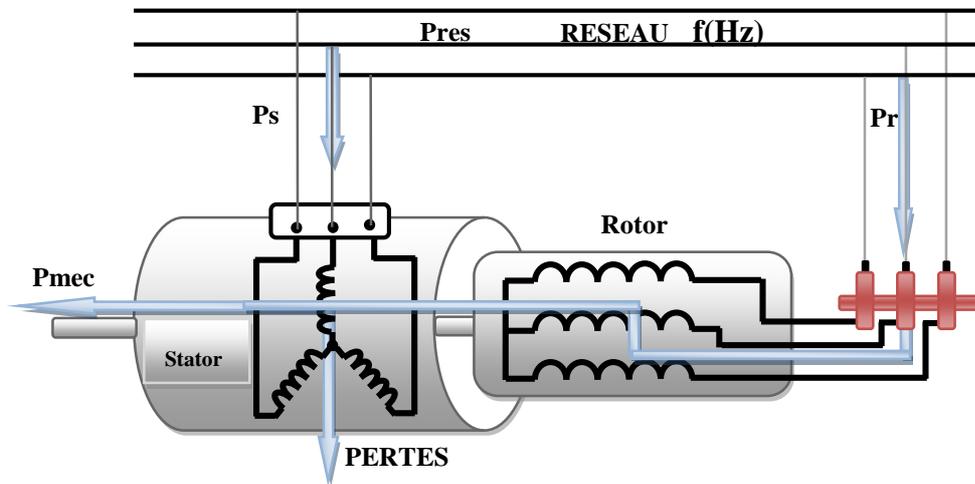


Figure II-5 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator Figure (II-6). La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

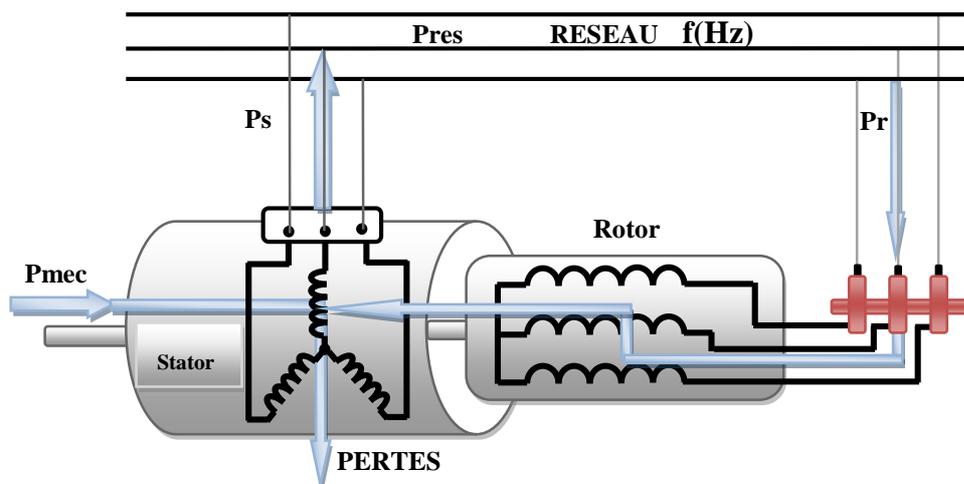


Figure II-6 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, comme le montre la Figure (II-7), la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor.

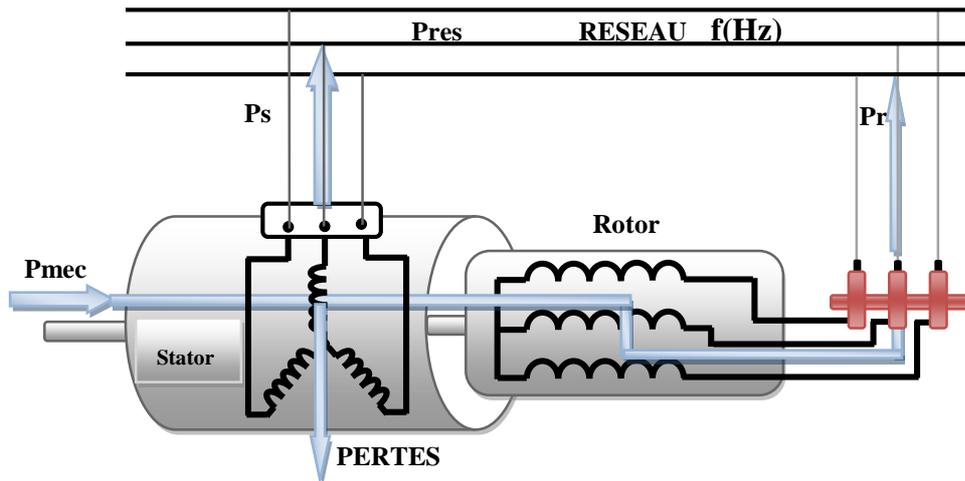


Figure II-7 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

II.4 APERÇU SUR LES CONFIGURATIONS DE LA MADA A ROTOR BOBINE :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

II.4.1 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% [POI 03], en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques.

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 [SEG 06].

II.4.1.3 MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- Deux cycloconvertisseurs ;
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs ;
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

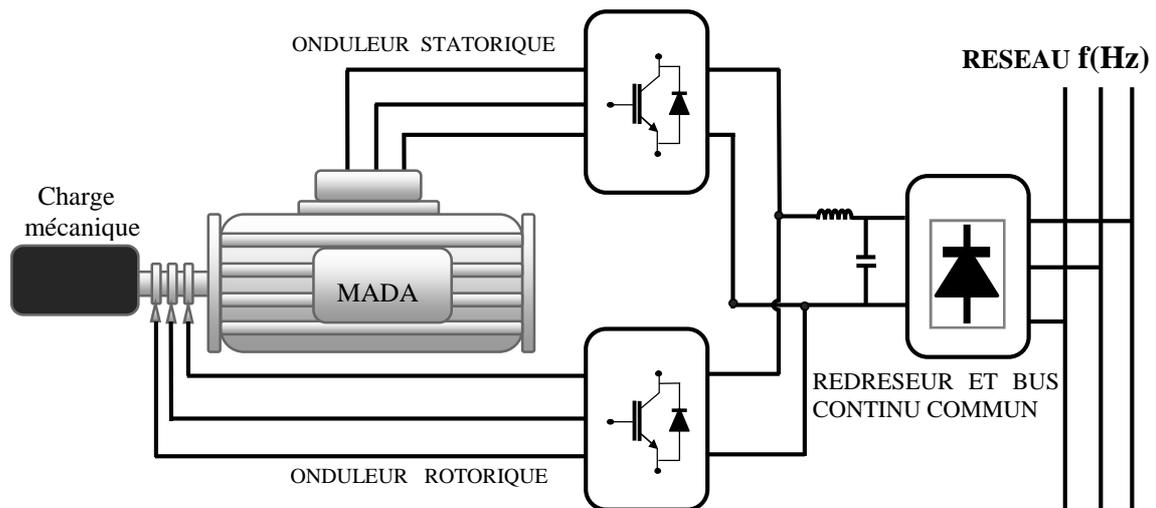


Figure II-10 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs[SAL 07]

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de liberté ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance [KHO 06].

II.4.2 Configuration pour application génératrice :

Dans cette partie, on s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

II.4.2.1 MADA à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de 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.

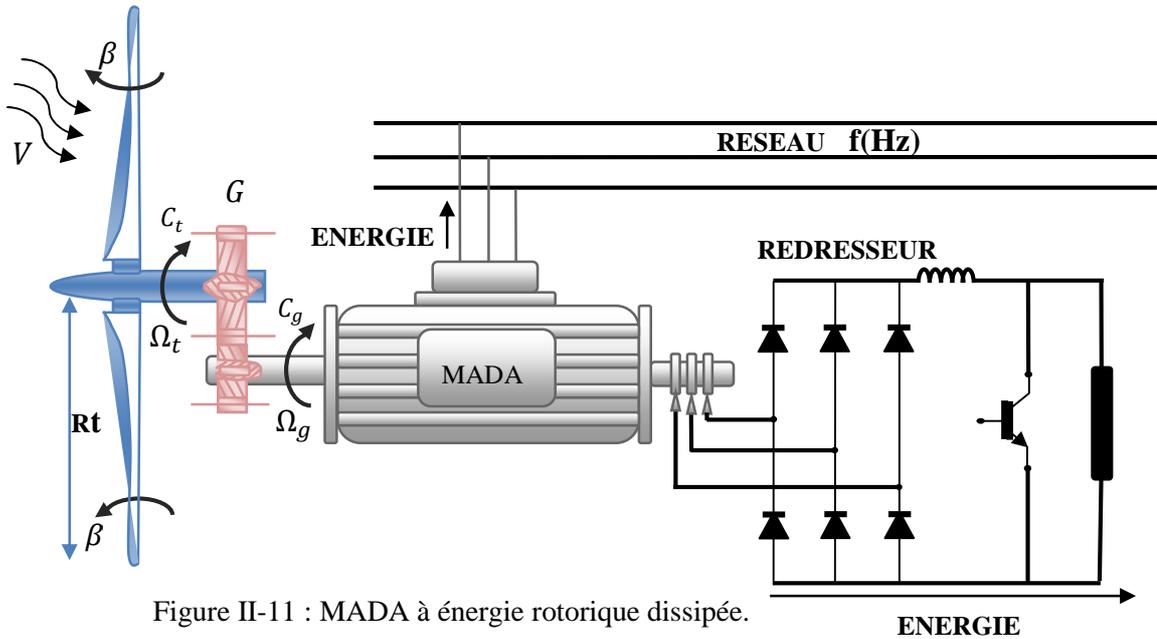


Figure II-11 : MADA à énergie rotorique dissipée.

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.

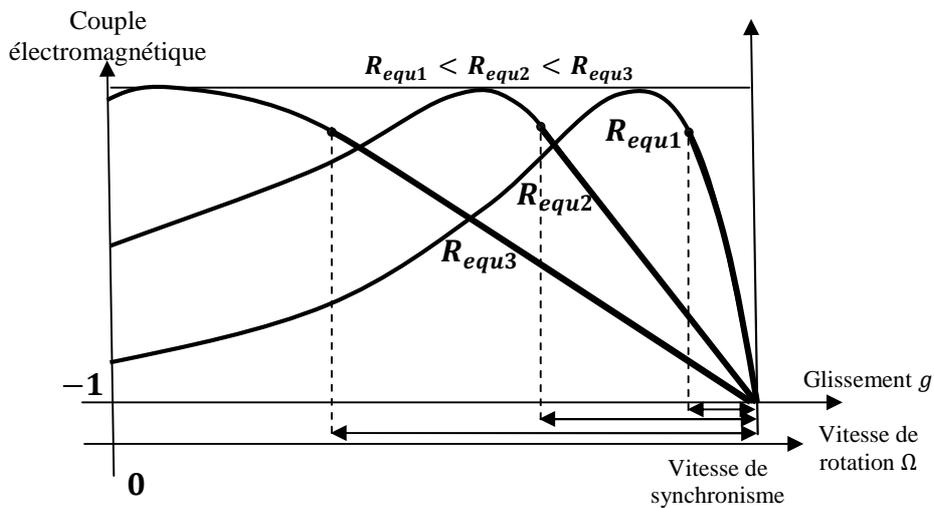


Figure II-12 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique [POI 03].

II.4.2.2 Structure de Kramer :

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. L'utilisation de thyristor 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). Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).

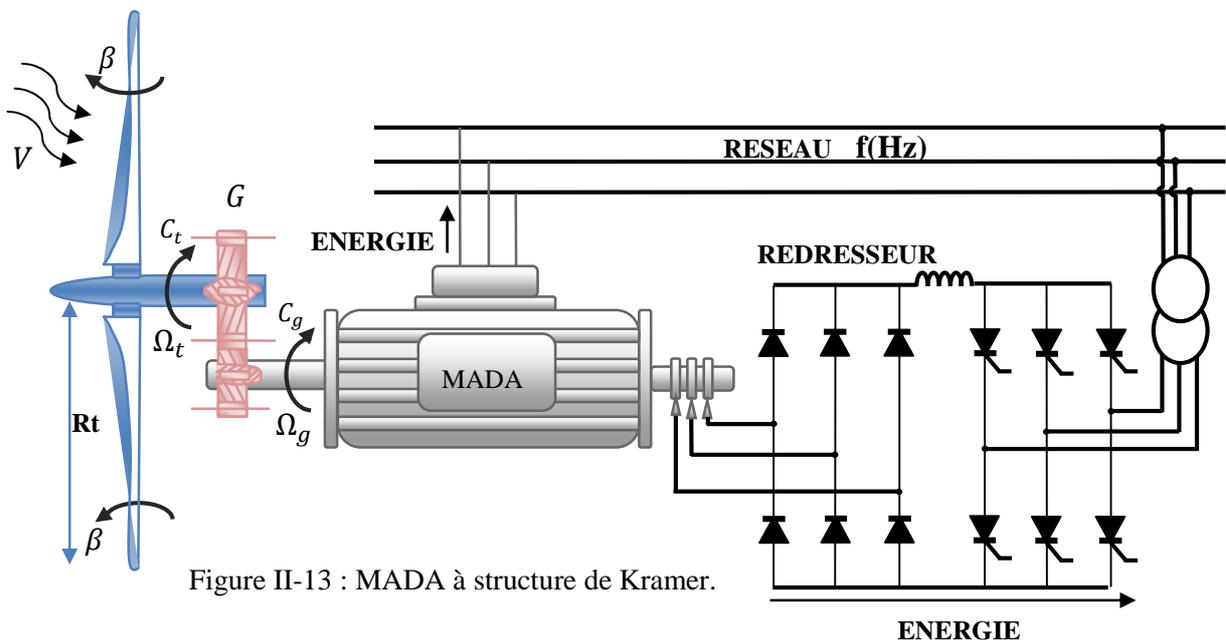


Figure II-13 : MADA à structure de Kramer.

II.4.2.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur :

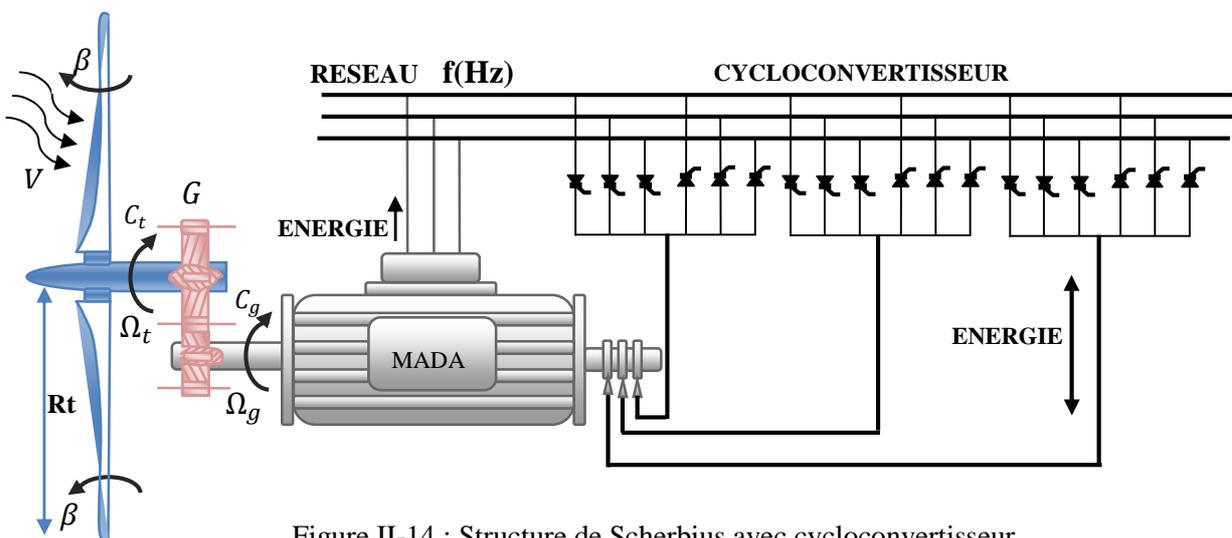


Figure II-14 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Pour rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'utilisation de cycloconvertisseur permet d'avoir une plage de la vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme [POI 03]. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif.

II.4.2.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [POI 03, SEG 06].

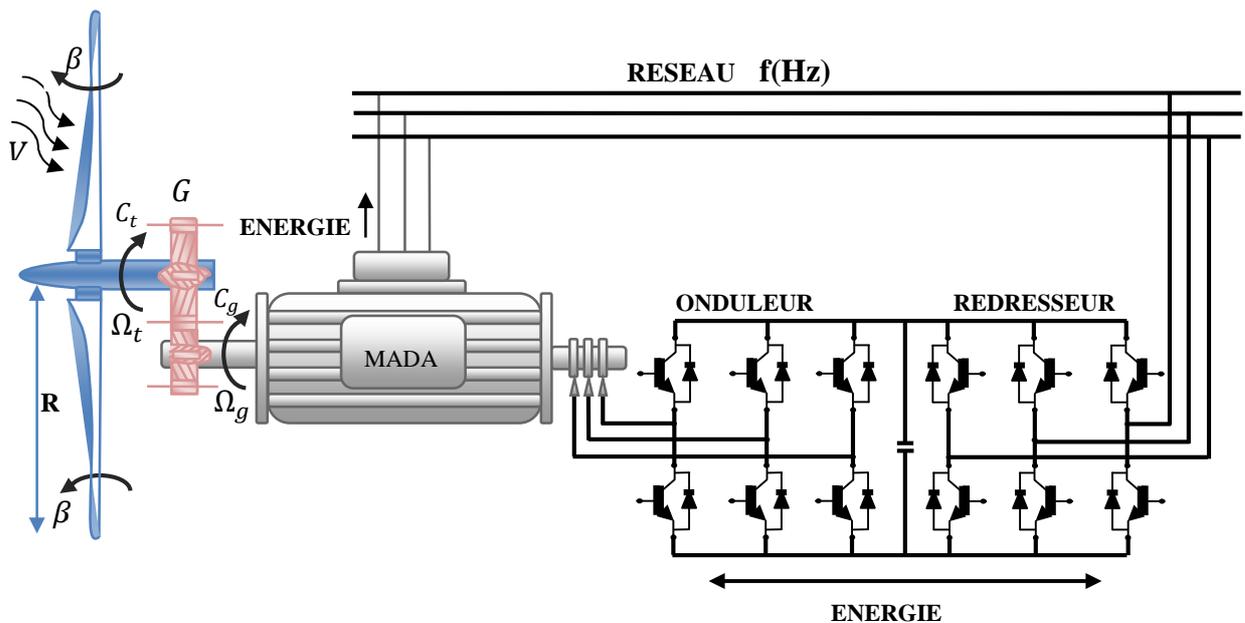


Figure II-15 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

La réversibilité de puissance du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, les convertisseurs sont alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance [VID 04, DRI 05, MUL 06]. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

II.5 Avantages et inconvénients de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

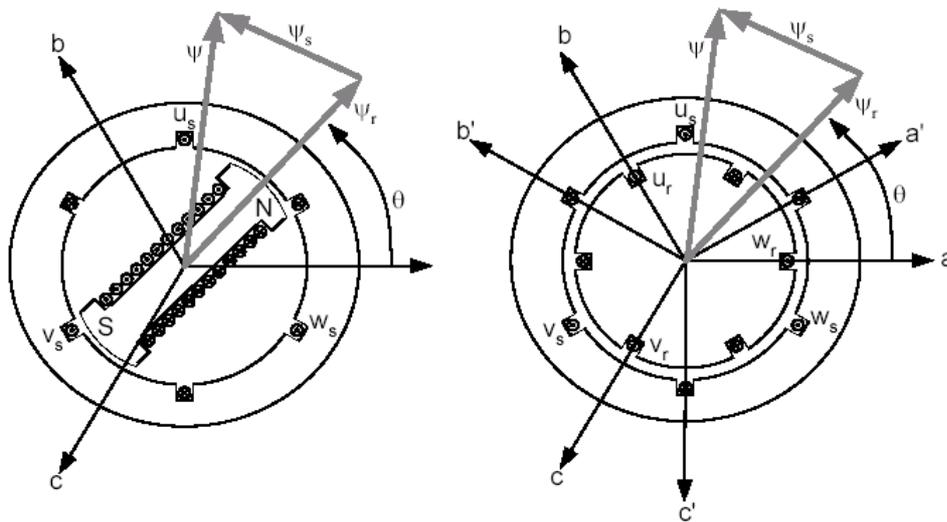


Figure II-16 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux φ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques φ_s et du flux rotorique φ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique φ_r qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système [POI 03].

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

II.5.1 Avantages de la MADA : [GWE 10]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- 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) ;
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ;
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ;
- 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.

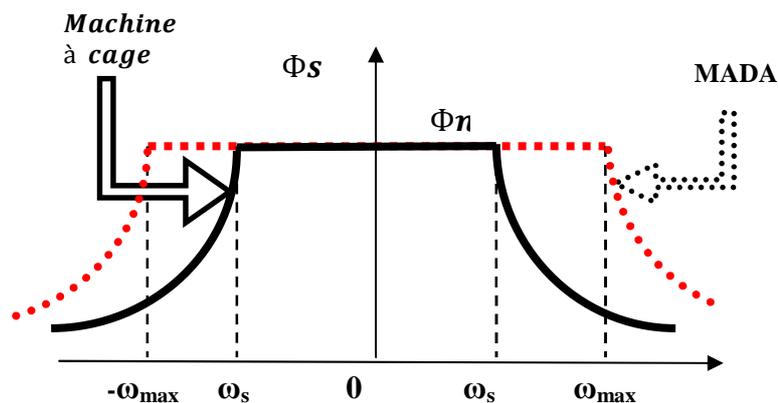


Figure II-17 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA [SAL 07].

II.5.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- 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 plus envisagées dans l'industrie.

II.6.1 Application moteur :

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 [KHO 06] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

II.6.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quelque soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions [KHA] ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

II.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation:

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible et identique au stator. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles.

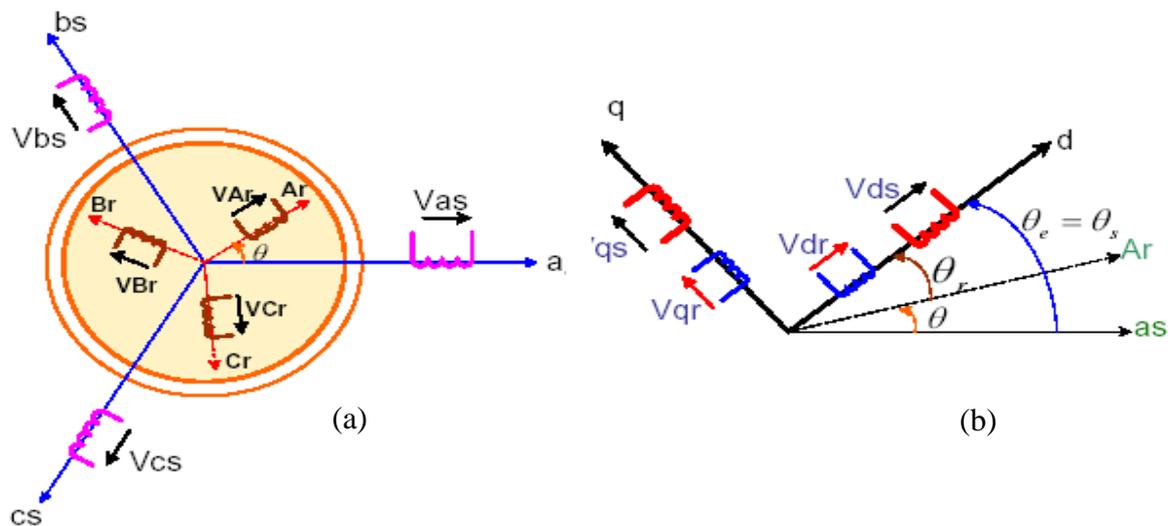


Figure II-18 : Représentation de la MADA dans les deux repères.

a) Représentation de la MADA dans le repère (abc) ;

b) Représentation de la MADA dans (dq).

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 élémentaires ;
- 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 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA :

II.7.2.1 Equations électriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

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

Où R_s et R_r sont respectivement la résistance des enroulements statoriques et rotoriques.

Et les équations des flux sont données par :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] &= [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{aligned} \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

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

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

M_s , M_r : 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:

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

Avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$ et M_{sr} : est l'inductance mutuelle stator-rotor

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

En remplaçant les flux par leurs expressions dans (II.1), on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

II.7.2.2 Equations mécanique :

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

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II. 4})$$

Avec respectivement :

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

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

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]]$$

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

II.7.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q)

II.7.3.1 La Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal.

Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée « du repère (a, b, c) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ». La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Et on a $[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}]$

II.7.3.2 Application de la transformation de Park

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux (II.6) et des tensions (II.7) et (II.8)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

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

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} et φ_{rq} sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (w_e - w) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (w_e - w) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Où $w_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ et $w = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que : $\theta_e = \theta + \theta_r$

En choisissant le repère lié au champ tournant ($w_e = w_s$), car c'est le mieux adapté lors d'une étude de la commande des machines [ABB 06], on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

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_s Et w_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques ;

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

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II. 10})$$

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

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

II.7.4 Mise sous forme d'équation d'état

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

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (\text{II. 12})$$

$$\text{Avec :} \quad [X] = [\varphi_{sd} \quad \varphi_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^t ; \quad [U] = [v_{sd} \quad v_{sq} \quad v_{rd} \quad v_{rq}]^t ;$$

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

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

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

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

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3] \quad (\text{II. 13})$$

Telle que :

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

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 4 KW.

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.19), (II.20), (II.21), (II.22) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques et sont résultante, les composante du courant statoriques et rotoriques.

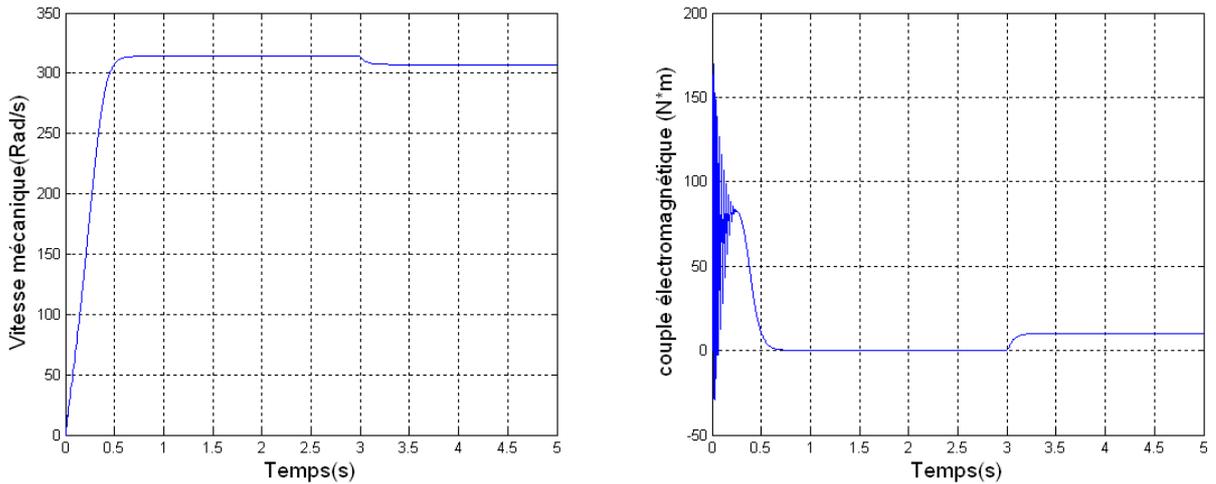


Figure II-19 : Vitesse et le couple électromagnétique.

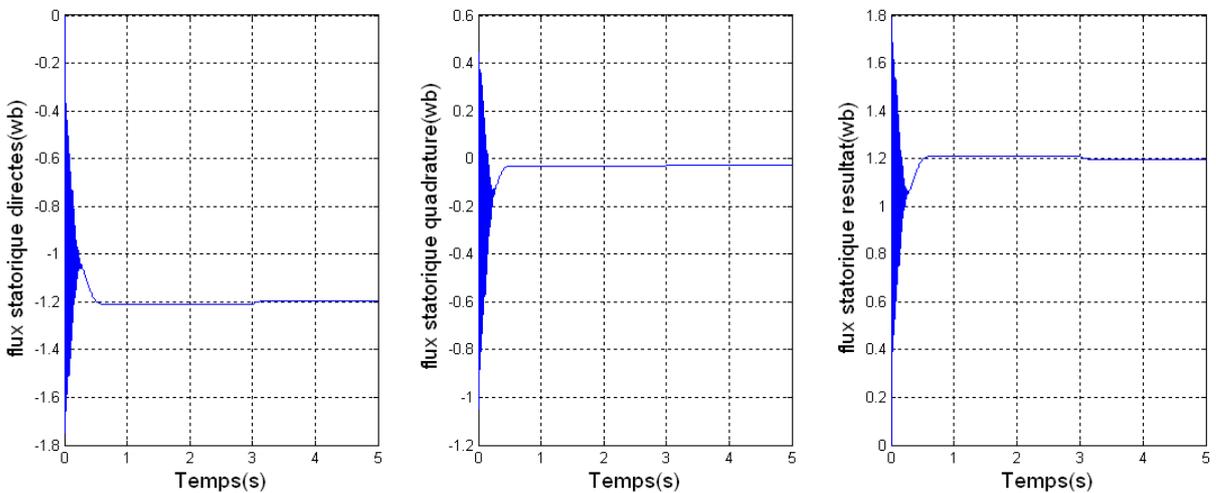


Figure II-20 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

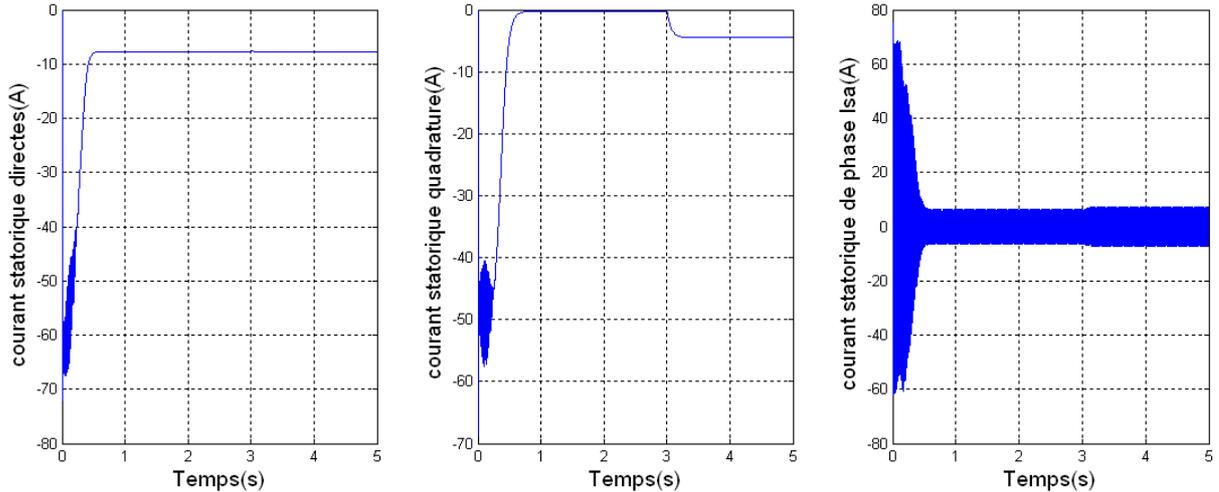


Figure II-21 : Les composantes du courant statoriques.

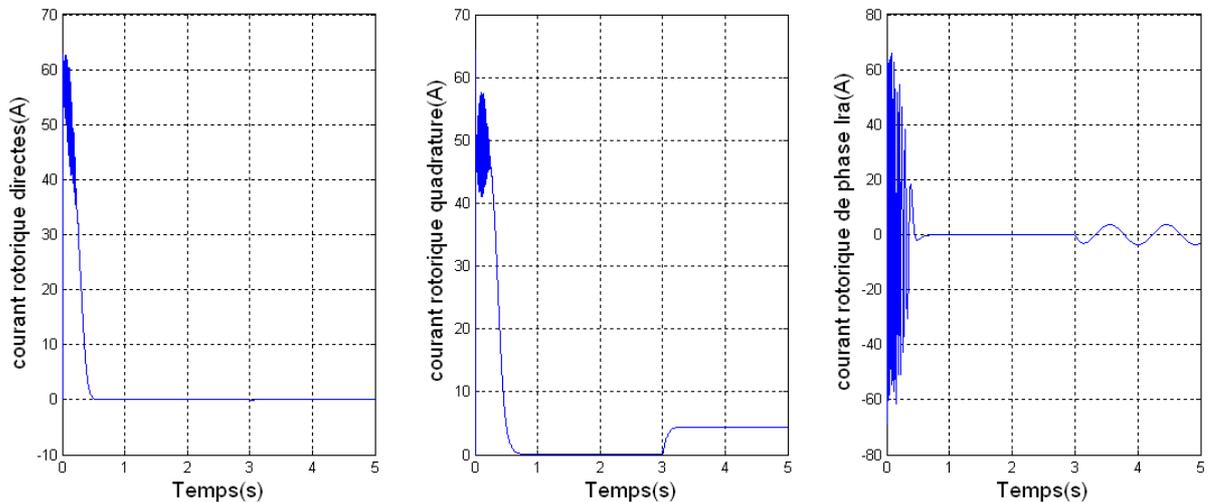


Figure II-22 : Les composantes du courant rotoriques.

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.19) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (Figure II.22) (un très faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure II.19) (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.21) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques (vérification de la relation $fr = gfs$). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone.

II.8.3 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

Les figures ci dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 *tr/min*, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

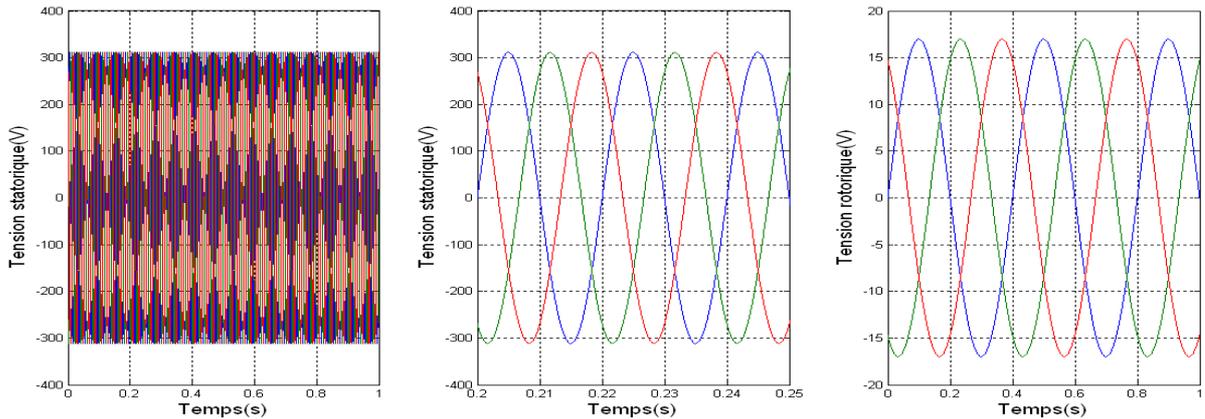


Figure II-23 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.

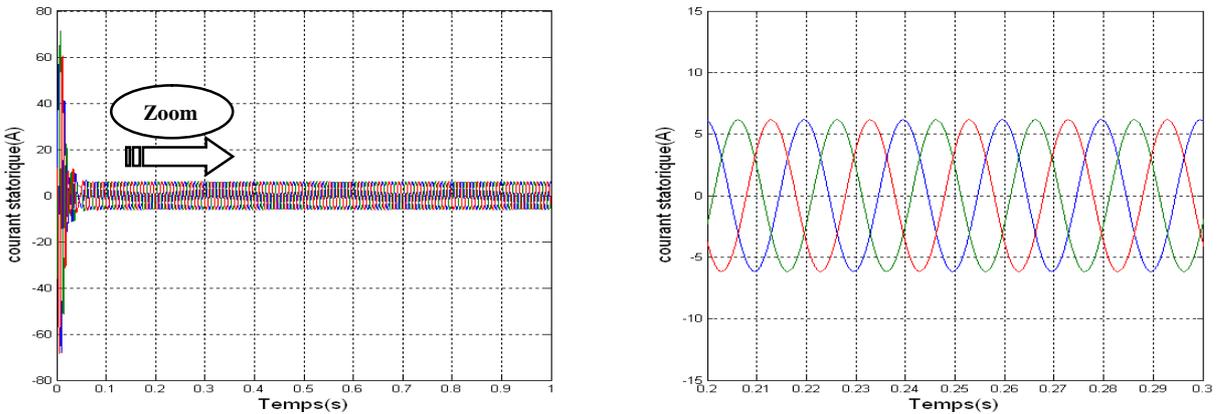


Figure II-24 : Les courants statoriques triphasées avec un zoom.

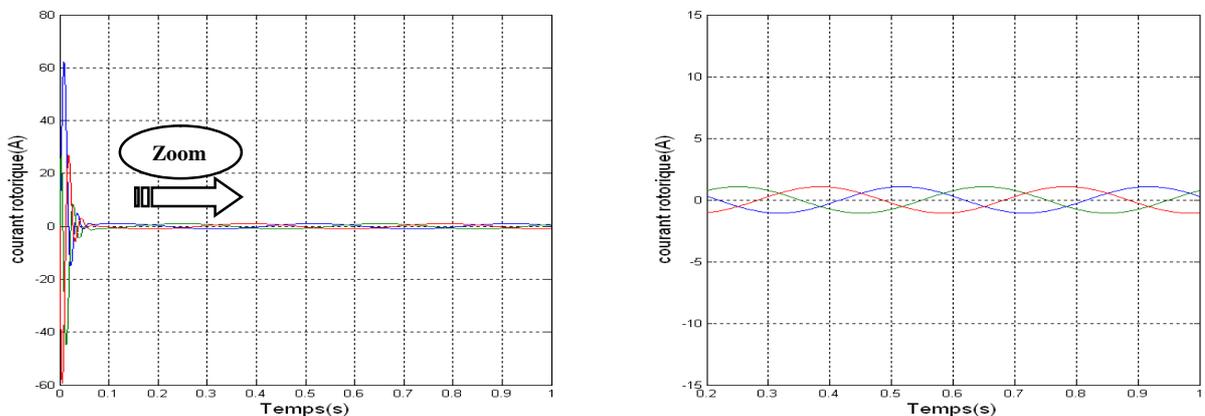


Figure II-25 : Les courants rotoriques triphasées avec un zoom.

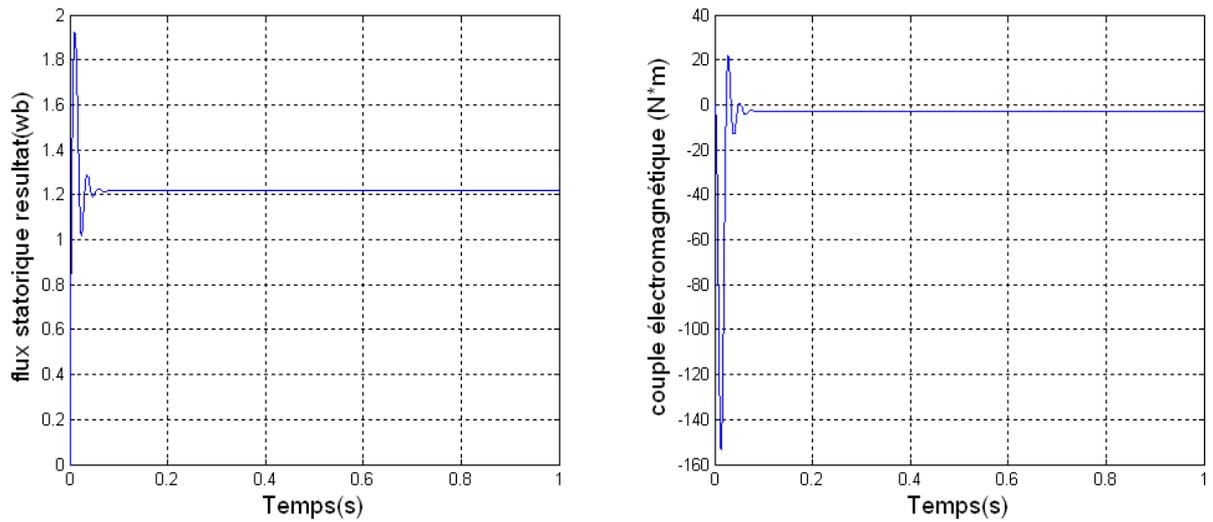


Figure II-26 : Le couple électromagnétique et le flux

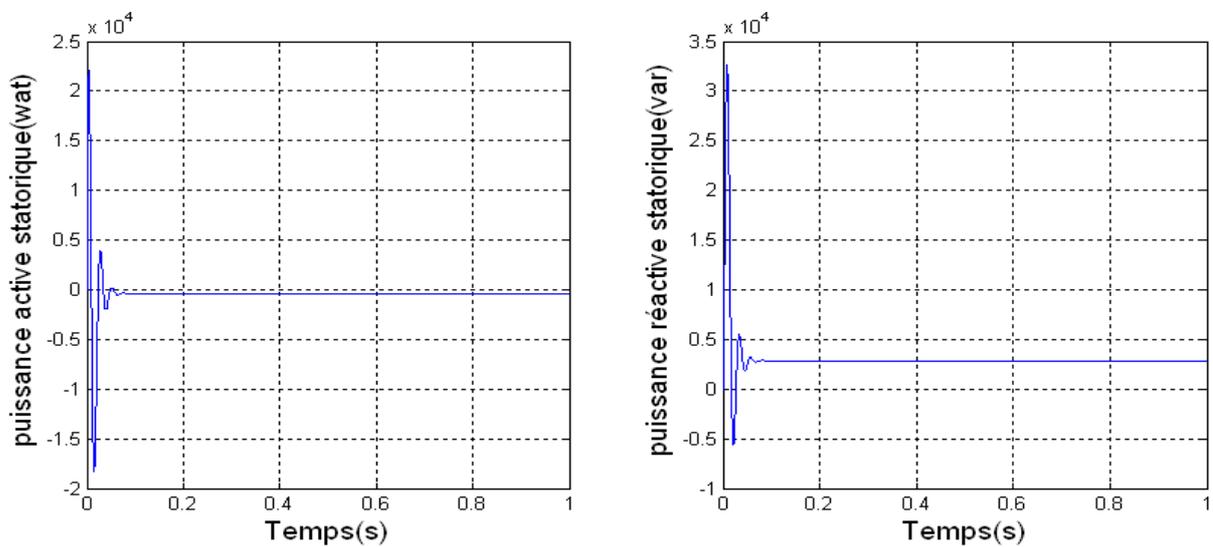


Figure II-27 : La puissance active et réactive statorique.

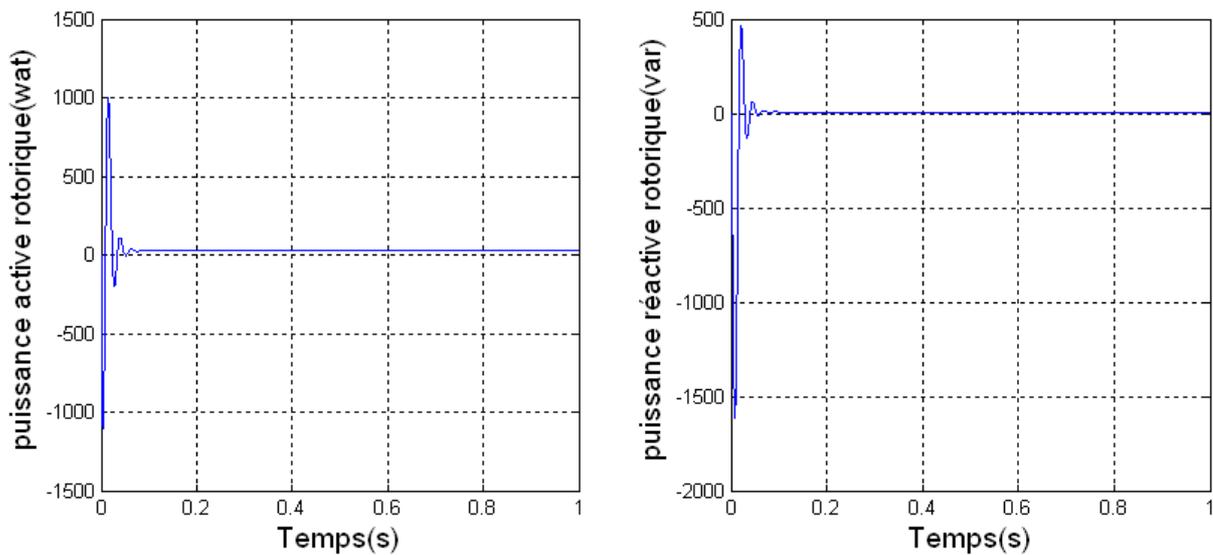


Figure II-28 : La puissance active et réactive rotorique.

II.8.4 Interprétation des résultats

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

II.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut procurer cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons étudié les possibilités qu'elle offre en fonctionnement moteur et génératrice dans les quatre quadrants.

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

Le modèle de la MADA 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 simplifier.

Les résultats de simulation montrent que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Ainsi l'étude comparative entre les deux modes de fonctionnement de la MADA faite apparaît la stabilité pour le cas de fonctionnement générateur par rapport au moteur.

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 ACTIVE ET REACTIVE

III.1 INTRODUCTION:

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [CHE 90].

Dans cette optique, nous avons proposé 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 [POI 03].

III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique.

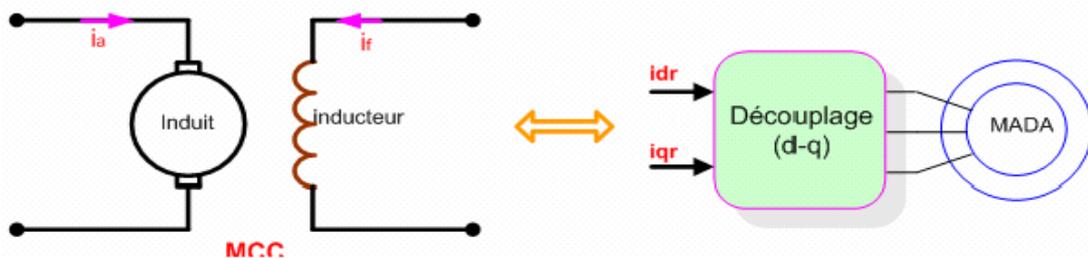


Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle.

III.3 MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [BOY 06, BOU 08, QUA 08].

Rappelant le système d'équations différentielles (II.9), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

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

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 [AOU 09] :

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

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 [BOY 06, BOL 06, GHE 08] :

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

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

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

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

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques (équation(III.4)), Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

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

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.

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

Il ressort de l'expression (III.8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique

D'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ imposée par le réseau [POI 03].

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

Les équations (III. 8), (III. 12) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (III-2).

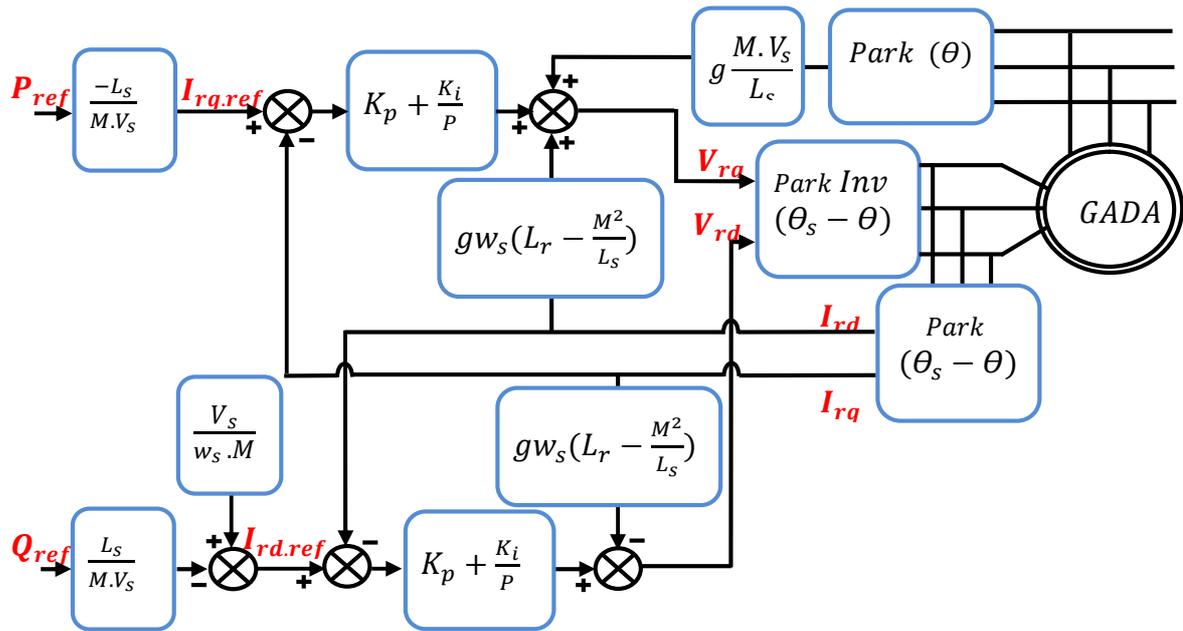


Figure III-2 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimenté en tension

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. 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 [POI 03].

III.3.5 Type de 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 systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans (l'annexe B). Dans notre cas, la variable Y à contrôler est remplacée par I_{rq}, I_{rd}, P_s et Q_s .

III.3.6 Résultats de Simulation du système sans turbine

Ce paragraphe va permettre d'analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse (vérification de découplage) avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P_s = -3000W$ entre $t = 1s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive $Q_s = 1000 VAR$ 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.

- ❖ 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 $-3000W$)
- ❖ Entre les instants $t = 2s$ et $t = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR)

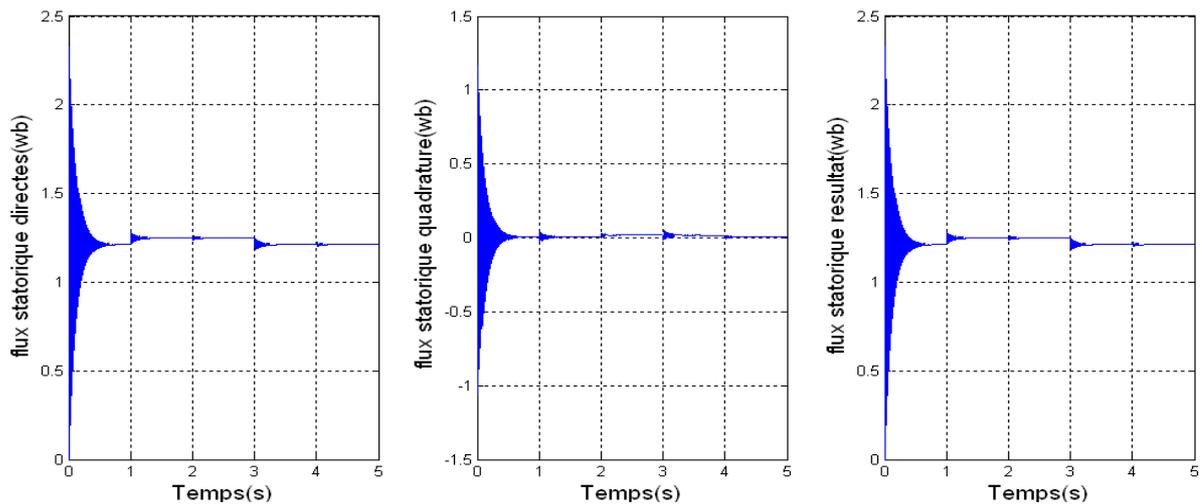


Figure III-3 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

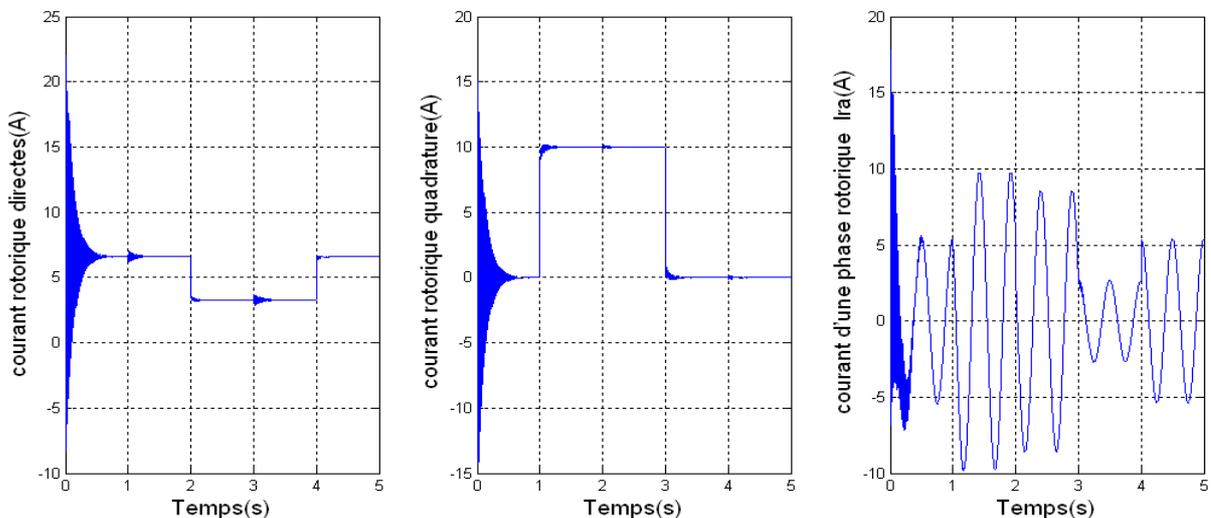


Figure III-4 : Les composantes du courant rotoriques.

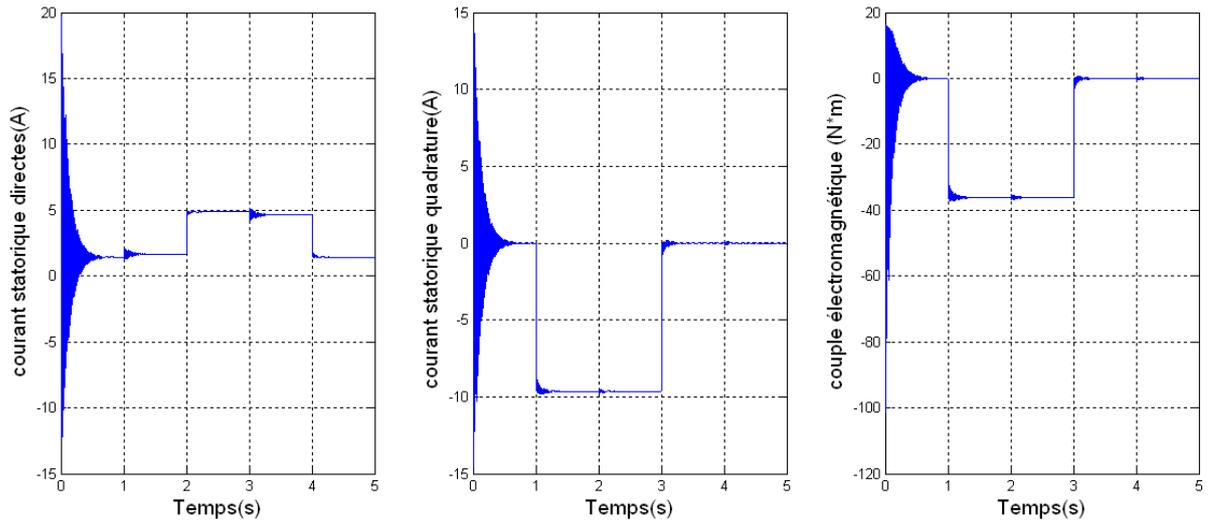


Figure III-5 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

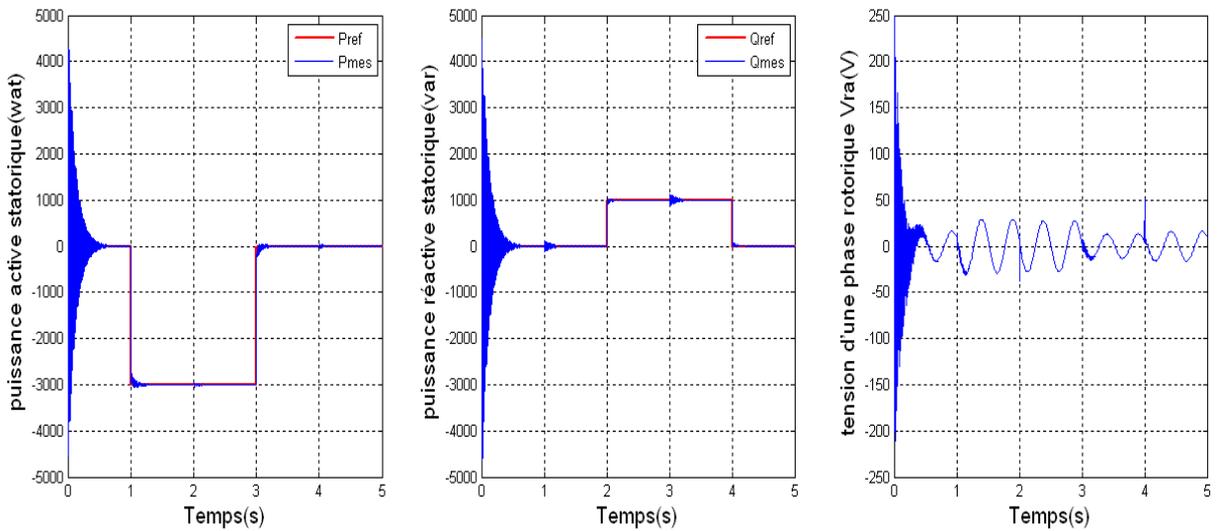


Figure III-6 : La puissance active et réactive statorique et la tension d'une phase rotorique.

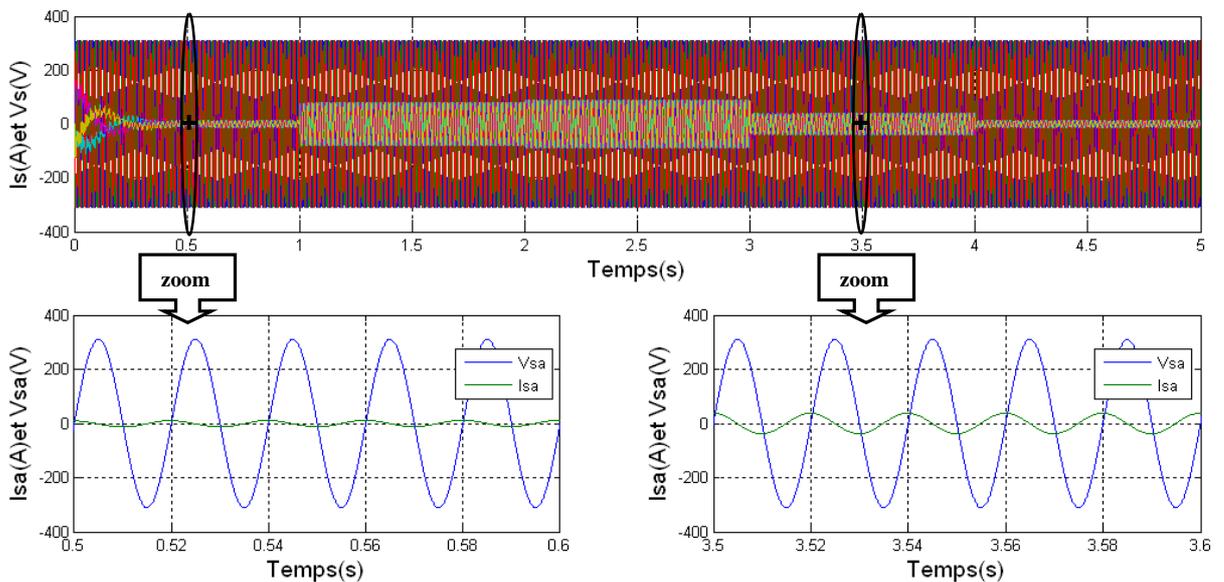


Figure III-7 Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les différent instant.

III.3.7 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique I_{rq} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe I_{rd} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- ✓ 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.
- ✓ 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.

Nous pouvons également observer la présence d'une erreur statique sur les deux axes ceci est du au fait que dans ce mode de contrôle, la puissance n'est pas mesurée directement mais est plutôt reconstruite à partir de la mesure des courants rotoriques. Ce sont en fait ces mêmes courants qui sont asservis. 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-7) qui représente un courant et une tension d'une même phase statorique (la phase a).

Les deux composantes du courant au rotor sont commandées par deux PI donnant les références de la tension au rotor .Cette tension est ensuite commandées par une MLI

III.3.8 Résultats de Simulation du système avec turbine

Le teste de performance de la chaine éolienne sans onduleur est fait en considérant un vent de vitesse variable. La machine étant raccordée à un réseau de moyenne puissance d'une tension nominale efficace de $220V$ et d'une fréquence de $50 Hz$. Les résultats de simulation de la chaine éolienne sans onduleur sont représentés sur les figures ci dessous.

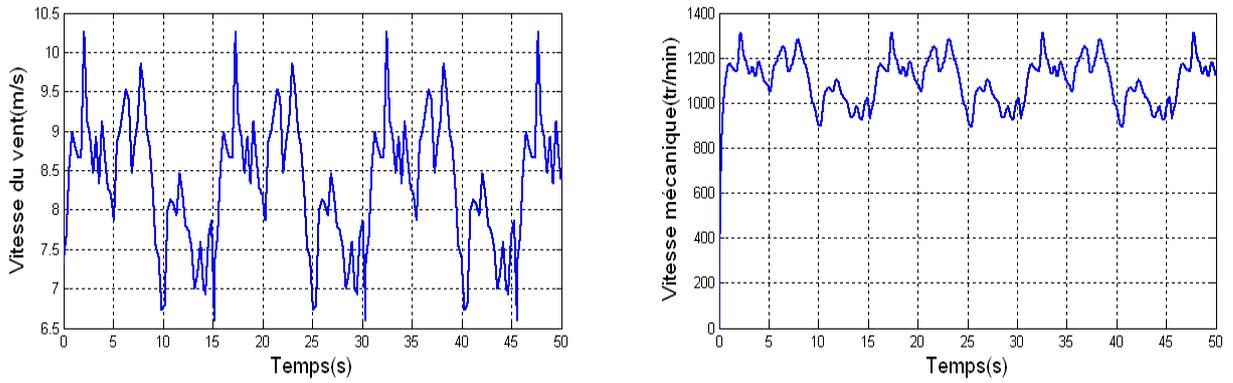


Figure III-8 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.

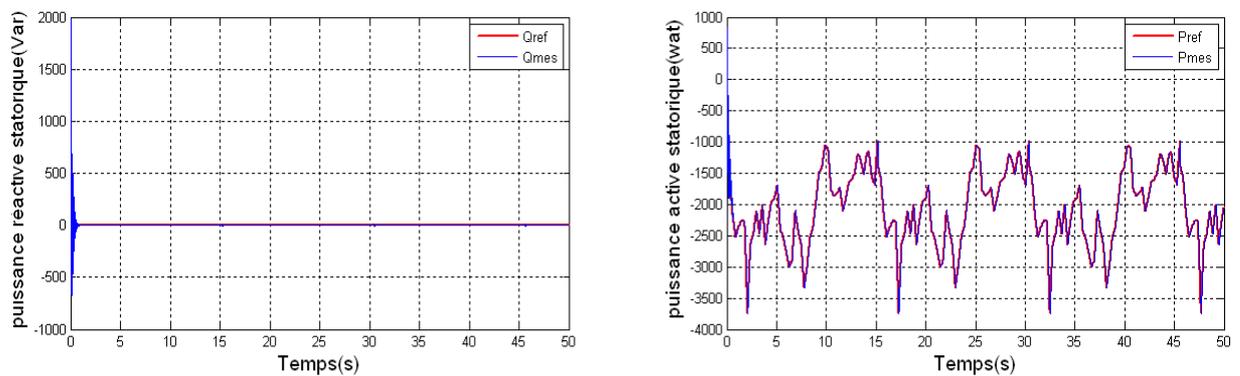


Figure III-9 : La puissance active et réactive statorique.

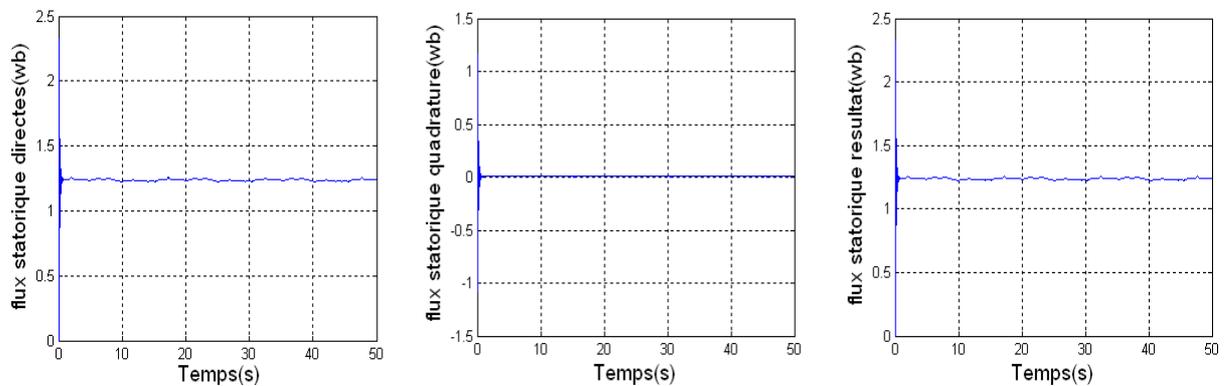


Figure III-10 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

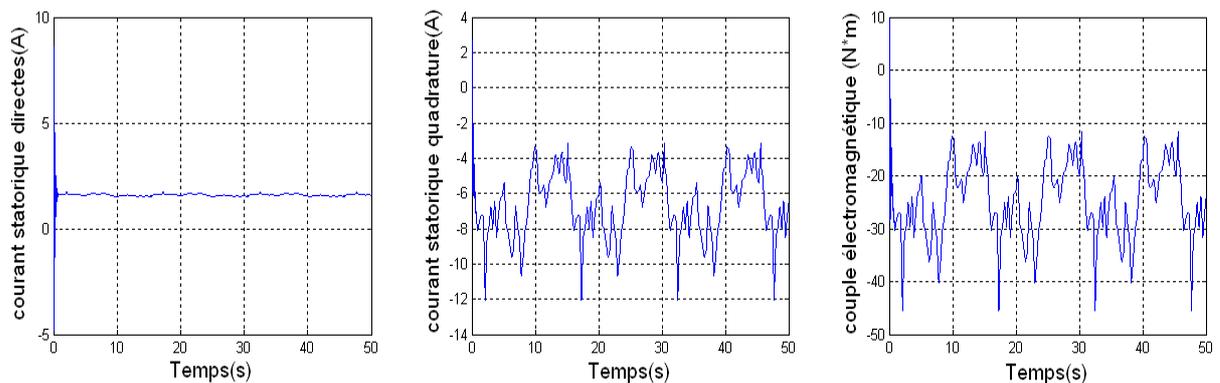


Figure III-11 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

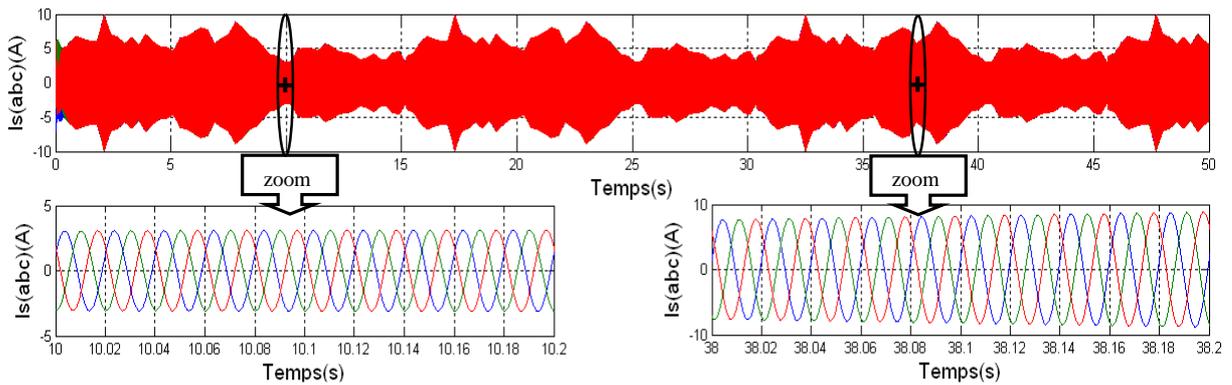


Figure III-12 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les défèrent instant.

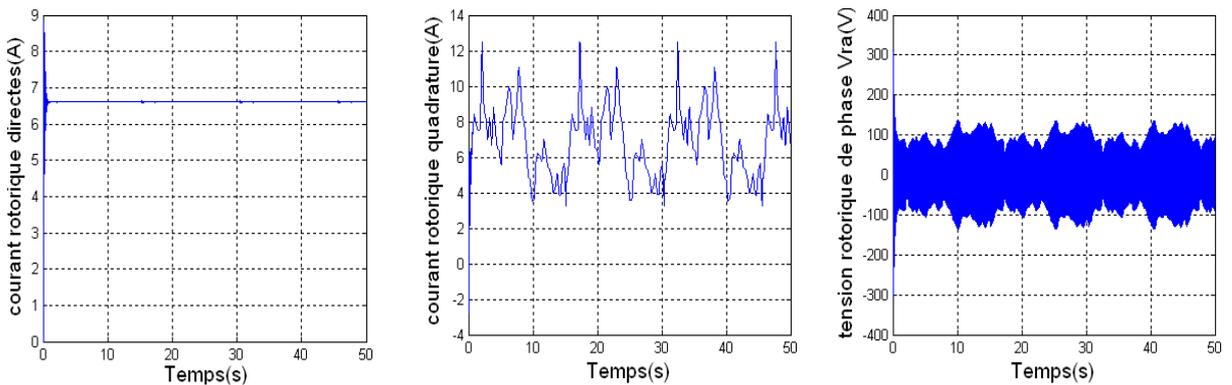


Figure III-13 : Les composantes du courant rotoriques et la tension d'une phase rotorique.

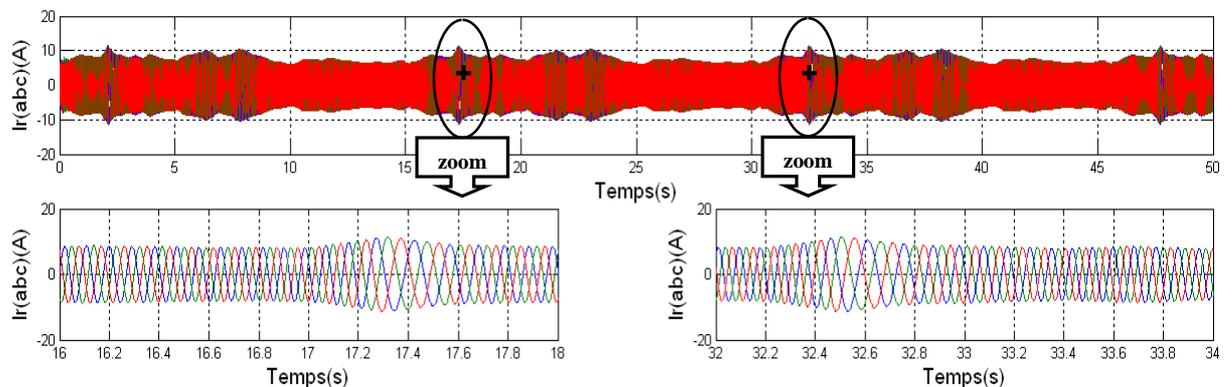


Figure III-14 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les défèrent instant.

III.3.9 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.4 Commande Vectorielle De La Gada Avec Un Onduleur A Deux Niveaux

L'alimentation de la MADA nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique pour l'entraîner à vitesse variable. Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée.

III.4.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les six interrupteurs électroniques représentés, et que nous supposons parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage.

On peut remplacer chaque groupe transistor-diode de la figure (III. 15.A) par des interrupteurs k_j avec ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), on obtient le schéma simplifié pour chaque onduleur comme l'indique la figure (III. 15. B).

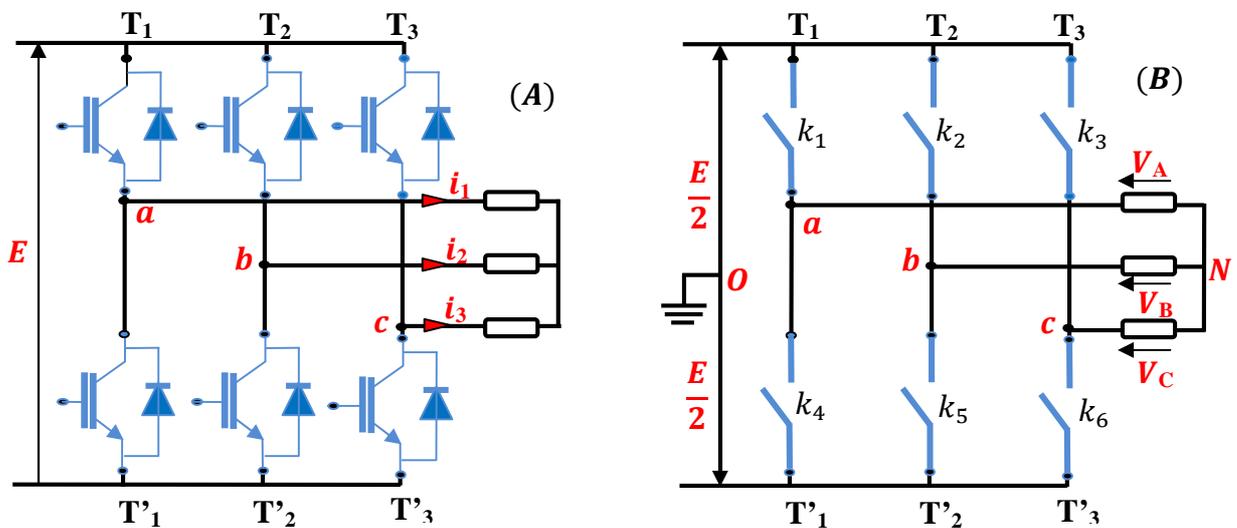


Figure III-15: Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Afin d'éviter de court circuiter la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaires. Pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage est du type étoile sans neutre (bien que le branchement d'une charge en triangle soit envisageable). Ainsi les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminées, et 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.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

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

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

donc : $V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON} = 0$

d'où : $V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO})$ (III. 14)

On remplace (III. 14) dans (III. 13), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

On peut écrire le système (III. 15) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 16})$$

avec : $\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases}$ (III. 17)

$$\text{telque : } \begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé} & \text{si nom } S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé} & \text{si nom } S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé} & \text{si nom } S_3 = -1 \end{cases} \quad (\text{III. 18})$$

On remplace (III. 17) dans (III. 16) on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 19})$$

Le système (III. 19) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

III.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (*MLI*), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI *triangulo – sinusoidale* présentée en [ZIN]. Les commandes des interrupteurs du convertisseur sont définies à l'aide d'un algorithme comportant uniquement des expressions algébriques, directement adaptables à un système numérique de contrôle.

L'objectif principal de la commande consiste à comparer chacune des trois tensions sinusoidales de référence que nous souhaitons imposer (ondes modulantes ondulantes $V_{ri}(t), i = 1, 2, 3$) par un signal triangulaire de haute fréquence (porteuse). Les intersections des ondes modulantes avec l'onde triangulaire, déterminent les impulsions de commande (S_1, S_2, S_3) de l'onduleur.

III.4.3 Résultats de simulation numérique du système sans turbine

Les résultats de simulation présenter sur les figure ci-dessous, nous permet de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie *triangulo – sinusoidal*, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000W$ entre $t = 1s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive $Q = 1000$ entre $t = 2s$ et $t = 4s$ pour fréquence de porteuse ($f_p = 1KHz$).

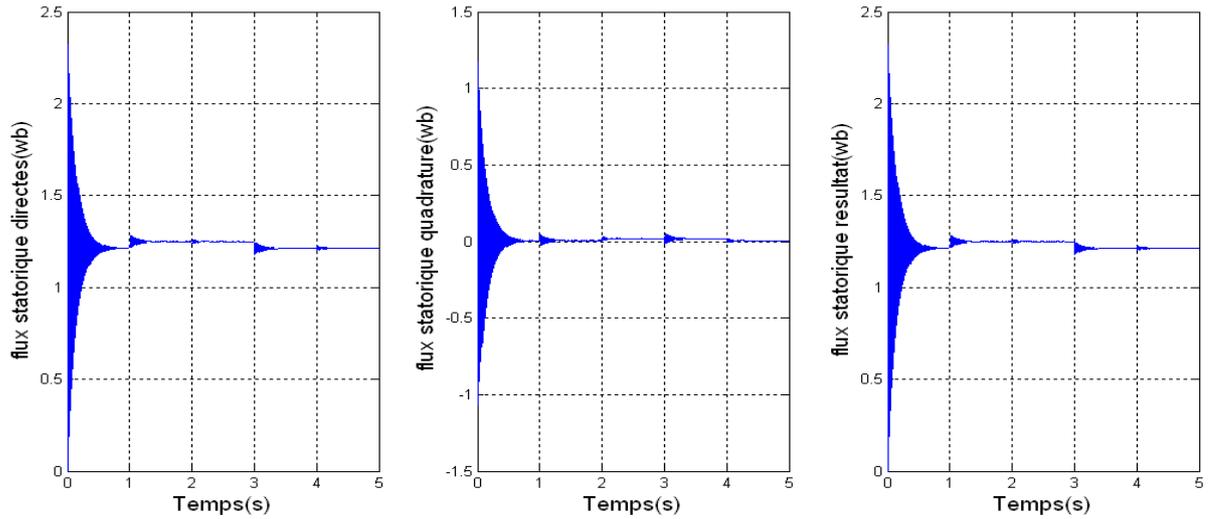


Figure III-16 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

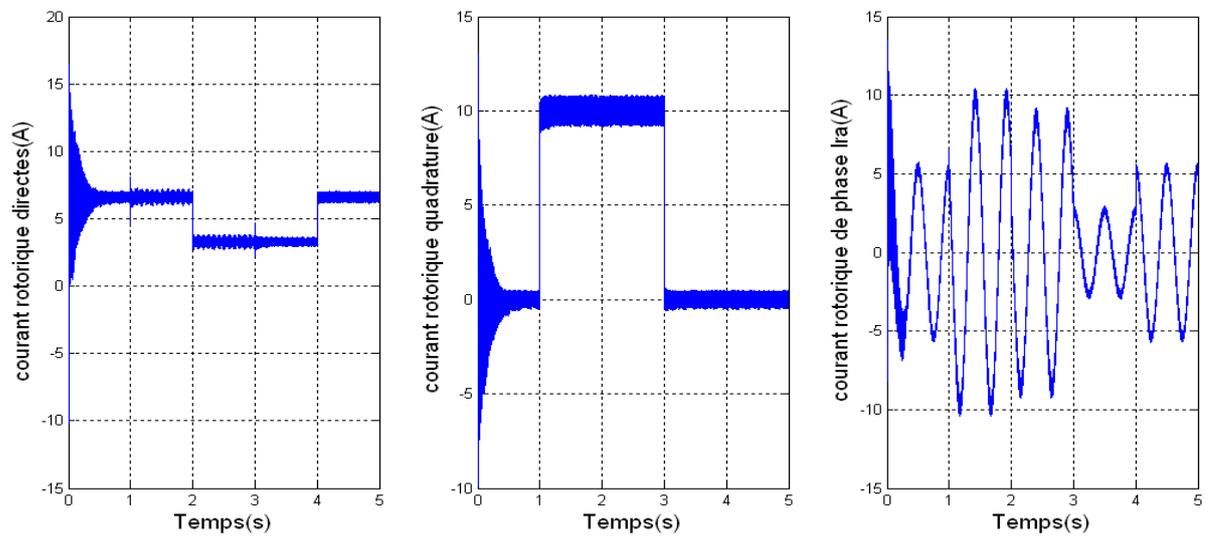


Figure III-17 : Les composantes du courant rotoriques.

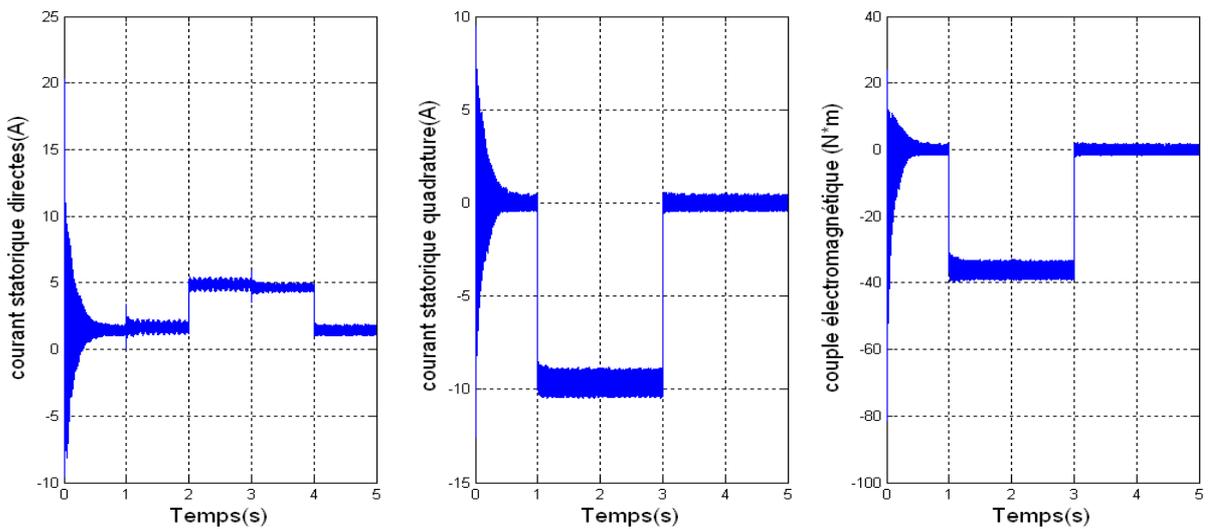


Figure III-18 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

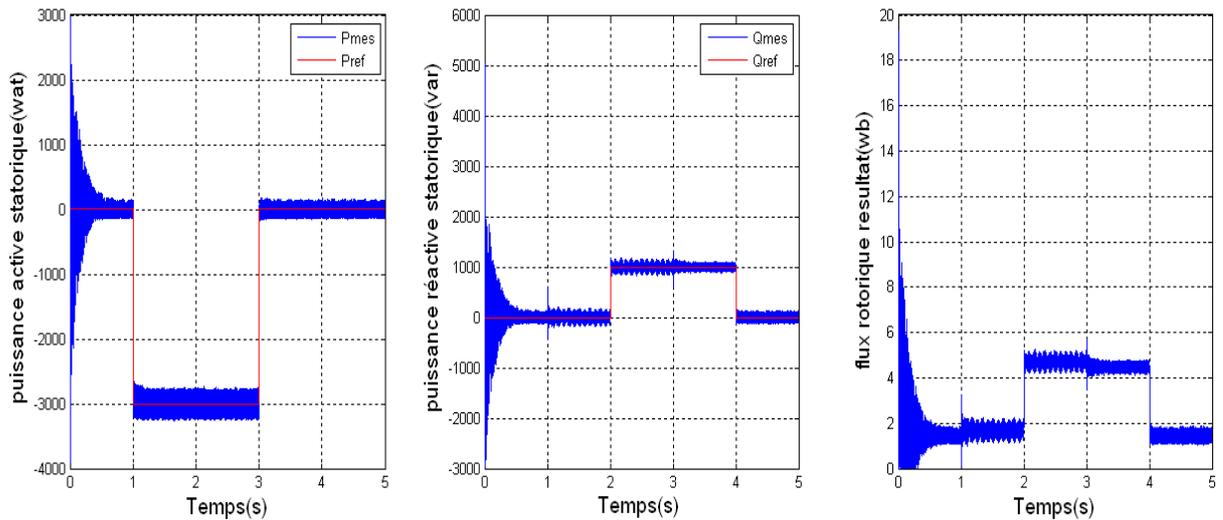


Figure III-19 : La puissance active et réactive statorique et flux rotorique résultat.

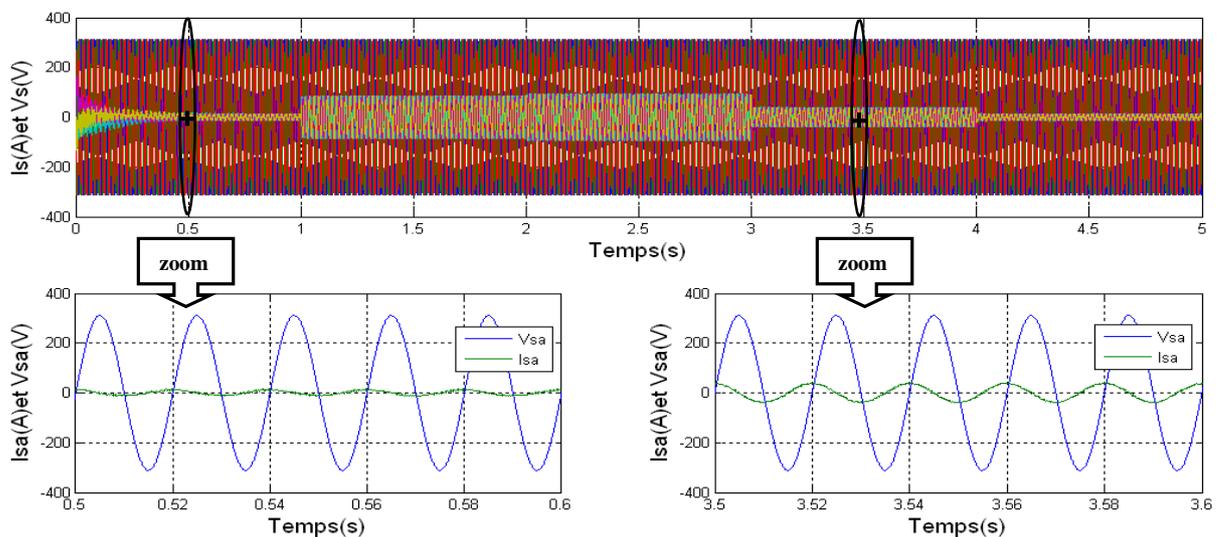


Figure III-20 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les différent instant.

III.4.4 Interprétation des résultats

- Les figures ci dessus montrent les variations des différentes grandeurs lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations.
- la tension obtenue à la sortie de l'onduleur à MLI fait apparaître clairement deux seuils correspondant à $1/3$ et $2/3$ de $400V$ valeur de la tension du bus continu.
- Les puissances actives et réactives et les courants idr et iqr s'identifient à leurs références, de même pour le couple électromagnétique qui atteint au démarrage une valeur maximale de $-120N.m$
- La fréquence des courants rotoriques vaut $g.fs = 2Hz$
- Des faibles oscillations pour une fréquence de porteuse $fp = 1KHz$

III.4.5 Schéma synoptique du système

Le teste de performance de la chaîne éolienne avec onduleur est fait en considérant un vent de vitesse variable. Nous permet de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie (*triangulo – sinusoidal*) Les résultats de simulation de la chaine éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

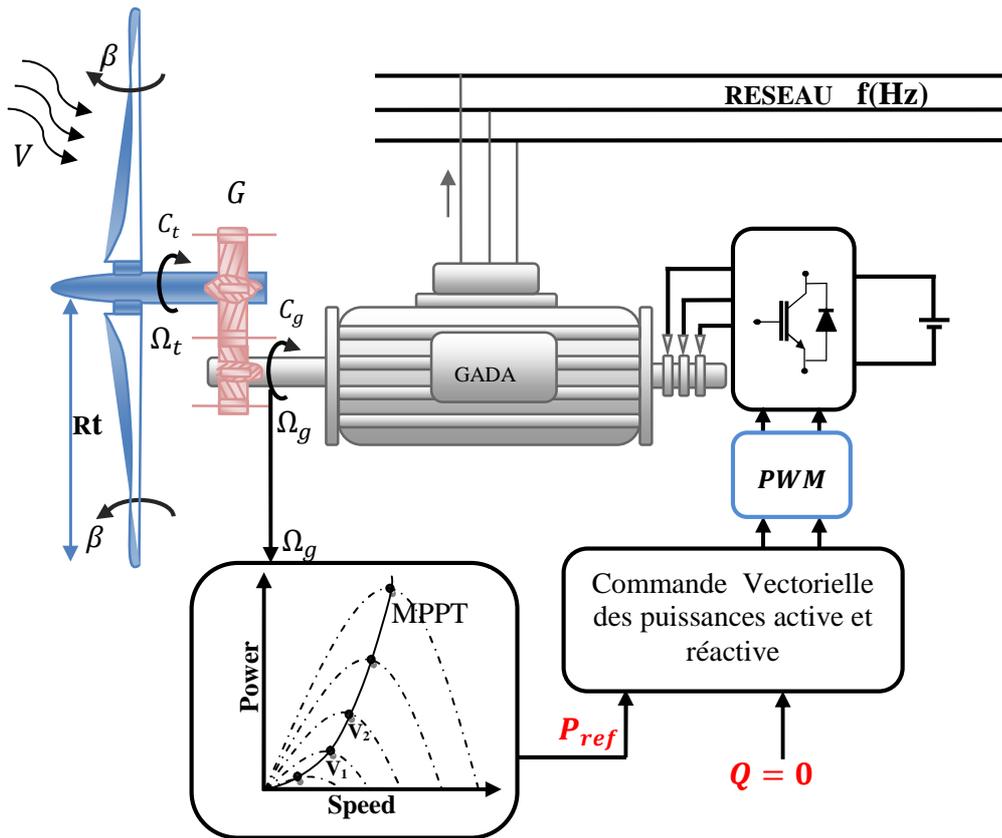


Figure III-21 : Schéma synoptique du système (onduleur & GADA & turbine)

III.4.6 Résultats de simulation numérique du système avec turbine

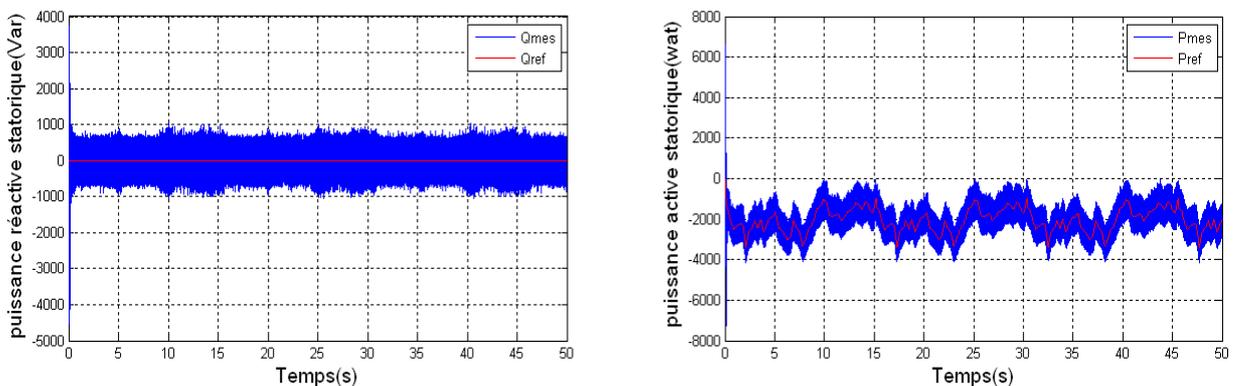


Figure III-22 : La puissance active et réactive statorique.

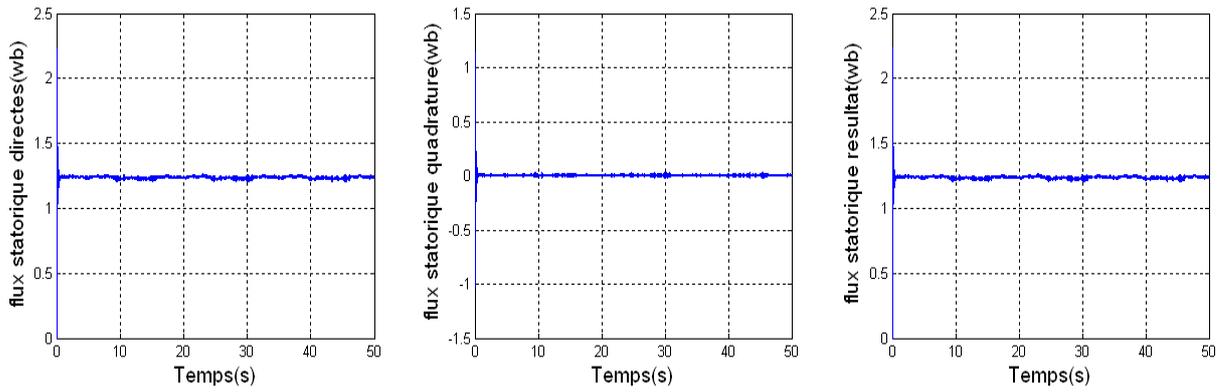


Figure III-23: Les composantes du flux statorique avec son résultant.

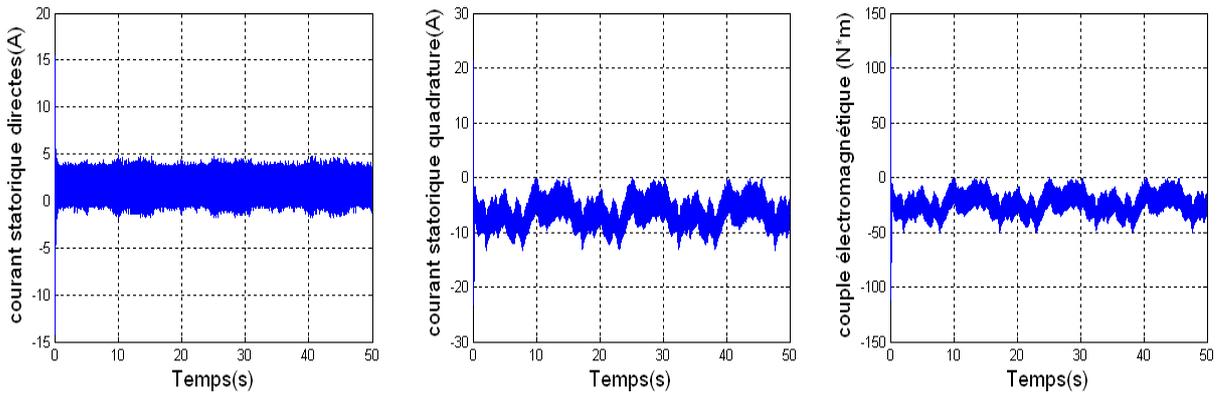


Figure III-24 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

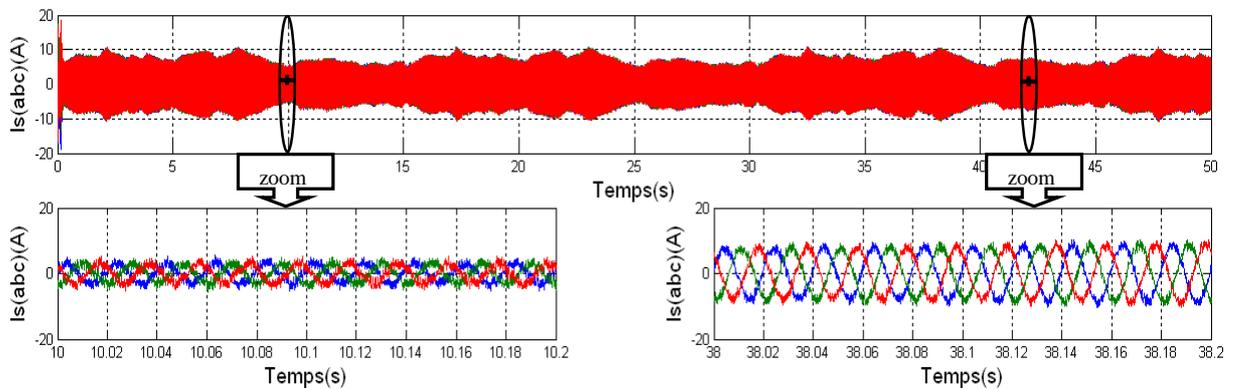


Figure III-25 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différent instant.

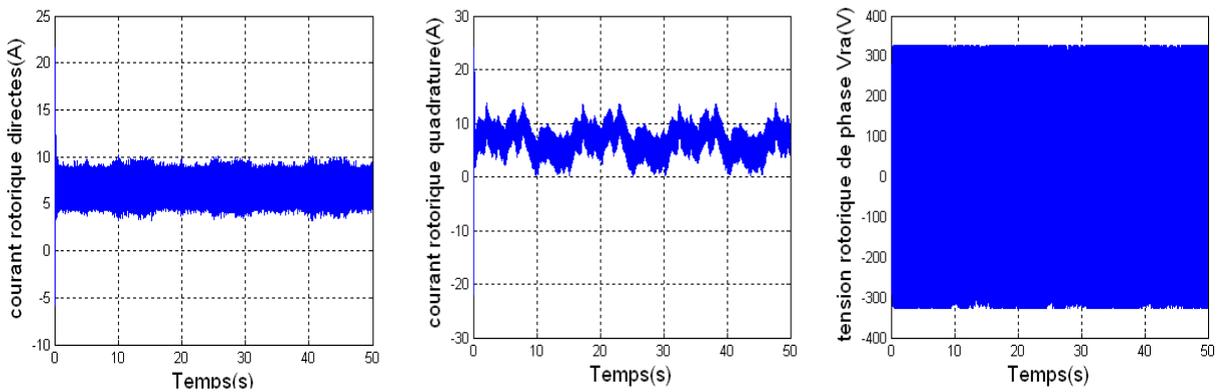


Figure III-26 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulée rotorique..

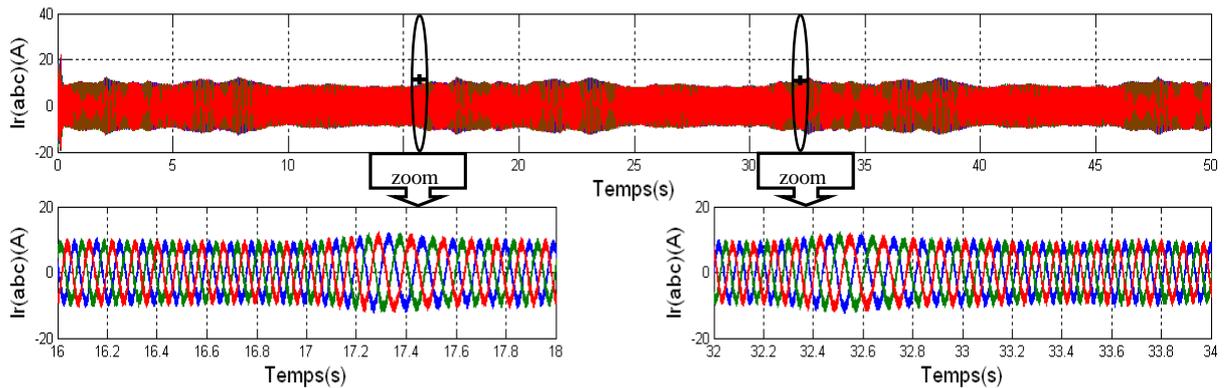


Figure III-27 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les défèrent instant.

III.4.7 Interprétation des résultats

Les performances de la chaîne éolienne avec onduleur à deux niveaux connectent au rotor de la MADA qui est entraîné par une turbine éolienne, sont montrées par les figures ci dessus. La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine. On remarque 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.

- la tension obtenue à la sortie de l'onduleur à MLI fait apparaître clairement deux seuils correspondant à $1/3$ et $2/3$ de $400V$ valeur de la tension du bus continu.
- L'amplitude et la fréquence des courant rotoriques (Figure III-27) sont influencées par la vitesse mécanique (la vitesse de rotation de l'éolienne) selon les relations : $f_r = g \cdot f_s$ et $V_r = m \cdot g \cdot V_s$, où m est le rapport de transformation de la machine
- Des faibles oscillations pour une fréquence de porteuse $f_p = 1KHz$
- La durée sur laquelle les mesures sont effectuées (50s)
- les perturbations induites par l'onduleur ne permettent pas de distinguer des régulateurs (PI) en termes de temps de réponse.

III.5 Commande Vectorielle De La GADA Avec Un Convertisseur A Deux Niveaux

La structure de la cascade redresseur-onduleur-MADA est celle représentée sur la figure (II-15) au chapitre II. Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Le modèle du convertisseur connecté au rotor est déjà présenté précédemment, ces signaux de commande sont déterminés en appliquant la commande vectorielle à la MADA. Nous détaillons dans la suite principe de fonctionnement et la commande du convertisseur coté réseaux.

III.5.1 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

Le redresseur à MLI au 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 [NOU 01].

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.

III.5.2 Modélisation du redresseur à MLI

La structure du convertisseur est constituée de deux interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faible puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles [DJE 07]. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec diode.

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.

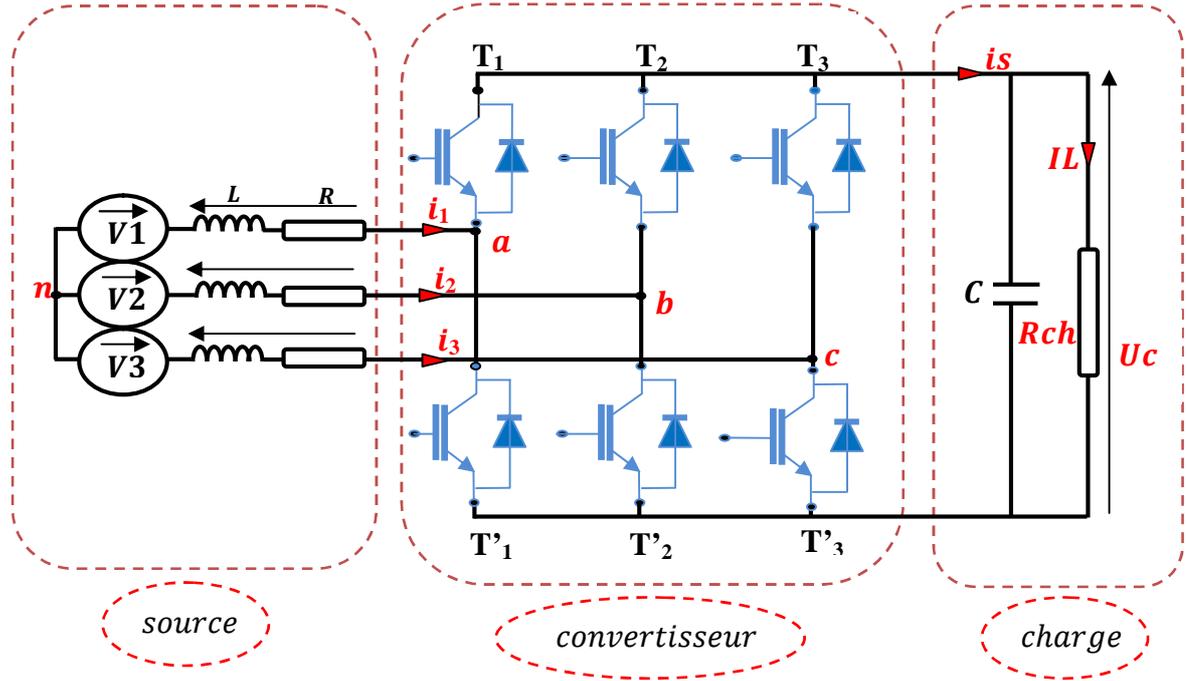


Figure III-28: Structure du redresseur à MLI

III.5.2.1 La source d'alimentation

C'est une *f.e.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 :

$$\begin{cases} V_1 = R * i_1 + L \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = R * i_2 + L \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = R * i_3 + L \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

Où 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 :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 21})$$

III.5.2.2 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. 19)

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (III. 22)$$

En plus le courant redressé est donné par :

$$i_s = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (III. 23)$$

III.5.2.3 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 :

$$\begin{cases} \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_L) \\ U_C = R_{Ch} \cdot i_L \end{cases} \quad (III. 24)$$

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

$$\frac{U_C}{i_s} = \frac{R_{Ch}}{1 + R_{Ch} \cdot C \cdot p} \quad (III. 25)$$

A partir des relations (III. 21), (III. 22), (III. 23) et (III. 25), on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (S_1, S_2, S_3) et comme sortie la tension redressée U_C .

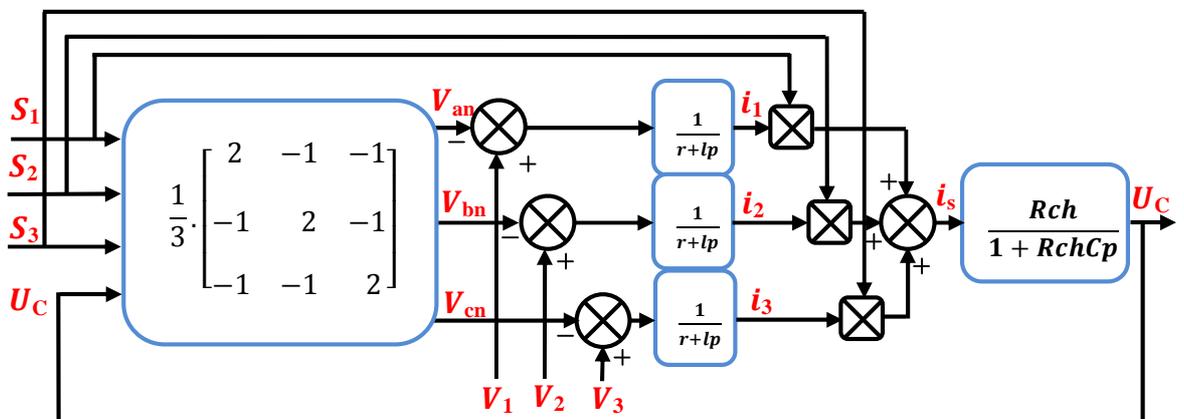


Figure III-29: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI

III.5.3 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...) [BEL 02].

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.5.3.1 Modélisation dans le repère (d, q)

Les équations régissant le système sont [RIO 96]:

$$\begin{cases} V_{pd} = V_d - R i_d - L \frac{di_d}{dt} + L\omega i_q \\ V_{pq} = V_q - R i_q - L \frac{di_q}{dt} - L\omega i_d \end{cases} \quad (\text{III. 26})$$

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.

ω : La pulsation du réseau. Et les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \cdot [V_d I_d + V_q I_q] \\ Q = \frac{3}{2} \cdot [V_q I_d - V_d I_q] \end{cases} \quad (\text{III. 27})$$

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

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 28})$$

Et on pose $P = U_c I_s$ et $Q = 0$.

Le schéma bloc de la régulation est alors représenté dans la figure suivant.

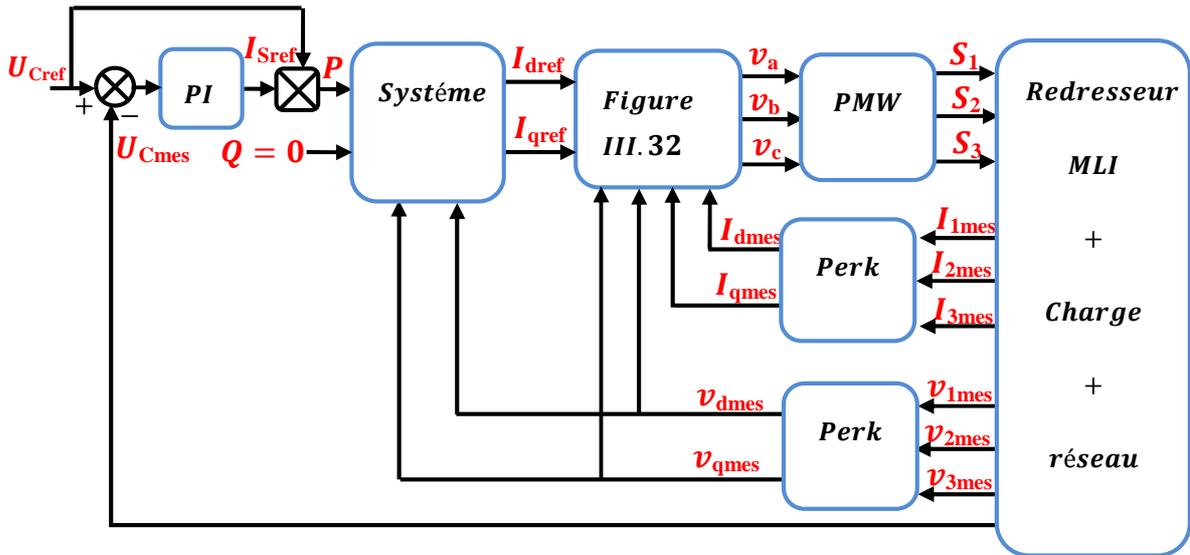


Figure III-30: Schéma bloc de la commande en cascade du redresseur à MLI

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. 26) »

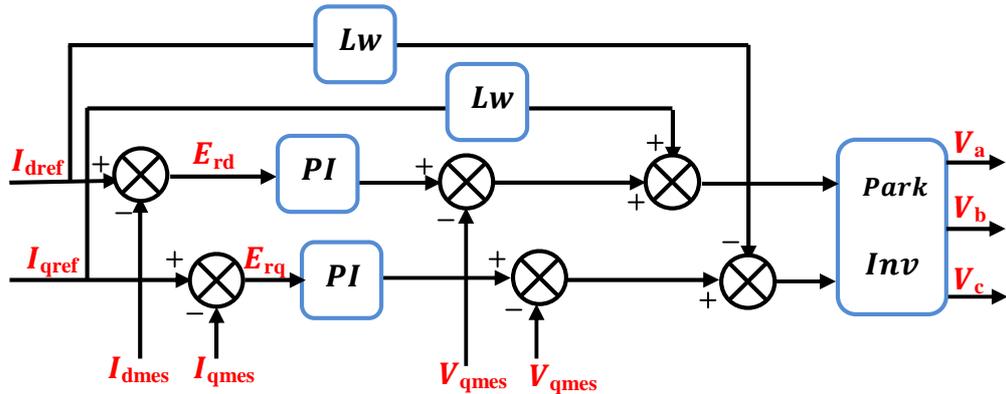


Figure III-31: Bloc de régulation des courants avec compensation de la tension réseau

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

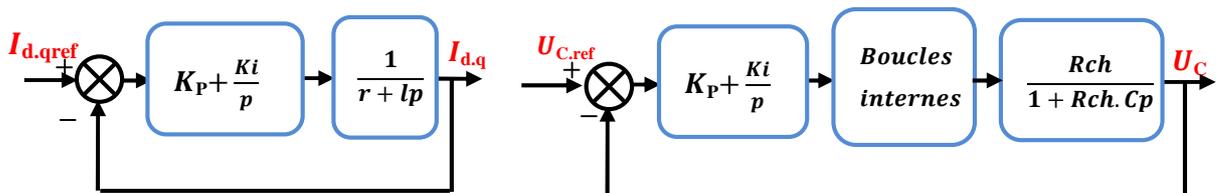


Figure III-32: Boucles de régulation équivalentes des courants et de la tension

III.5.3.2 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 : $C = 5\text{ mF}$
- Résistance de charge: $R_{ch} = 100\Omega$
- Fréquence de la porteuse MLI : $f_e = 5000\text{Hz}$

Les résultats obtenus sont les suivants :

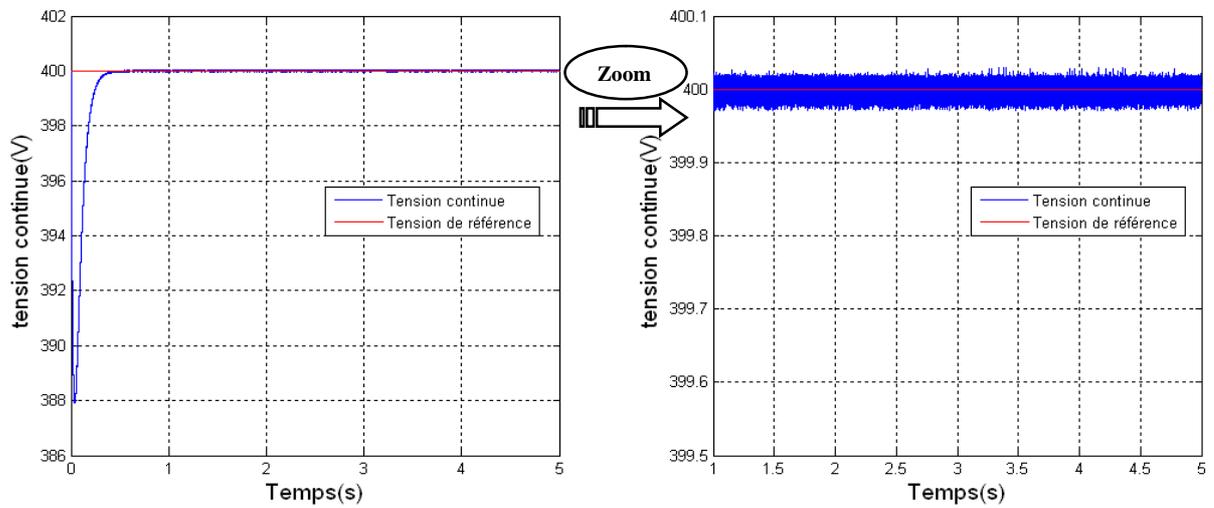


Figure III-33 : Tension du bus continu avec un zoom.

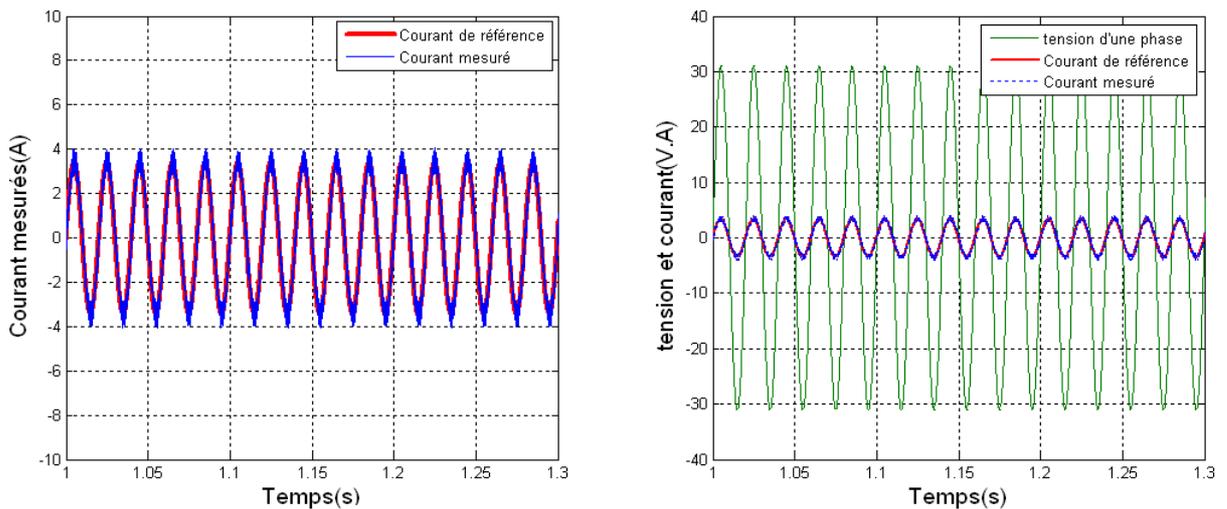


Figure III-34 : Courant et tension de ligne.

III.5.3.3 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.5.4 Résultats de simulation numérique du système sans turbine

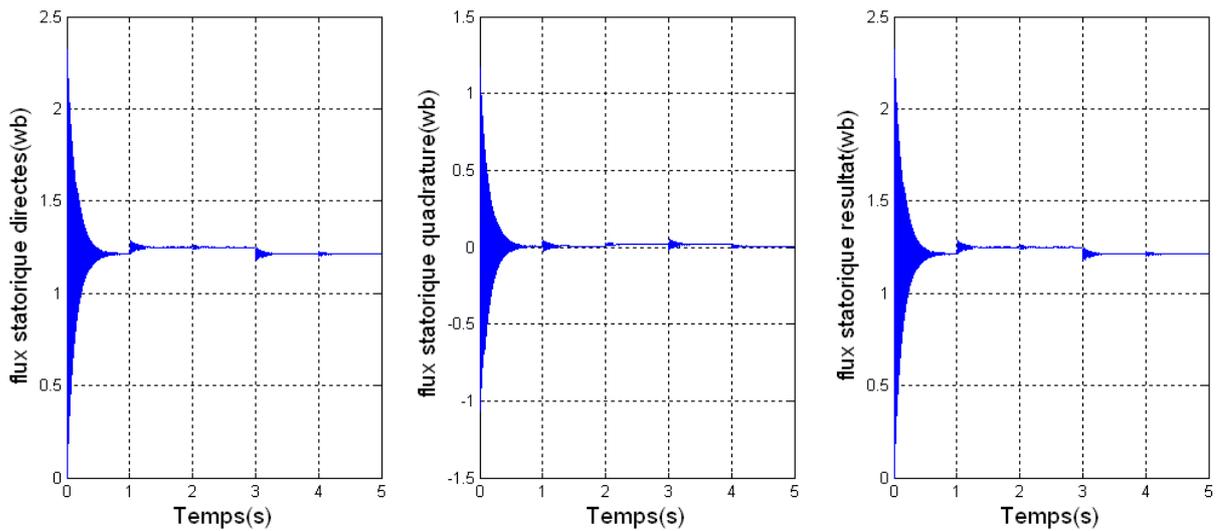


Figure III-35 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

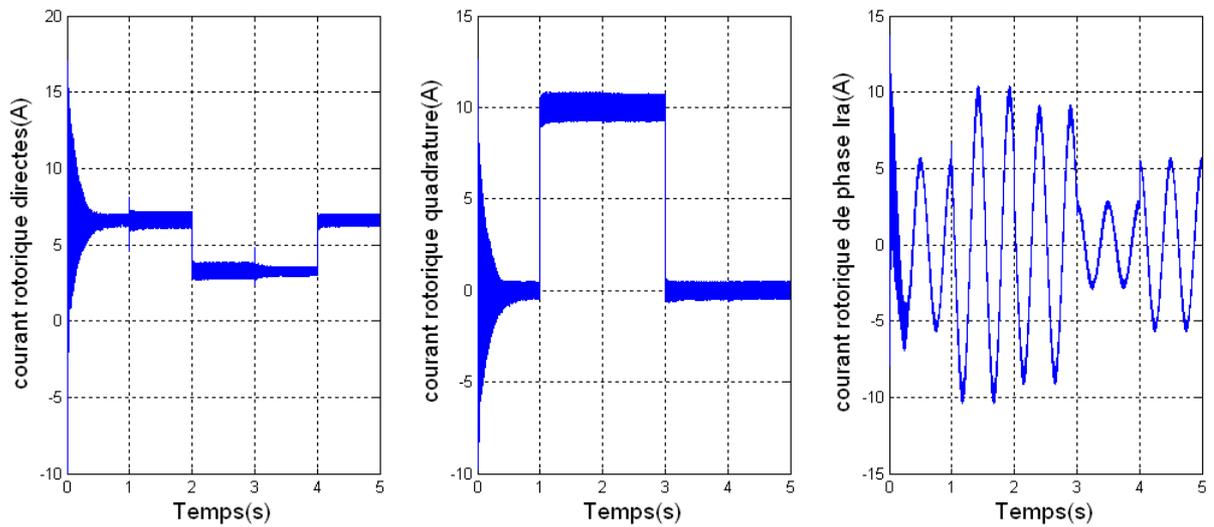


Figure III-36: Les composantes du courant rotoriques.

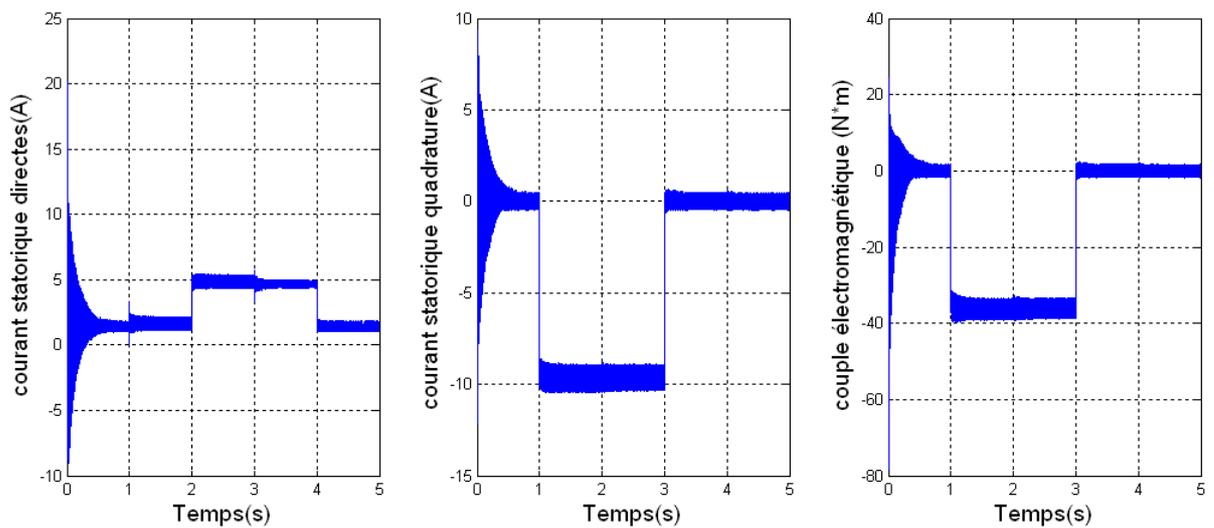


Figure III-37: Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

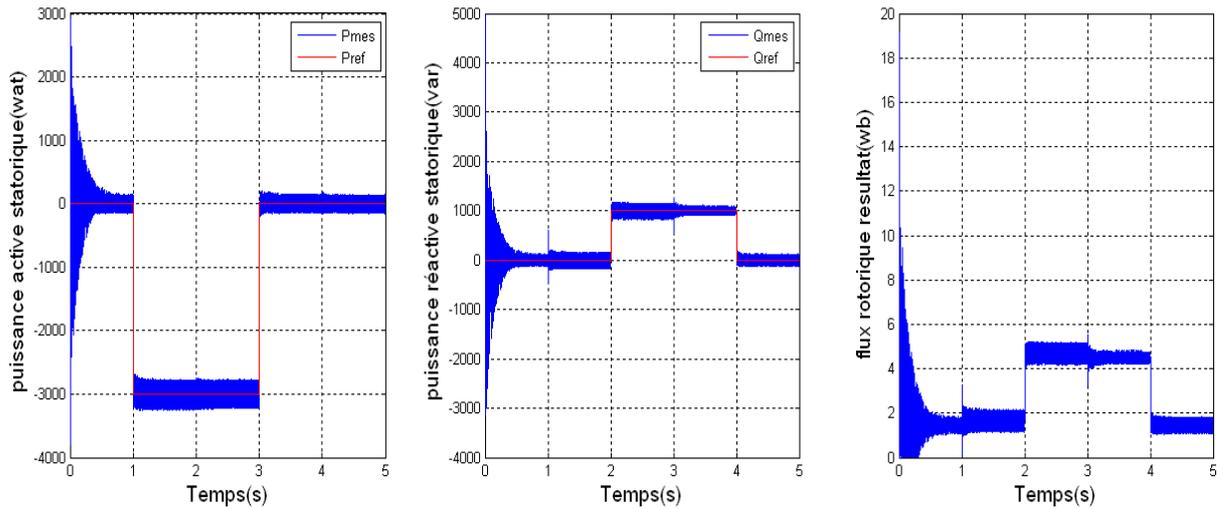


Figure III-38 : La puissance active et réactive statorique et flux rotorique résultat.

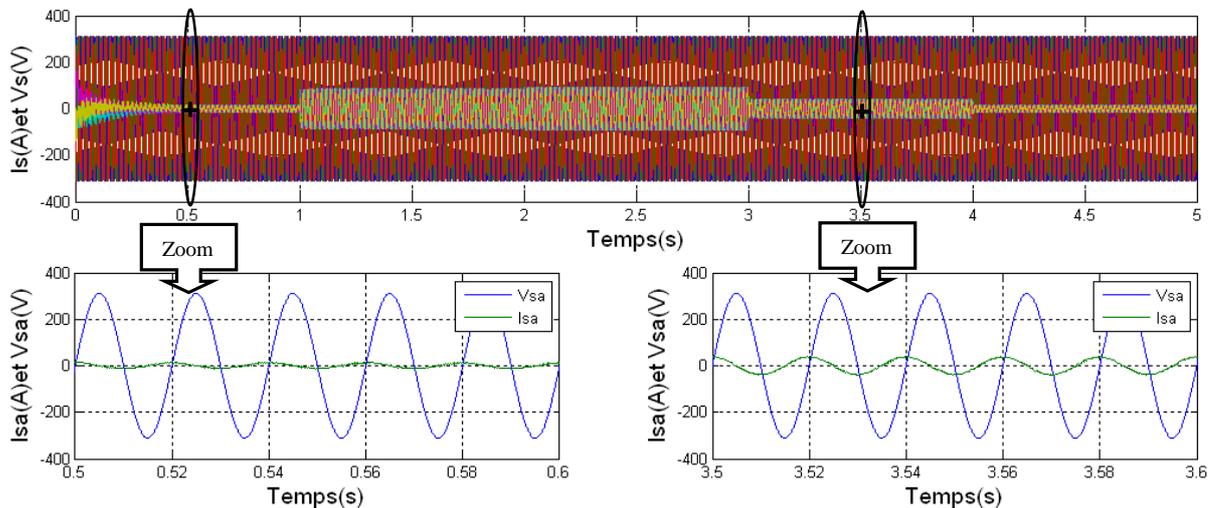


Figure III-39 : Courant et tension d’une phase statorique avec un zoom entre les différent instant.

III.5.5 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montre que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continu parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté. Les courants du réseau suivent parfaitement leurs références. La tension à la sortie du convertisseur coté réseau est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu qui est 400V. On constate que la tension d’entrée de l’onduleur à deux niveaux (Uc) atteint sa référence.

III.5.6 Schéma synoptique du système

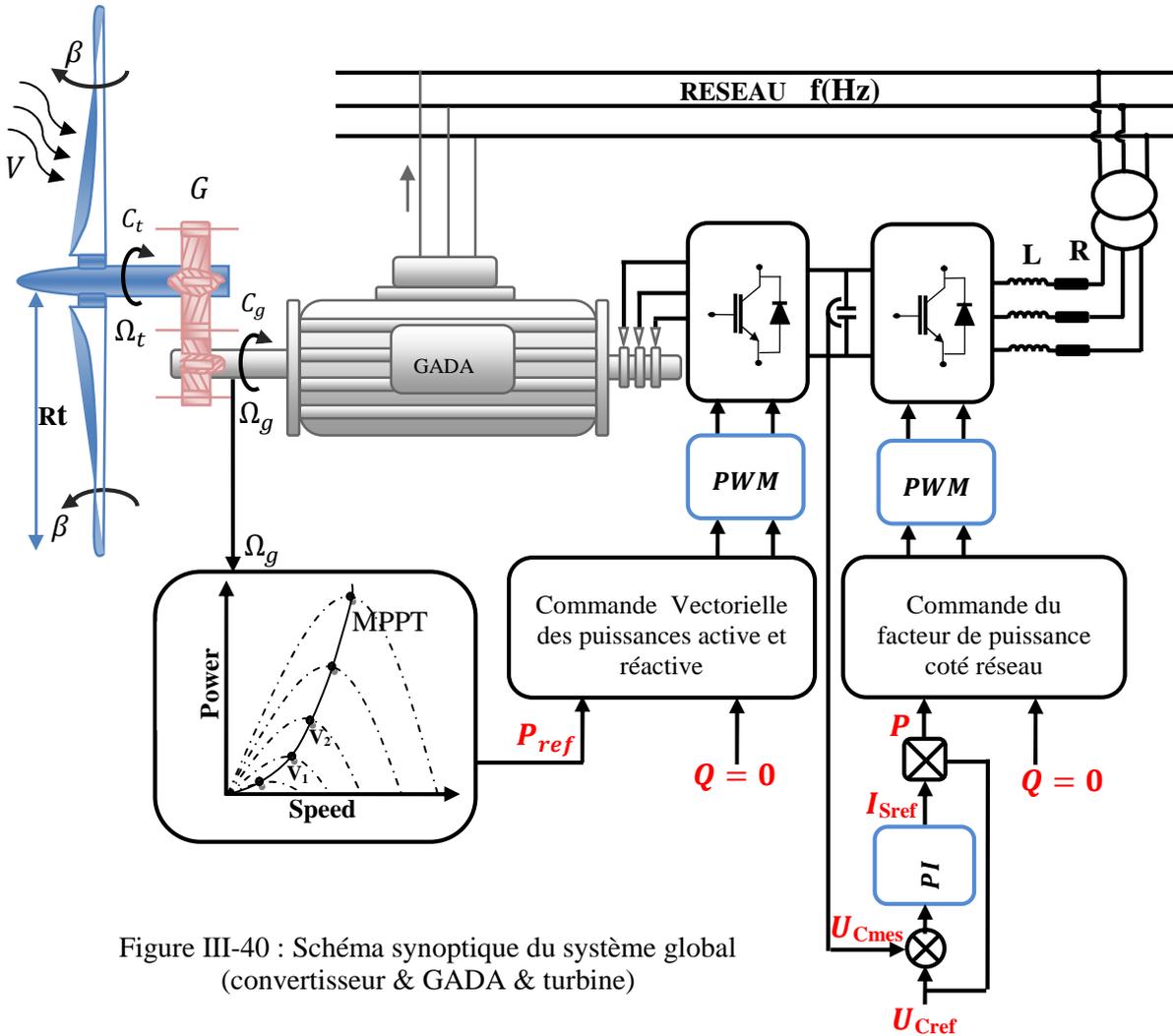


Figure III-40 : Schéma synoptique du système global (convertisseur & GADA & turbine)

III.5.7 Résultats de simulation du système avec turbine

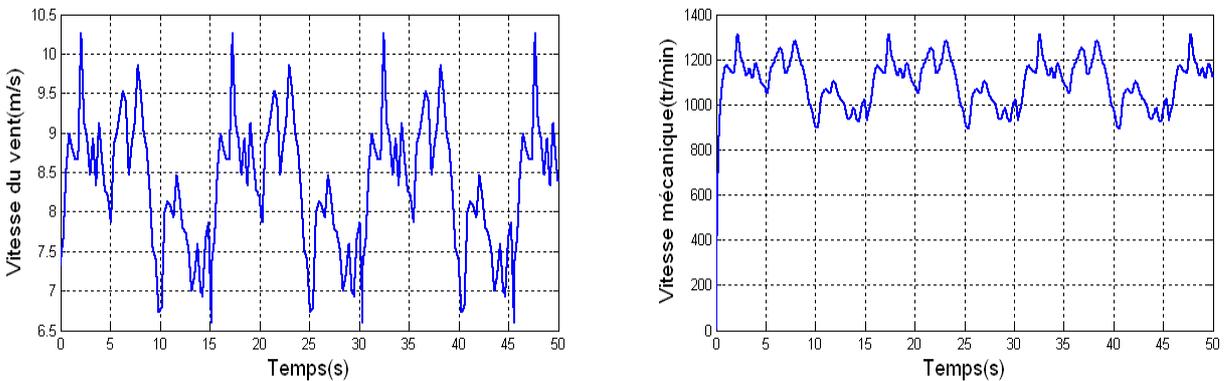


Figure III-41 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.

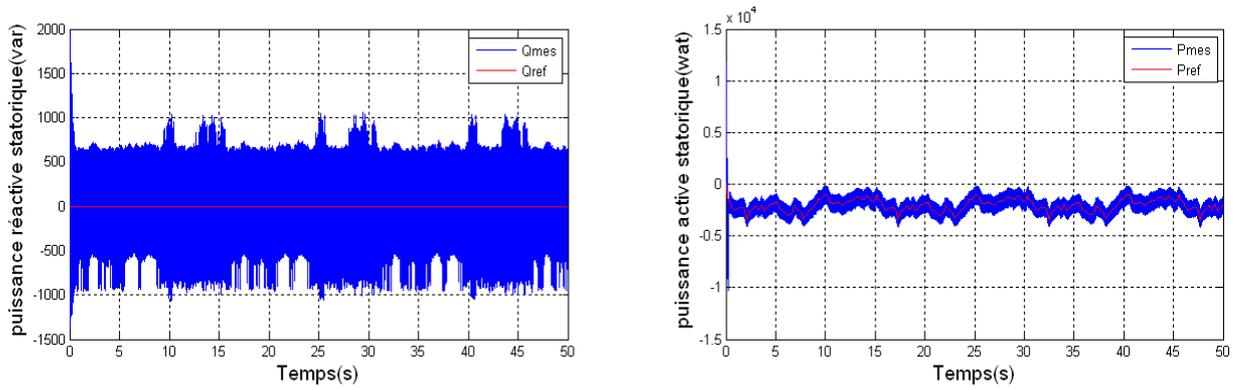


Figure III-42 : La puissance active et réactive statorique.

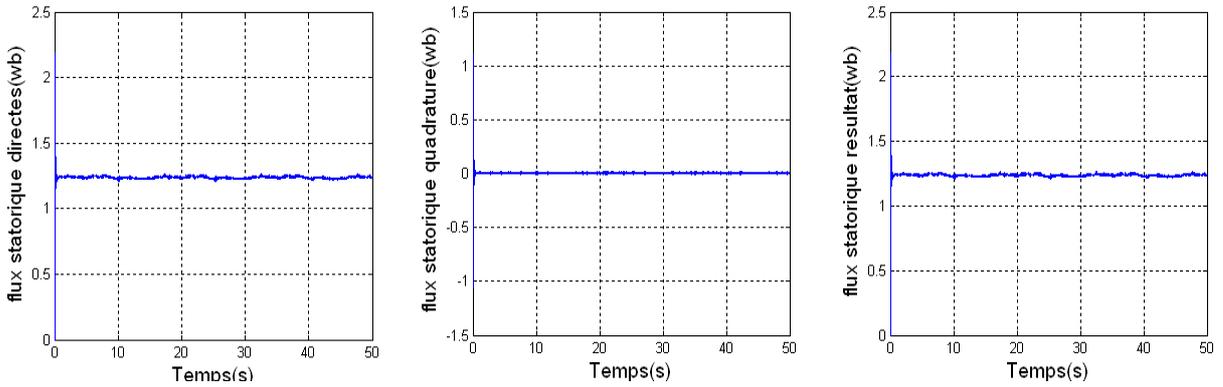


Figure III-43 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

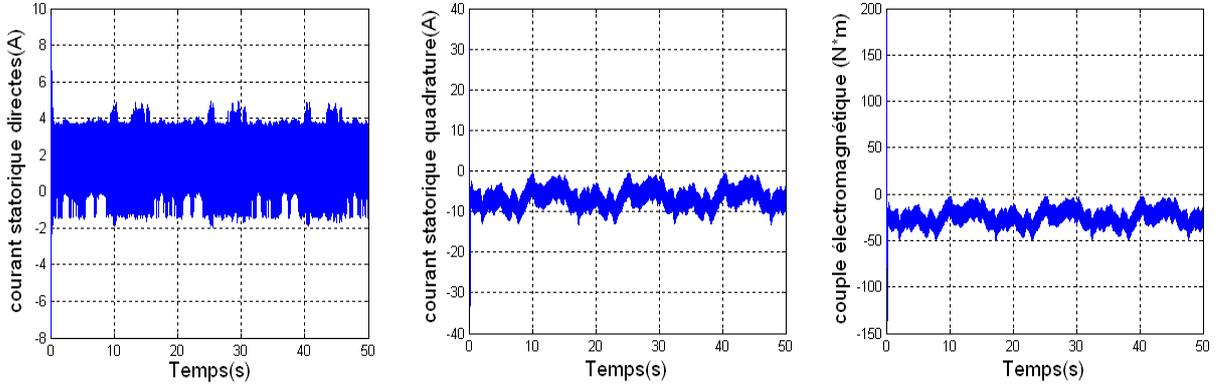


Figure III-44 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

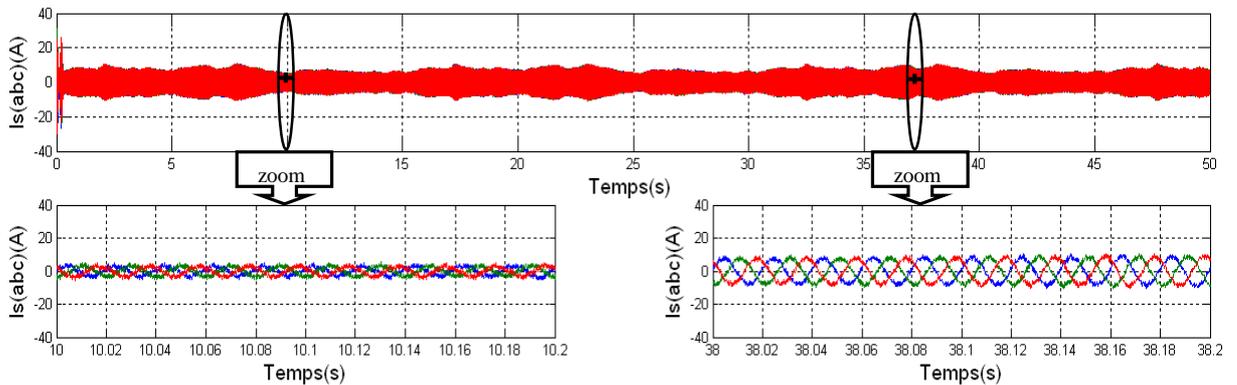


Figure III-45 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différent instant.

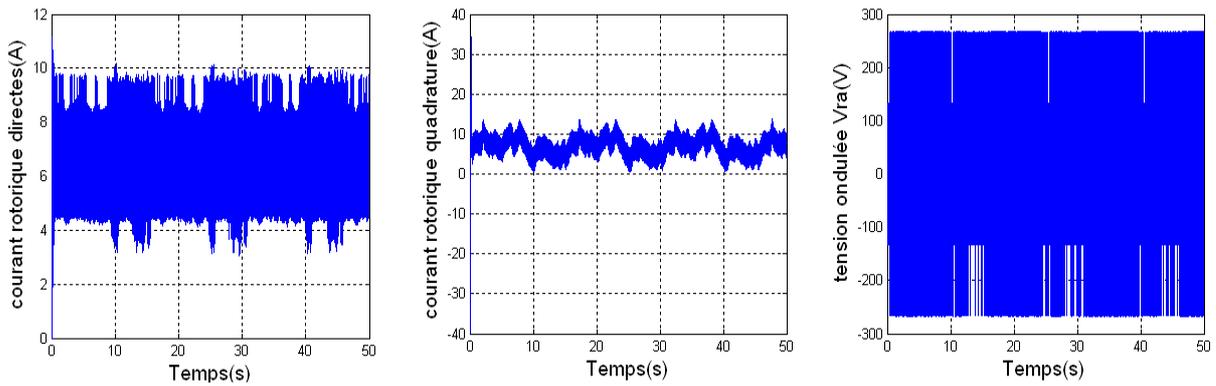


Figure III-46 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulée rotorique.

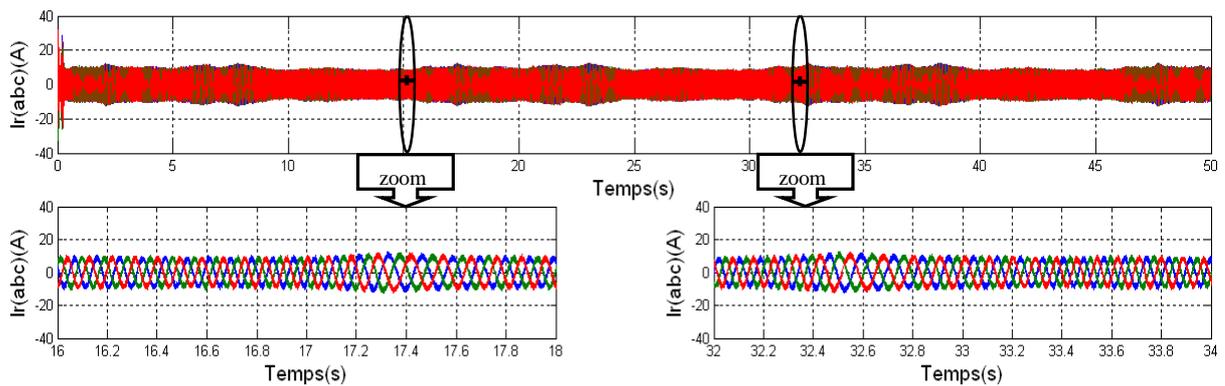


Figure III-47 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les défirent instant.

III.5.8 Interprétation des résultats

Les figures présentées montrent les performances de la cascade utilisant un redresseur et un onduleur à deux niveaux connecte 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 suive 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.6 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle pour la régulation de 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 répondue. 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.

Dans ce chapitre, on a présente les résultats de simulation dans le cas sans onduleur et dans le cas de l'association de l'onduleur avec la MADA qui est entraînée par une vitesse fixe et variable (L'intégration de la MADA dans un système éolien), et donc un modèle du système éolien global a été présenté. Nous avons conçu une commande (un algorithme) qui nous a permis de maximiser la puissance captée.

La dernière partie de ce chapitre on a associée à un système de conversion d'énergie constitué d'une MADA qui est entraînée par une vitesse fixe et variable, et de convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur et onduleur à deux niveaux), L'asservissement des tensions des filtres intermédiaires à été présenté,

Dans le chapitre suivant, on va voir une nouvelle technique de commande non linéaire, c'est la Commande par MODE GLISSEMENT qui élimine l'utilisation des régulateurs.

CHAPITRE IV

**COMMANDE PAR MODE
GLISSANT DES PUISSANCES
ACTIVE ET REACTIVE**

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 connue par sa simplicité et sa robustesse. Elle a été inventée pour la première fois en union soviétique dans le but de résoudre les problèmes de plusieurs applications [FNA 96].

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).

Dans ce chapitre, nous présentons une étude théorique sur la commande à structure variable, afin de mise en oeuvre de cette technique adaptée à la commande de la puissance active et réactive développées par la DFIG. De plus, les performances apportées par cette technique de commande par rapport celle du chapitre précédant seront examinées.

IV.2 INTRODUCTION AUX SYSTEMES DE REGLAGE A STRUCTURE VARIABLE

IV.2.1. Historique

Une attention considérable a été concentrée sur la commande du système non linéaire à dynamique incertaine, souvent sujet aux perturbations et aux variations paramétriques. La théorie des systèmes à structure variable et les modes glissements associés a fait l'objet d'études détaillées au cours des trente dernières années [FNA 96]. Des contrôleurs à structure variable ont fait leur application dans la littérature soviétique (Emelyanove 1967, Utikin 1974), et ont été largement identifiés comme une approche potentielle à ce problème (Gao et Hung 1993).

Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par Decarlo et d'autre (1998), Hung et d'autre (1993), l'action de commande force la trajectoire de systèmes à intercepter l'espace d'état intitulé surface du glissement. Les trajectoires de système sont

alors confondues avec la surface de glissement durant l'utilisation des commandes à une grande vitesse de commutation. L'avantage saillant de la commande à structure variable avec le mode glissant, est la robustesse contre des changements des paramètres ou des perturbations. Le phénomène "chattering " associé à la commande par mode glissant, présente un inconvénient majeur parce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable. Plusieurs méthodes pour réduire ce phénomène ont été proposées [CHO 01].

IV.2.2 Objectif de la commande par mode glissant

- L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels: Synthétiser une surface $\mathcal{S}(\mathbf{x}, t)$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Déterminer une loi de commande (commutation) $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

IV.2.3 Principe

Un système à structure variable (**VSS**) est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

IV.3 DIFFERENTES STRUCTURES DU CONTROLE PAR MODE DE GLISSEMENT

Dans la littérature on trouve trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation est au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état, la dernière est une structure de régulation avec ajout de la commande équivalente [ABD 06]. Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude.

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

Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné par la figure (IV-1). Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée.

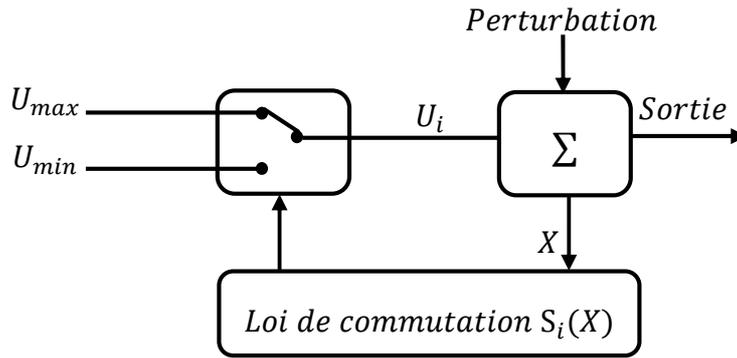


Figure IV-1 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure correspond au fonctionnement *tout ou rien* des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas [BET 03].

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

Nous pouvons consulter le schéma d'une telle structure sur la figure (IV-2). D'après les études menées précédemment [BET 03], c'est la structure 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 [BÜH 86]. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où 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 a créé une commutation au niveau de la dynamique du système.

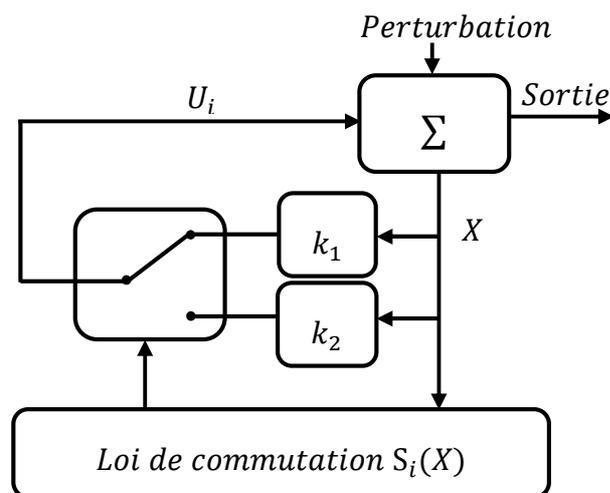


Figure IV-2 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

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

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (IV-3), présente un réel avantage. Elle permet de prépositionner 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 l'expression de cette commande équivalente [AHC 07].

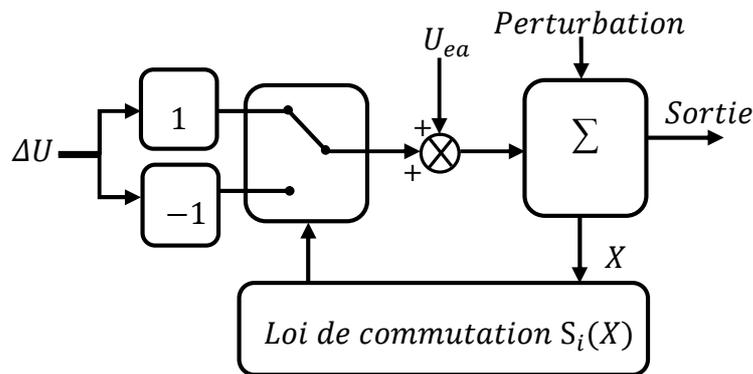


Figure IV-3 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

IV.4 THEORIE DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

La théorie des systèmes à structure variable (sliding mode), est une technique de commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre. D'où le phénomène de glissement figure (IV.4). 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.

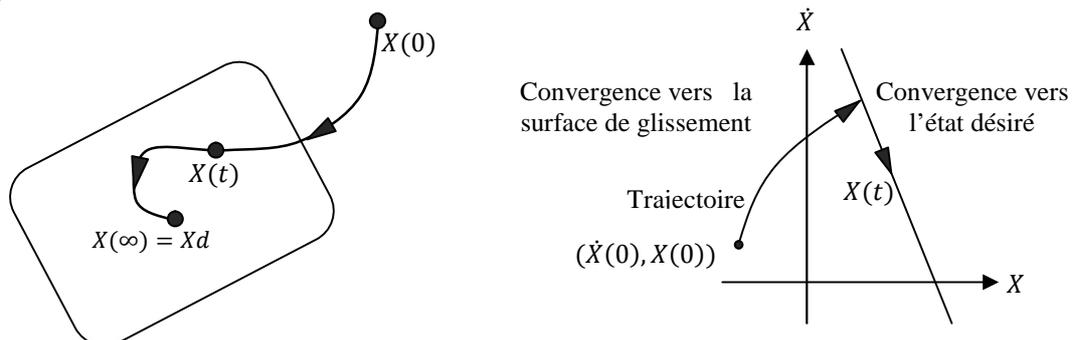


Figure IV- 4 : Convergence du système glissant.

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 .

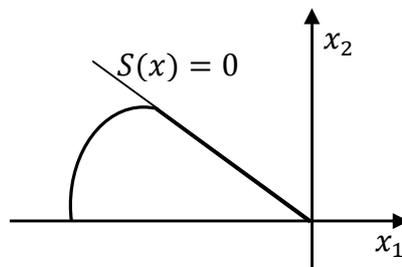


Figure IV-5 : Glissement idéal

Régime glissant réel

En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir de relais qui présente 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.

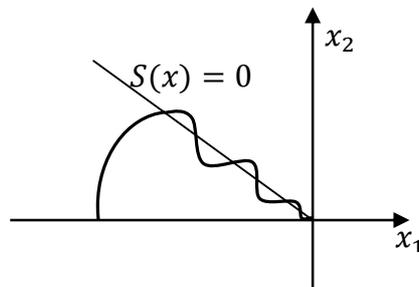


Figure IV- 6 : Glissement réel

IV.5 CONCEPTION DE L'ALGORITHME DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche. qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par:

- Choix des surfaces de glissement.
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.
- Détermination de la loi de commande.

IV.5.1 Choix des surfaces de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (IV. 1)$$

Où $[X] \in R^n$ est le vecteur d'état, et $[U] \in R^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état X vers sa valeur de référence X^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$s(x) = \left(\frac{d}{dt} - \lambda \right)^{r-1} . e(x) \quad (IV. 2)$$

Avec :

λ : Gain positif.

$e(x) = X - X^*$: Écart de la variable à réguler.

r : Degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande. Tel que : $\frac{ds}{dt} \neq 0$ assurant la contrôlabilité.

Pour $r = 1$ $s(x) = e(x)$.

Pour $r = 2$ $s(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$.

Pour $r = 3$ $s(x) = \lambda_x^2 . e(x) + 2 * \lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$.

$s(x)$: est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

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 .

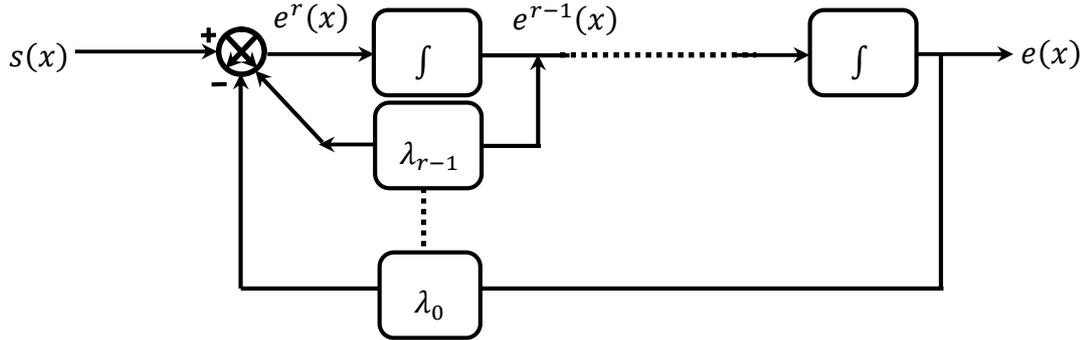


Figure IV-7 : Linéarisation exacte de l'écart

IV.5.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types de conditions qui sont :

IV.5.2.1 Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin [FNA 06]. Elle est donnée sous la forme: $\dot{s}(x).s(x) < 0$

IV.5.2.2 Approche de Lyapunov

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

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}s^2 \quad (IV.3)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x).s(x) \quad (IV.4)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$\dot{s}(x).s(x) < 0 \quad (IV.5)$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [HOC 08].

IV.5.2.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant atteint la dynamique du système qui est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et en suite vers son point d'équilibre toute en garantissant les conditions d'existence du mode de glissement.

La structure de la commande comporte deux parties, une première concernant la linéarisation exacte U_{eq} et une deuxième stabilisante ΔU , cette dernière est très importante dans la technique de commande par mode de glissement, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations extérieures.

$$U(t) = \Delta U + U_{eq} \tag{IV.6}$$

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} [FNA 05] Figure (IV.8)

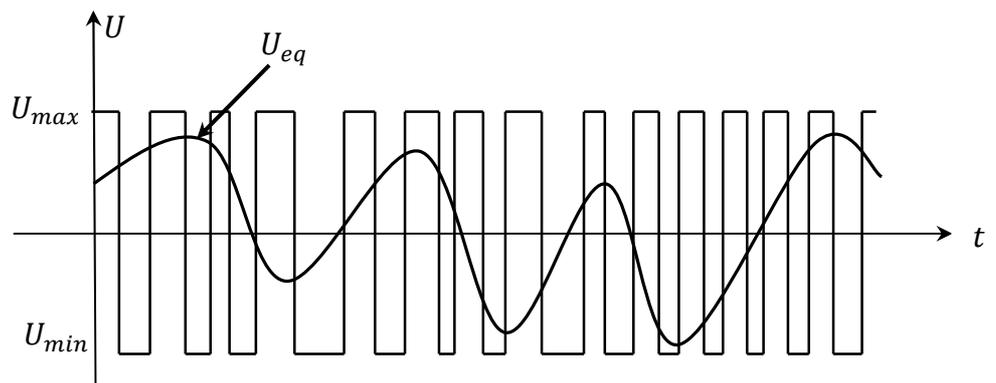


Figure IV-8 : La valeur continue U_{eq} prise par la commande lors de la commutation entre U_{max} et U_{min}

ΔU : est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (IV. 1). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande U .

La dérivée de la surface $s(x)$ est :

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (IV. 7)$$

En remplaçant (IV. 1) et (IV. 6) dans (IV. 7), on trouve :

$$\dot{s}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial s}{\partial t} [B]\Delta U \quad (IV. 8)$$

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.

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} [A][X] \right\} \quad (IV. 9)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial s}{\partial x} [B] \neq 0 \quad (IV. 10)$$

Durant le mode de convergence et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (IV.8), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U \quad (IV. 11)$$

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

$$s(x) \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U < 0 \quad (IV. 12)$$

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).

$$\Delta U = k_x \text{sign } s(x) \quad (IV. 13)$$

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

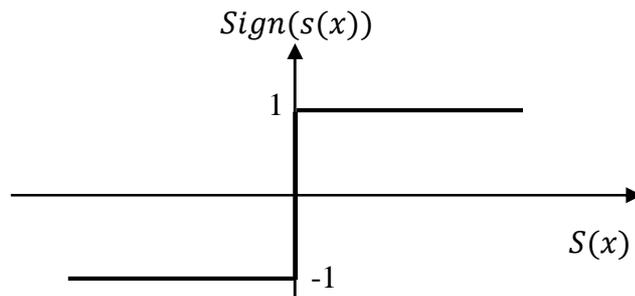


Figure IV-9 : Fonction sign (non linéarité tout ou rien)

Cependant, cette dernière génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement (chattering) qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes hautes fréquences. La figure (IV.10) représente le phénomène broutement.

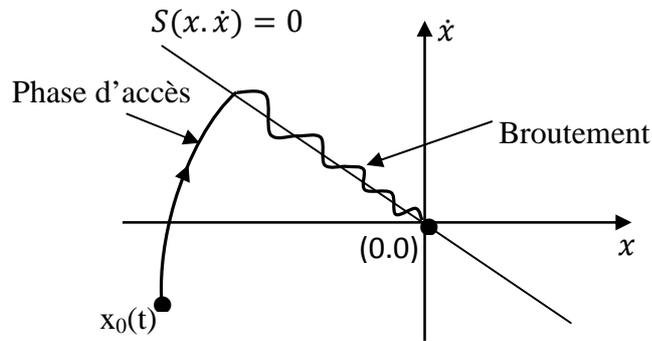


Figure IV-10 : Phénomène de broutement

IV.6 ELIMINATION DU PHENOMENE DU BROUITEMENT (CHATTERING)

L'un des principaux inconvénients du réglage par mode de glissement est le phénomène du chattering. Car il peut endommager les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes et nuire au fonctionnement et aux performances du système. Dans le but de réduire ces oscillations, plusieurs solutions ont été apportées comme par exemple : remplacer la fonction «*sign*» par une fonction de saturation caractérisée par un ou deux seuils (atténuation des amplitudes des ondulations) Figure (IV-11).

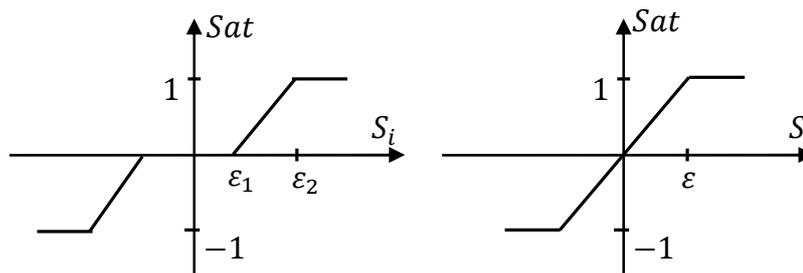


Figure IV-11 : Fonction **SAT** avec un seuil et deux seuils (zone morte).

Ces deux fonctions sont respectivement définies par :

$$sat(s) = \begin{cases} -1 & si \quad s < -\varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} & si \quad |s| < \varepsilon \\ 1 & si \quad s > \varepsilon \end{cases} \quad (IV.14)$$

$$sat(s) = \begin{cases} 0 & si \quad |s| < \varepsilon_1 \\ \frac{s - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & si \quad \varepsilon_1 < |s| < \varepsilon_2 \\ sign(s) & si \quad s > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (IV.15)$$

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe C1. On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction figure (IV-12).

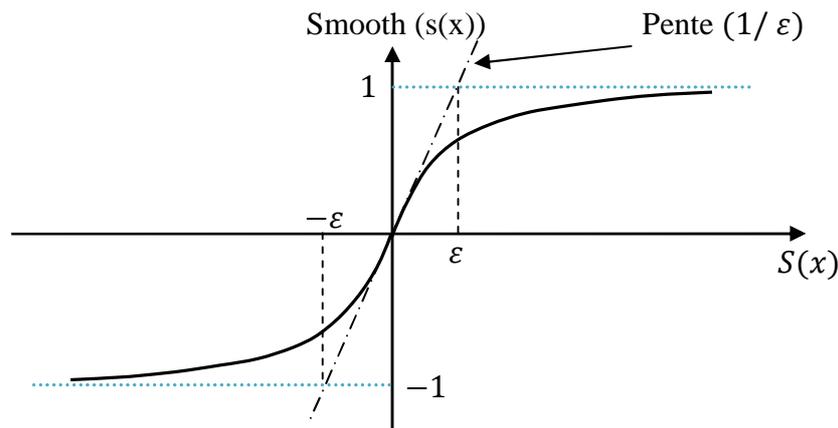


Figure IV-12 : Fonction de classe C1 ($\varepsilon >$ et petit)

$$smooth(s(x)) = tanh(s(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{s(x)}{|s(x)| + \varepsilon} \quad (IV.16)$$

D'où, on aura la commande douce suivante :

$$\Delta U = k_x \frac{s(x)}{|s(x)| + \varepsilon} \quad (IV.17)$$

IV.7 DOMAINE D'APPLICATION DU REGLAGE PAR MODE GLISSANT

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande, tel que la commande des systèmes hydrauliques ou pneumatiques et la robotique. Il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz [FNA 05].

Les entraînements électriques pour des machines outils ou des robots qui nécessitent soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position, dans ce cas le comportement dynamique à haute performance à la possibilité de limiter

facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation), sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant.

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimiques et métallurgies, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages.

IV.8 LES AVANTAGES DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations.
- ✓ Il suffit de connaître une borne pour v , ce qui simplifie 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 .

IV.9 COMMANDE NON-LINEAIRE 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

IV.9.1 Modèle de la GADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté 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 :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = w_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV. 18})$$

❖ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (IV.19)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (IV.20)$$

❖ Relations de la dérivée de courants rotoriques

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (IV.21)$$

IV.9.2 Choix des surfaces de glissements

la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d , Pour contrôler la puissance on prend $n = 1$, l'expression de la surface de contrôle de la puissance active et réactive pour forme :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV.22)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (IV.23)$$

Conditions de convergence

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

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt}(I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt}(I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (IV.24)$$

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 $s(X) \cdot \dot{s}(X) \leq 0$ et celle d'invariance. $\dot{s}(X) = 0$

IV.9.3 Loi de commande par mode glissant

L'algorithme de commande est défini par la relation

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (IV.25)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (IV.26)$$

avec :

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

$V_{rq-Equi}, V_{rd-Equi}$: Grandeur de commande équivalente,

$V_{rq-attr}, V_{rd-attr}$: Terme de commutation de commande

❖ 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 :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV.27)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (IV.28)$$

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

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot \left(V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (IV.29)$$

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (IV.30)$$

$$\dot{s}(P) = -v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (IV.31)$$

$$-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) = -v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (IV.32)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} - \left(-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \quad (\text{IV. 33})$$

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

$$\begin{cases} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{P}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \end{cases} \quad (\text{IV. 35})$$

❖ Contrôle de la puissance réactive

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

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (\text{IV. 36})$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(Q) = (\dot{I}_{rd}^{ref} - \dot{I}_{rd}) \quad (\text{IV. 37})$$

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

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (\text{IV. 38})$$

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (\text{IV. 39})$$

$$\dot{s}(Q) = -v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{IV. 40})$$

$$\left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) = -v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{IV. 41})$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{IV. 42})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd-Equi} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} \\ V_{rd-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \end{cases} \quad (\text{IV. 44})$$

Les équations (IV. 35), (IV. 44) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (IV-13).

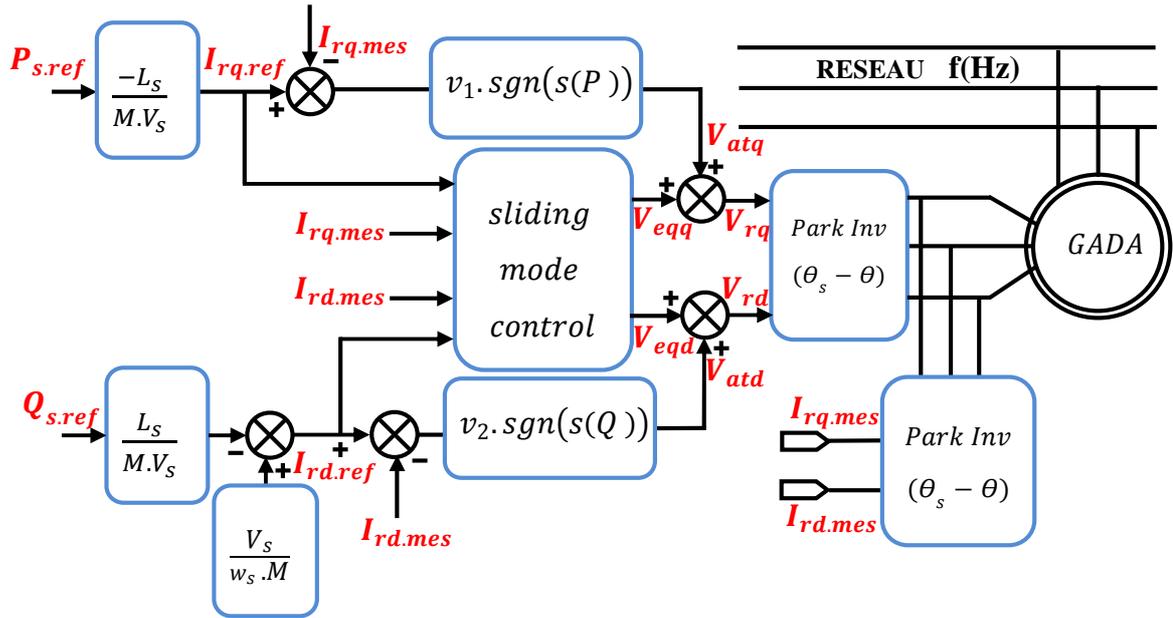


Figure IV-13 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant

IV.9.4 Résultats de Simulation numérique du système sans onduleur et 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 $-3000W$)
- ❖ Entre les instant $t = 2s$ et $t = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR)

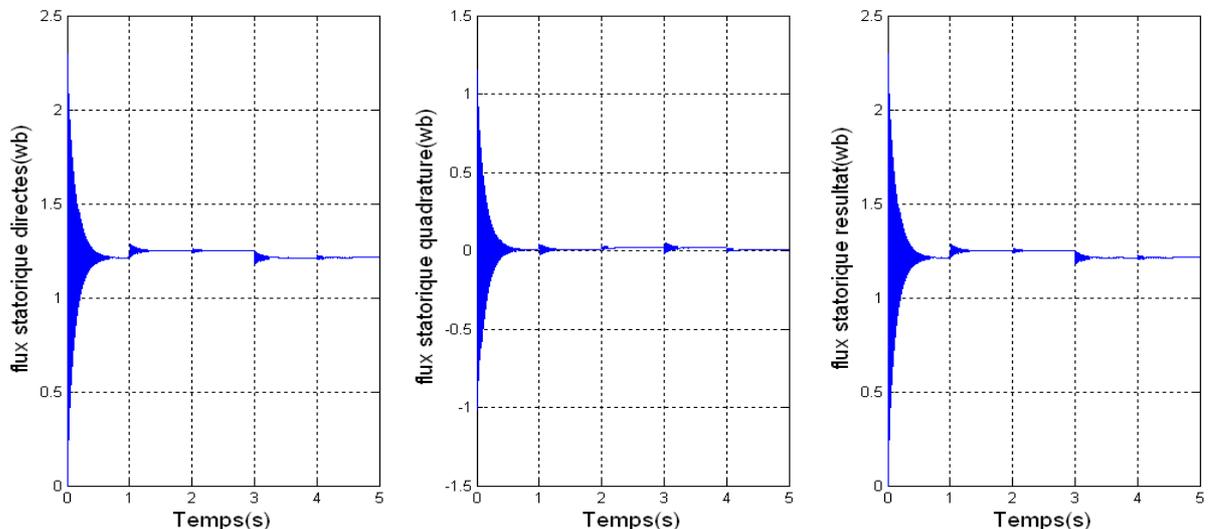


Figure IV -14 : Les composantes du flux statorique avec son résultat.

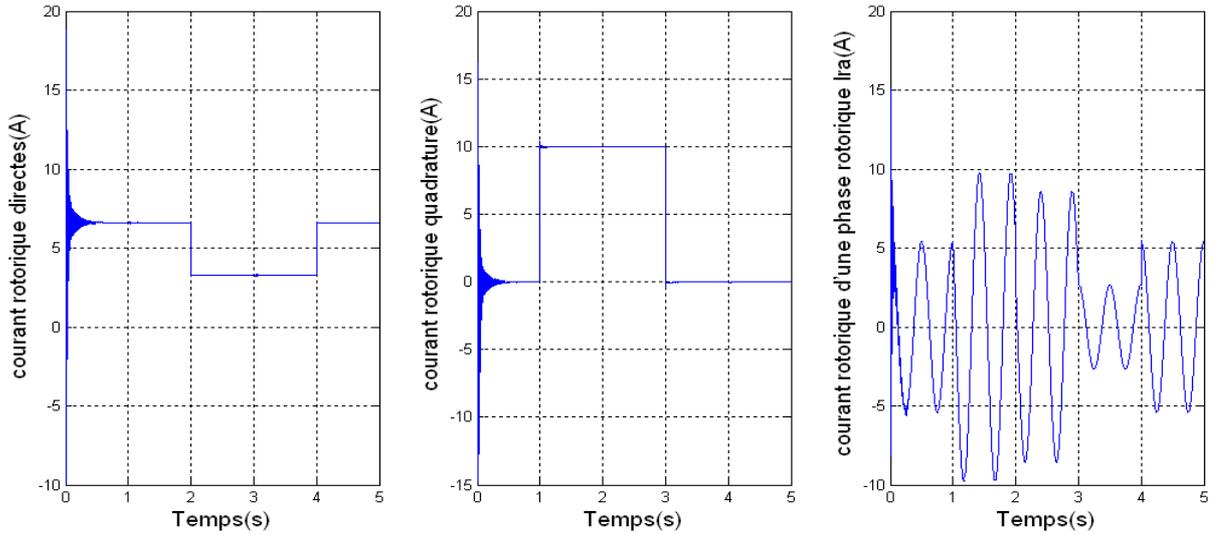


Figure IV -15 : Les composantes du courant rotoriques.

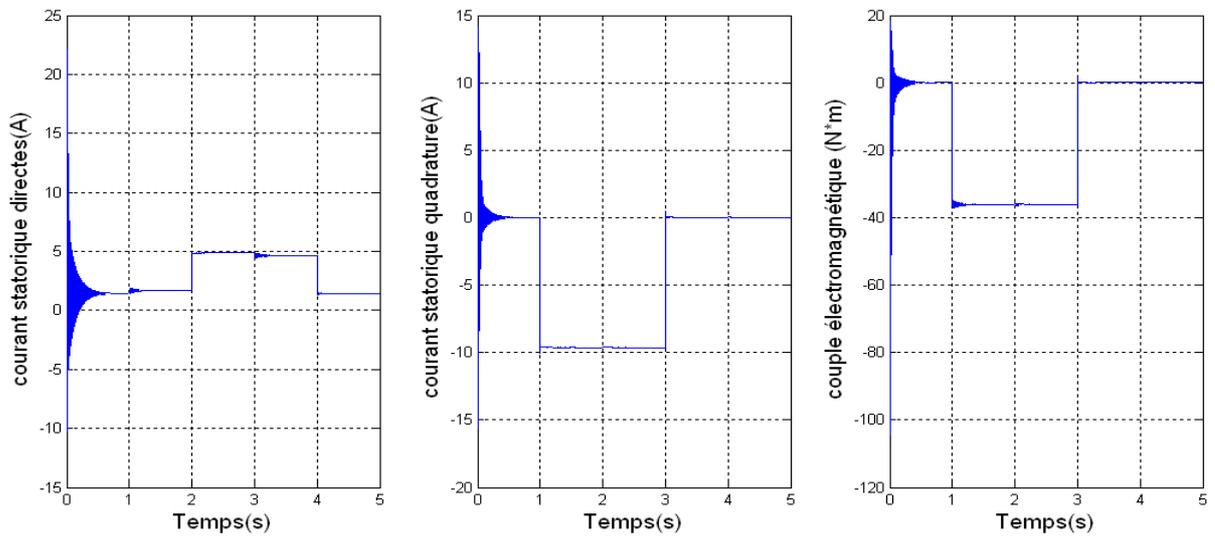


Figure IV -16 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

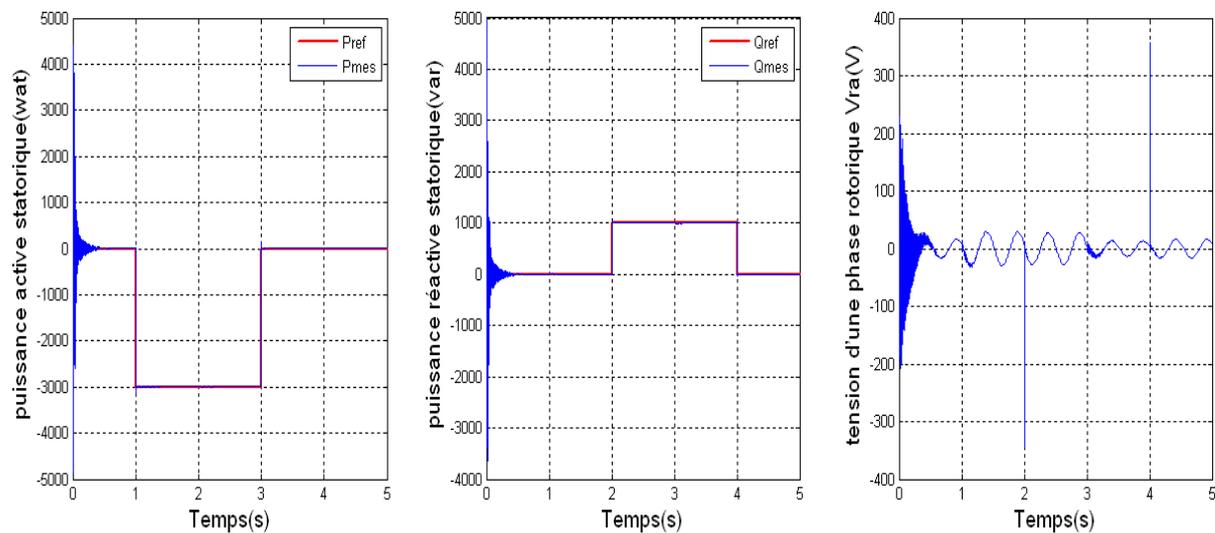


Figure IV -17 : La puissance active et réactive statorique et la tension d'une phase rotorique.

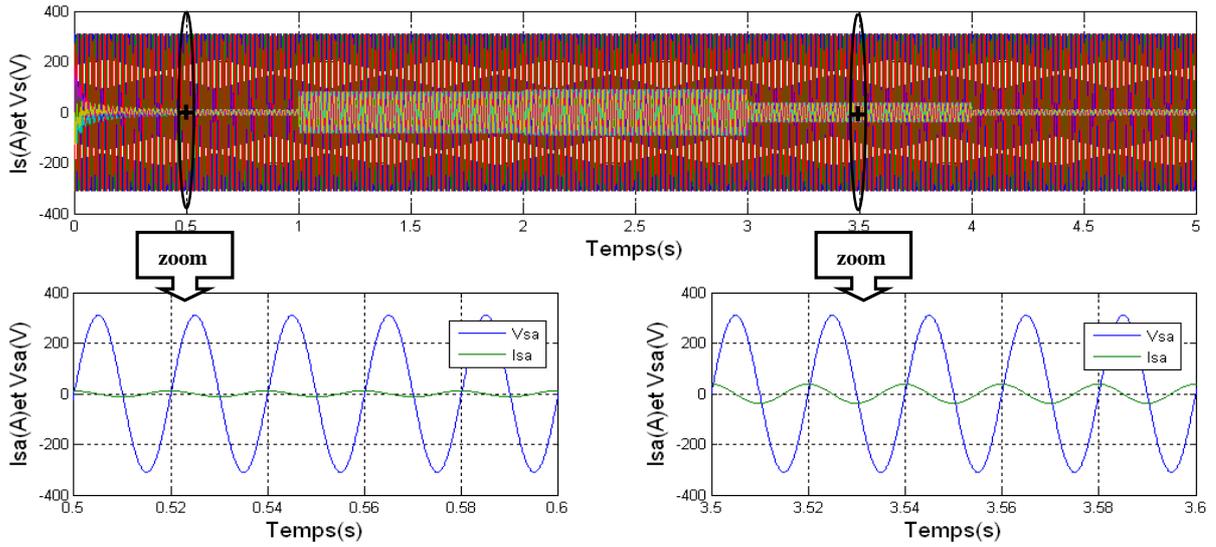


Figure IV -18 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les défilement instant.

IV.9.5 Résultats de Simulation numérique du système sans onduleur et avec turbine

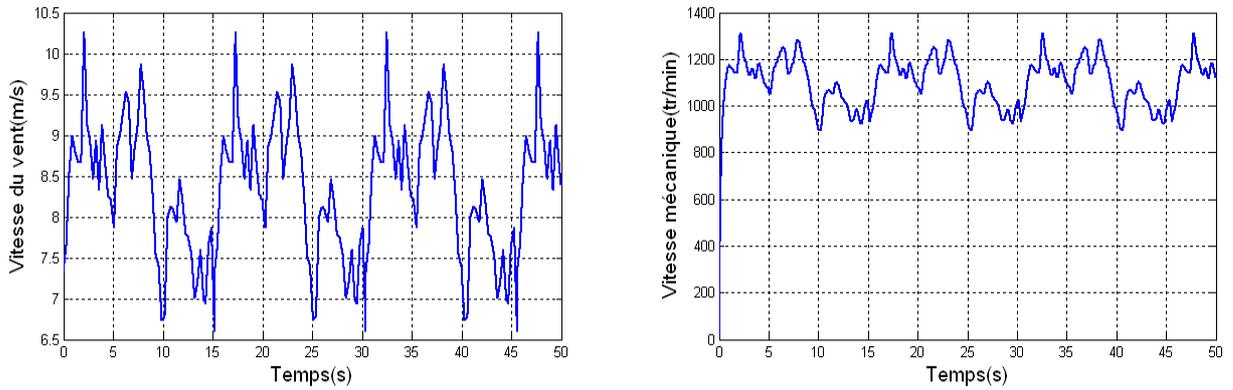


Figure IV -19 : Profil du vent appliqué et La vitesse mécanique.

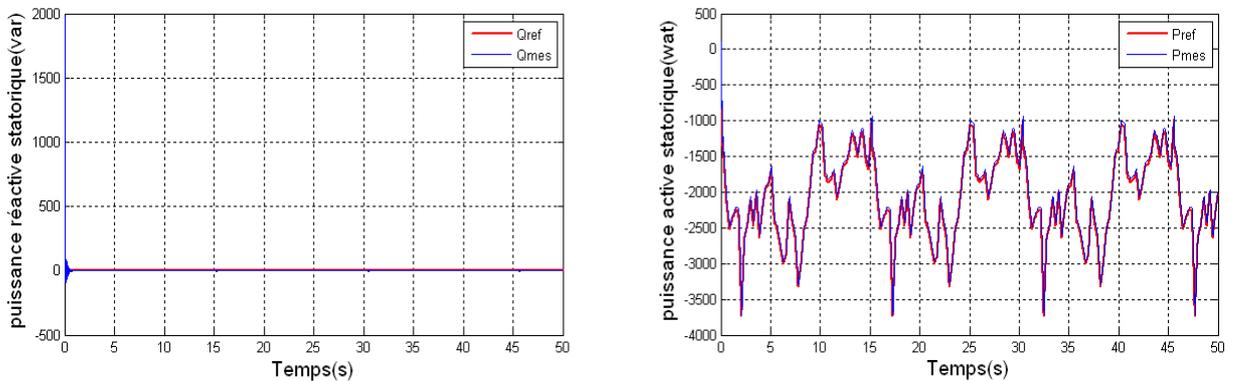


Figure IV -20 : La puissance active et réactive statorique.

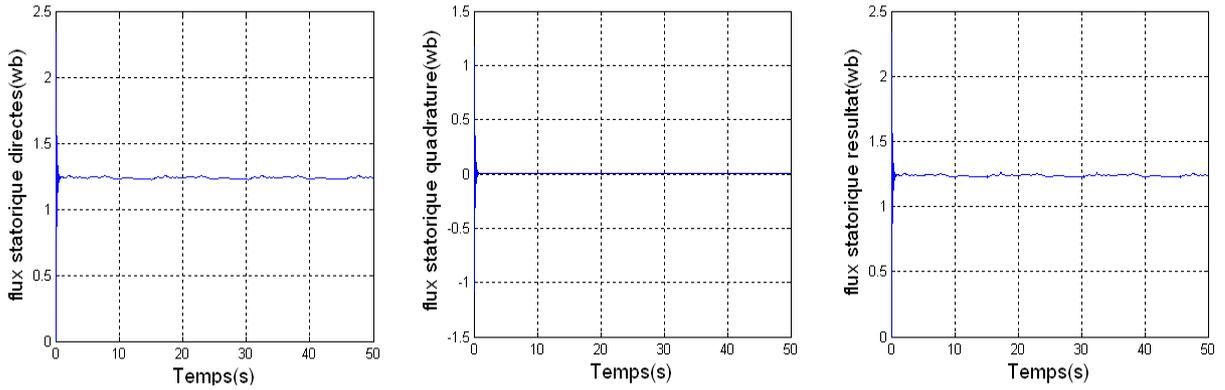


Figure IV -21 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

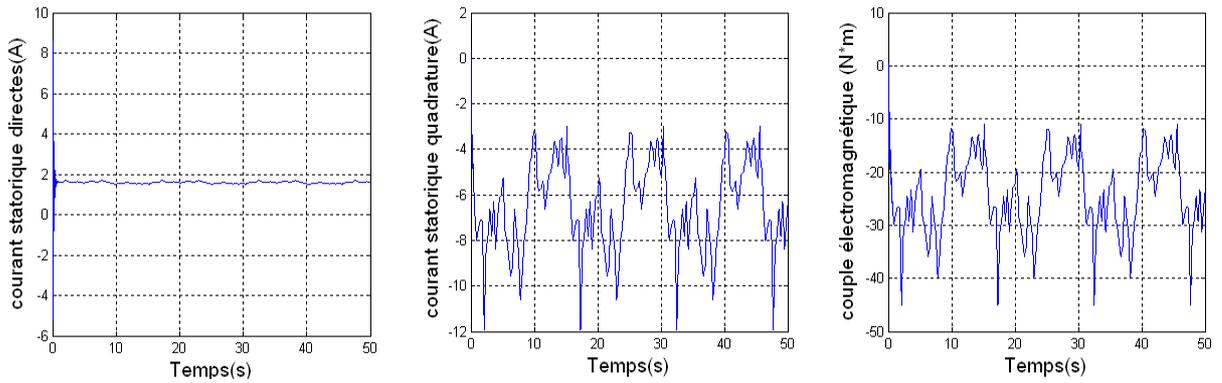


Figure IV -22 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

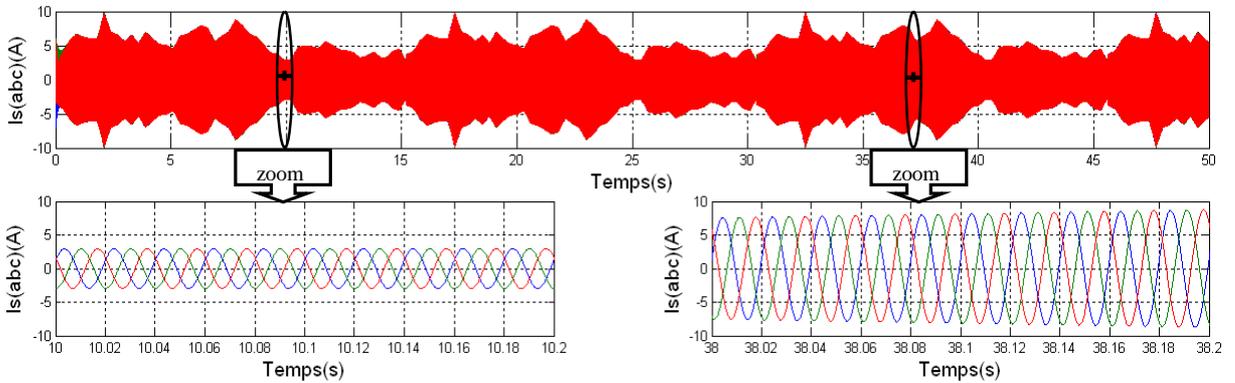


Figure IV -23 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les défèrent instant.

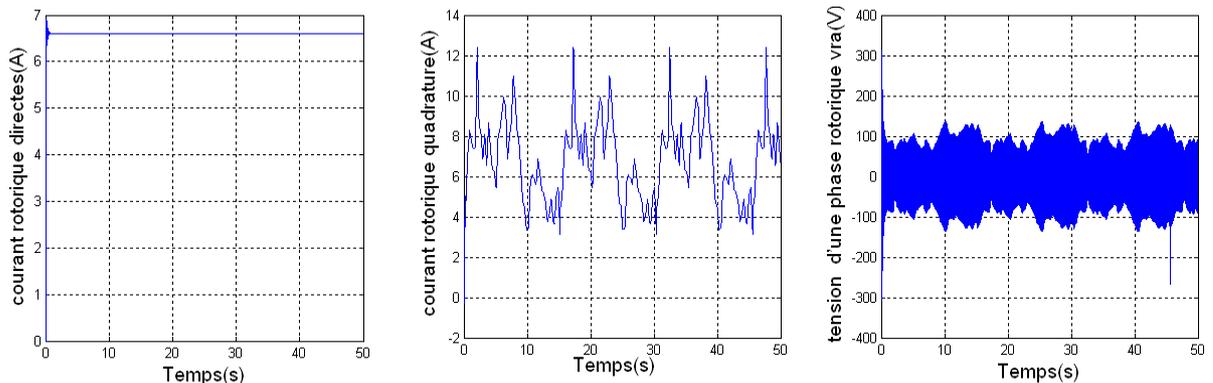


Figure IV -24 : Les composantes du courant rotoriques et la tension d'une phase rotorique.

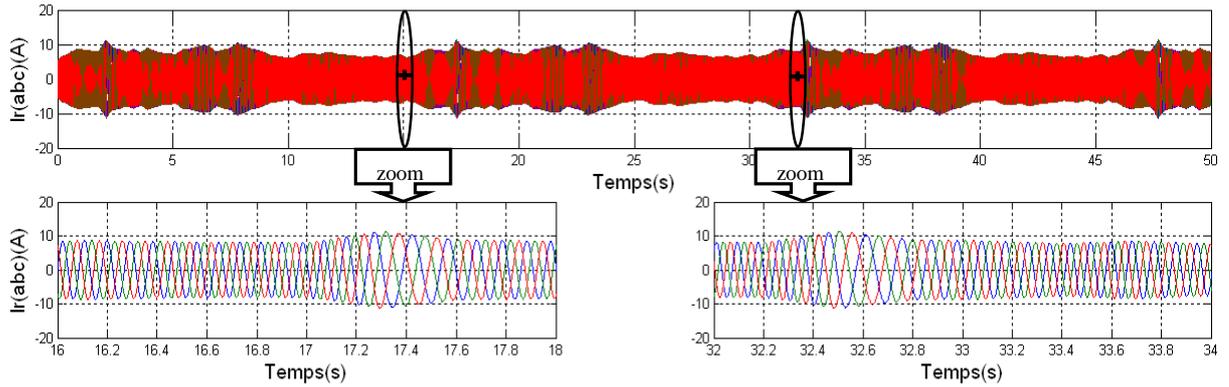


Figure IV -25 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les déferent instant.

IV.9.6 Interprétation des résultats

Les figures ci dessus représentent les différentes courbes obtenues par le réglage en mode glissant des puissances active et réactive de la MADA.

La première série de simulations est effectuée sans onduleur. La consigne de puissance active est $P_s = -3000W$ entre $t = 1s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive $Q_s = 1000 VAR$ entre $t = 2s$ et $t = 4s$. La Machine entraînée à une vitesse fixe $1440 tr/min$.

La deuxième série de simulations est effectuée sans onduleur. La consigne de puissance active est fonction de la vitesse du vent. La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro de manière à garder le facteur de puissance unitaire côté stator.

En commande par mode glissant les réponses sont sans dépassement, rapide en régime transitoire et l'erreur statique tend vers zéro.

IV.9.7 Résultats de simulation numérique du système avec onduleur et sans turbine

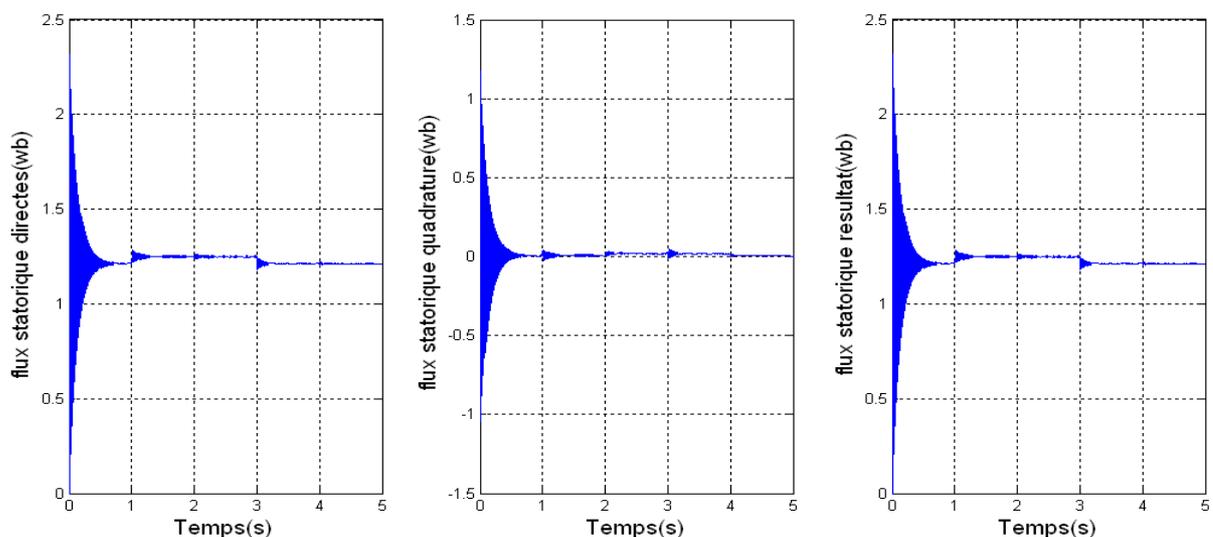


Figure IV -26 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

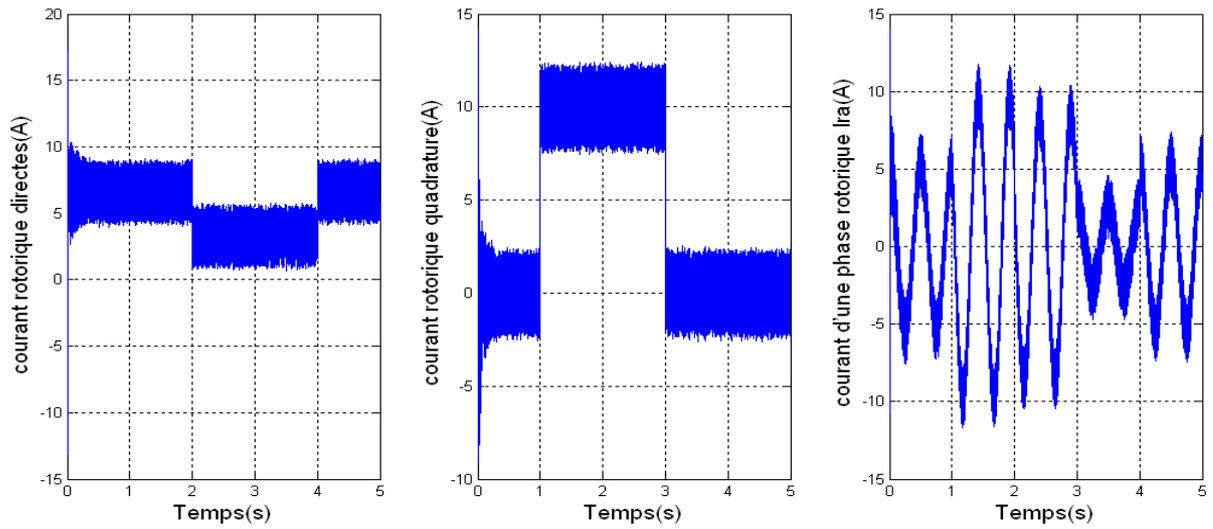


Figure IV -27 : Les composantes du courant rotoriques.

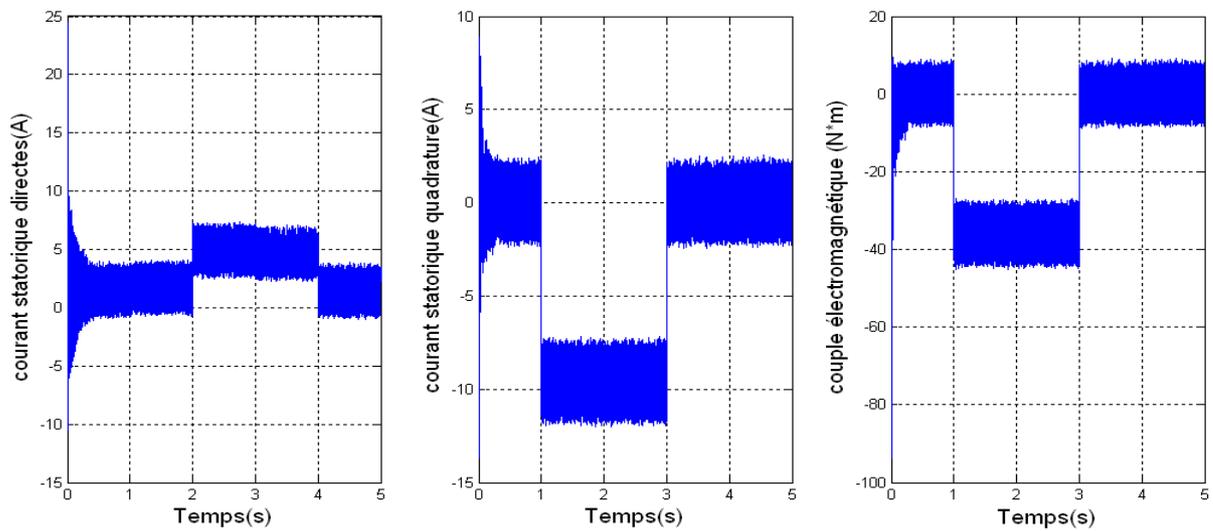


Figure IV -28: Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

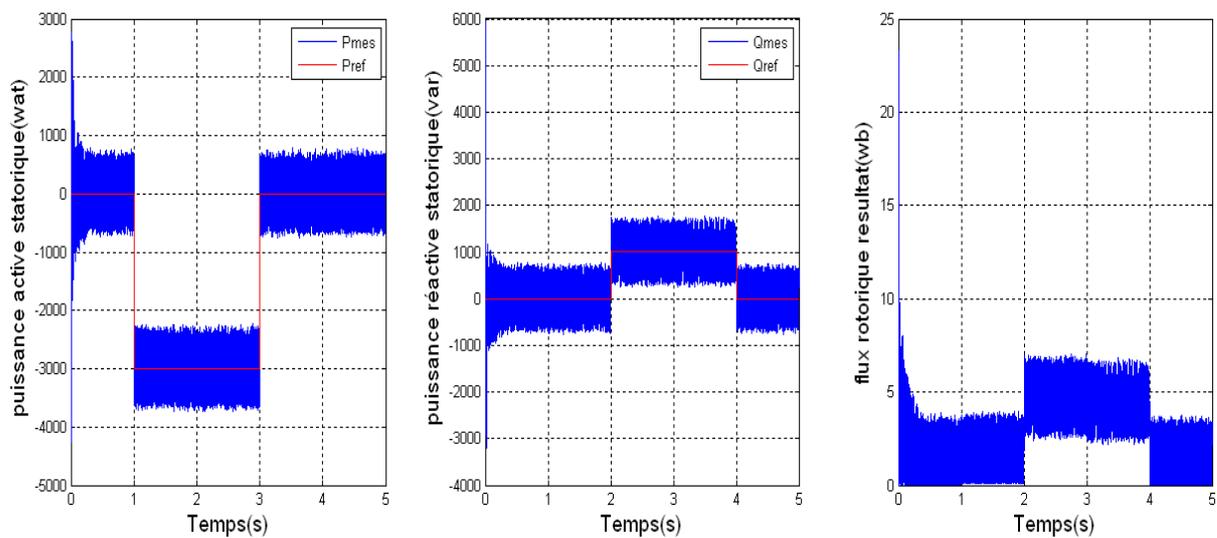


Figure IV -29 : La puissance active et réactive statorique et flux rotorique résultat.

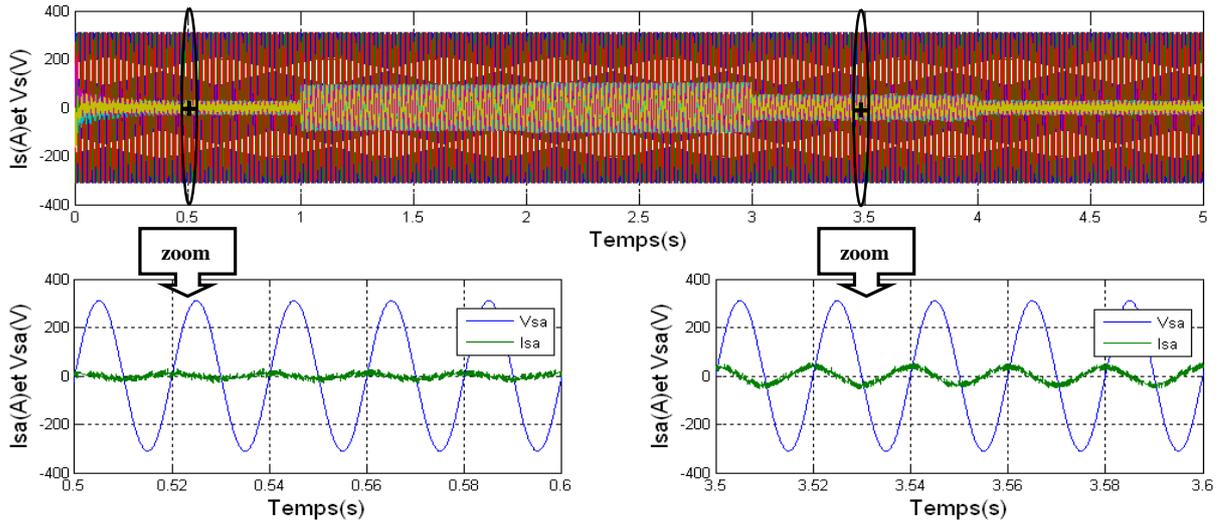


Figure IV-30 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les défilent instant.

IV.9.8 Résultats de simulation du système avec onduleur et avec turbine

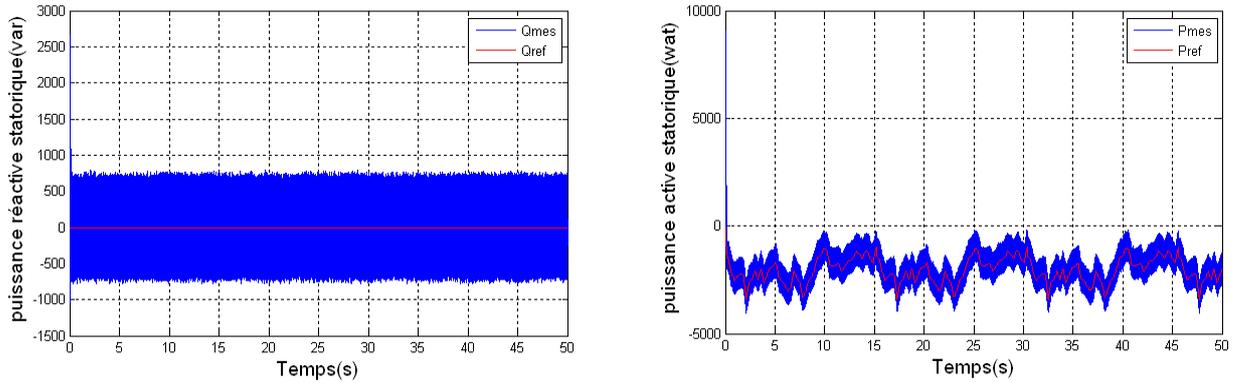


Figure IV-31 : La puissance active et réactive statorique.

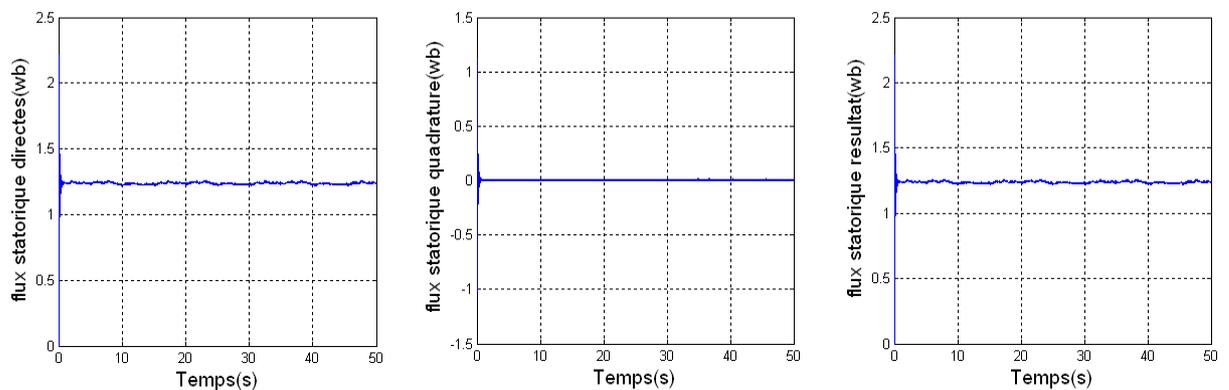


Figure IV -32 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

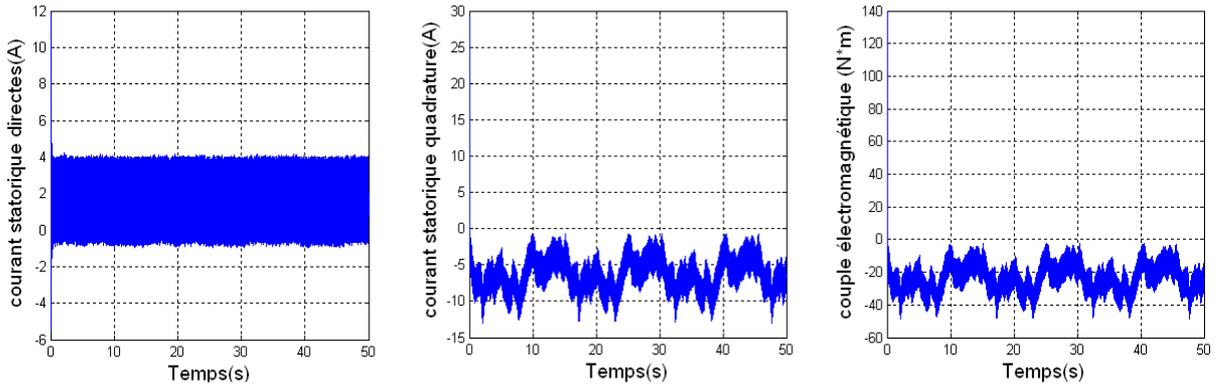


Figure IV -33 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

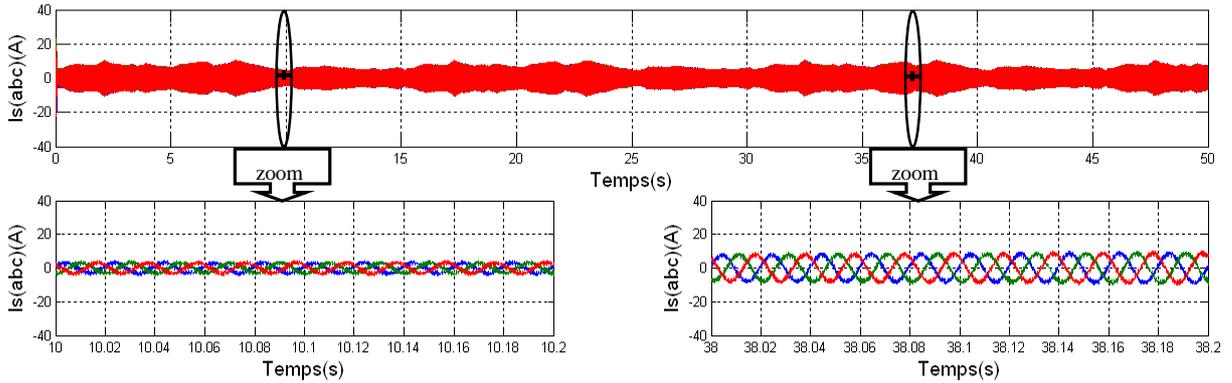


Figure IV -34 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les défirent instant.

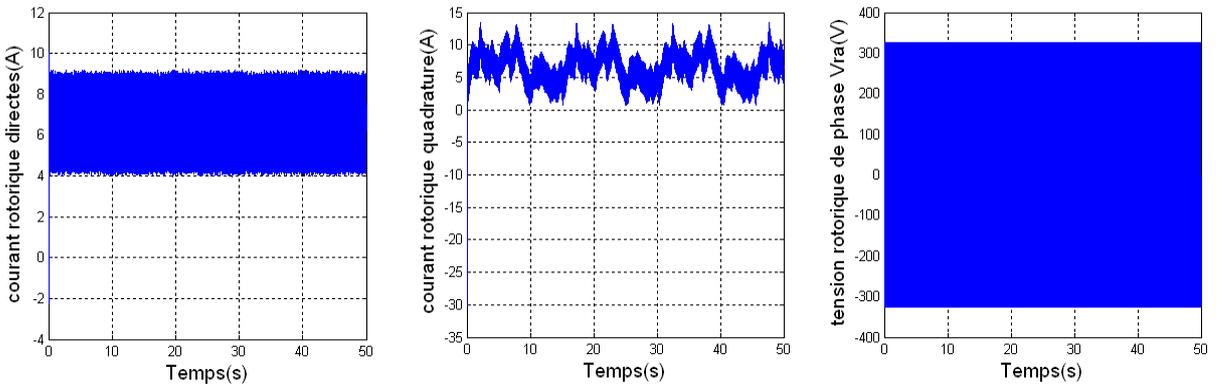


Figure IV -35 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulée rotorique.

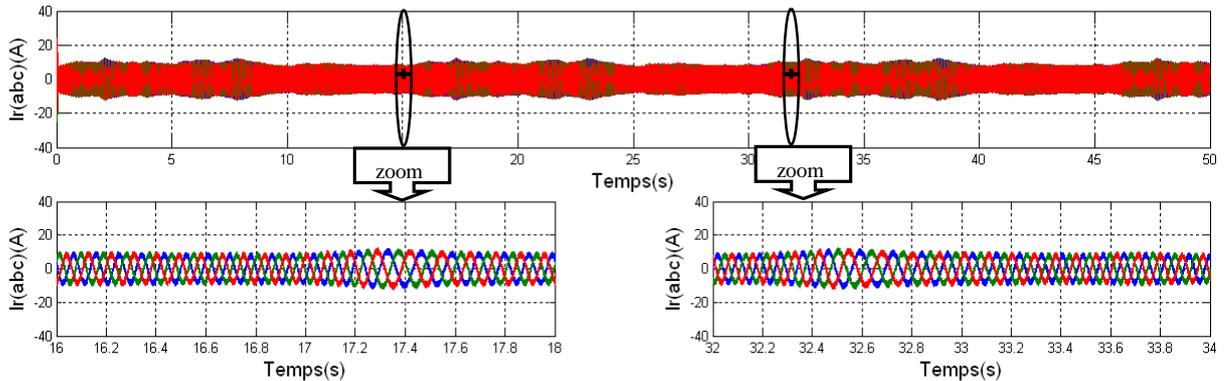


Figure IV -36 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les défirent instant.

IV.9.9 Interprétation des résultats

Les figures ci dessus représentent les différentes courbes obtenues par le réglage en mode glissant des puissances active et réactive de la MADA qui est entraînée par une vitesse fixe et variable (turbine éolien). Lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations. Les perturbations induites par l'onduleur ne permettent pas de distinguer des différences de comportements entre les régulateurs en termes de temps de réponse. Toute fois, on peut constater une absence de dépassements importants et une bonne régularité des signaux de puissance dans le cas de la commande par mode glissant.

La présence de l'onduleur et du modèle d'aérogénérateur ont permis d'effectuer une simulation dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel.

IV.9.10 Résultats de simulation du système avec convertisseur et sans turbine

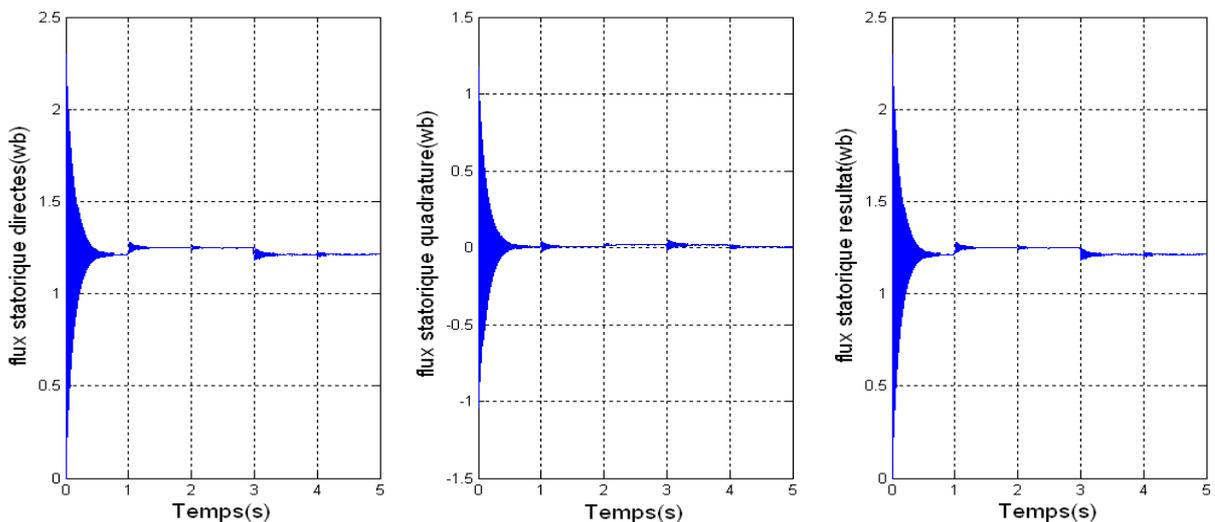


Figure IV -37 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

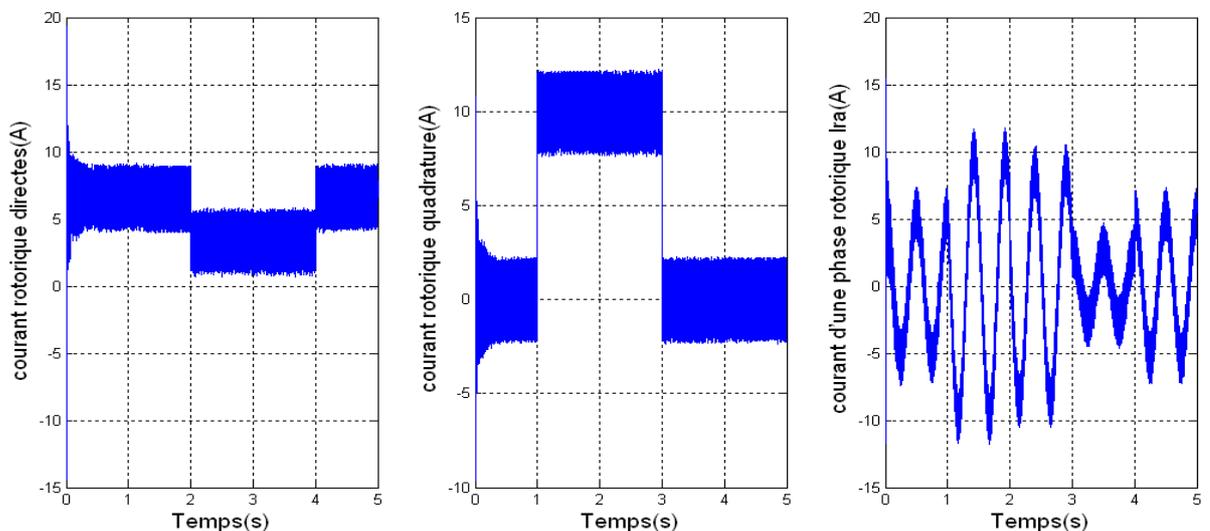


Figure IV -38 : Les composantes du courant rotoriques.

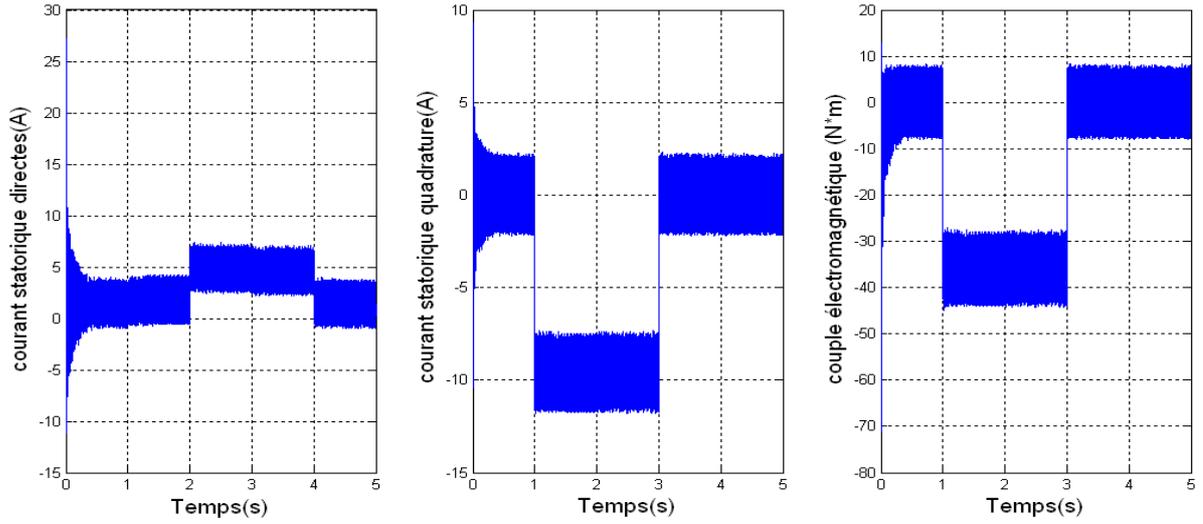


Figure IV -39 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

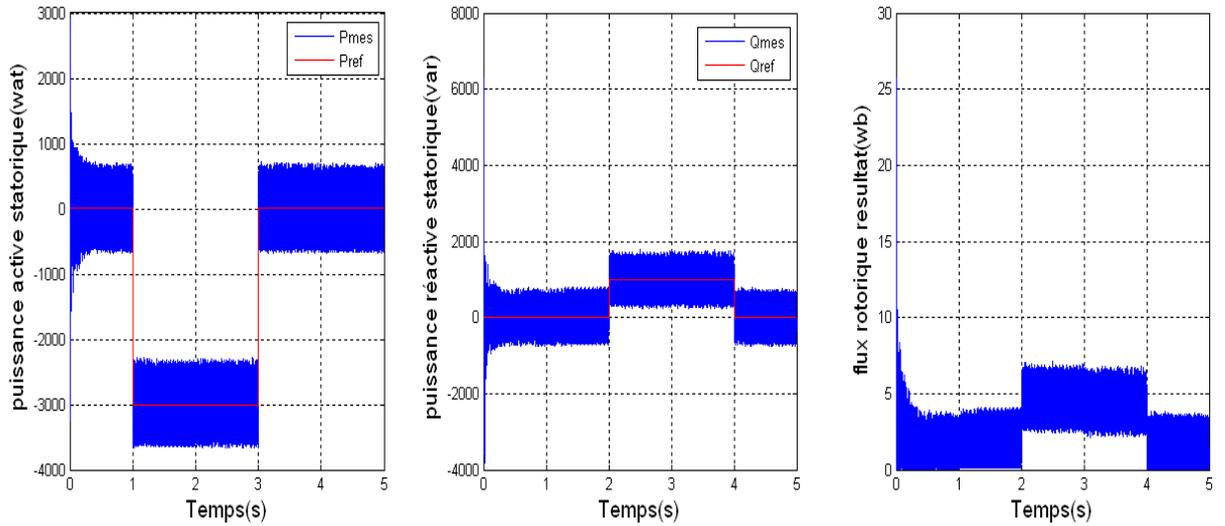


Figure IV 40 : La puissance active et réactive statorique et flux rotorique résultat.

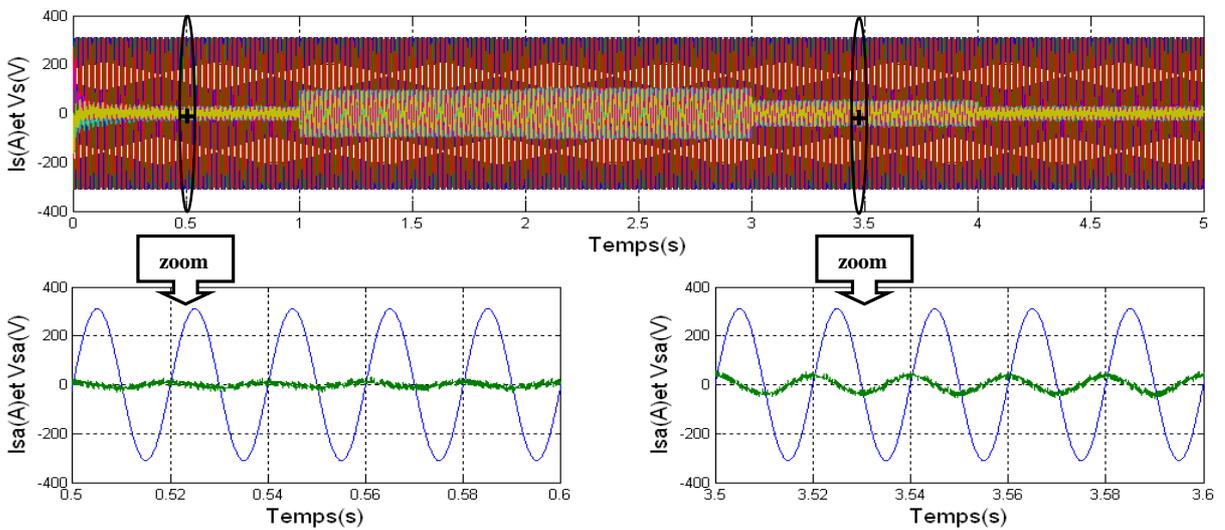


Figure IV -41 : Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom entre les défilent instant.

IV.9.11 Schéma synoptique du système global

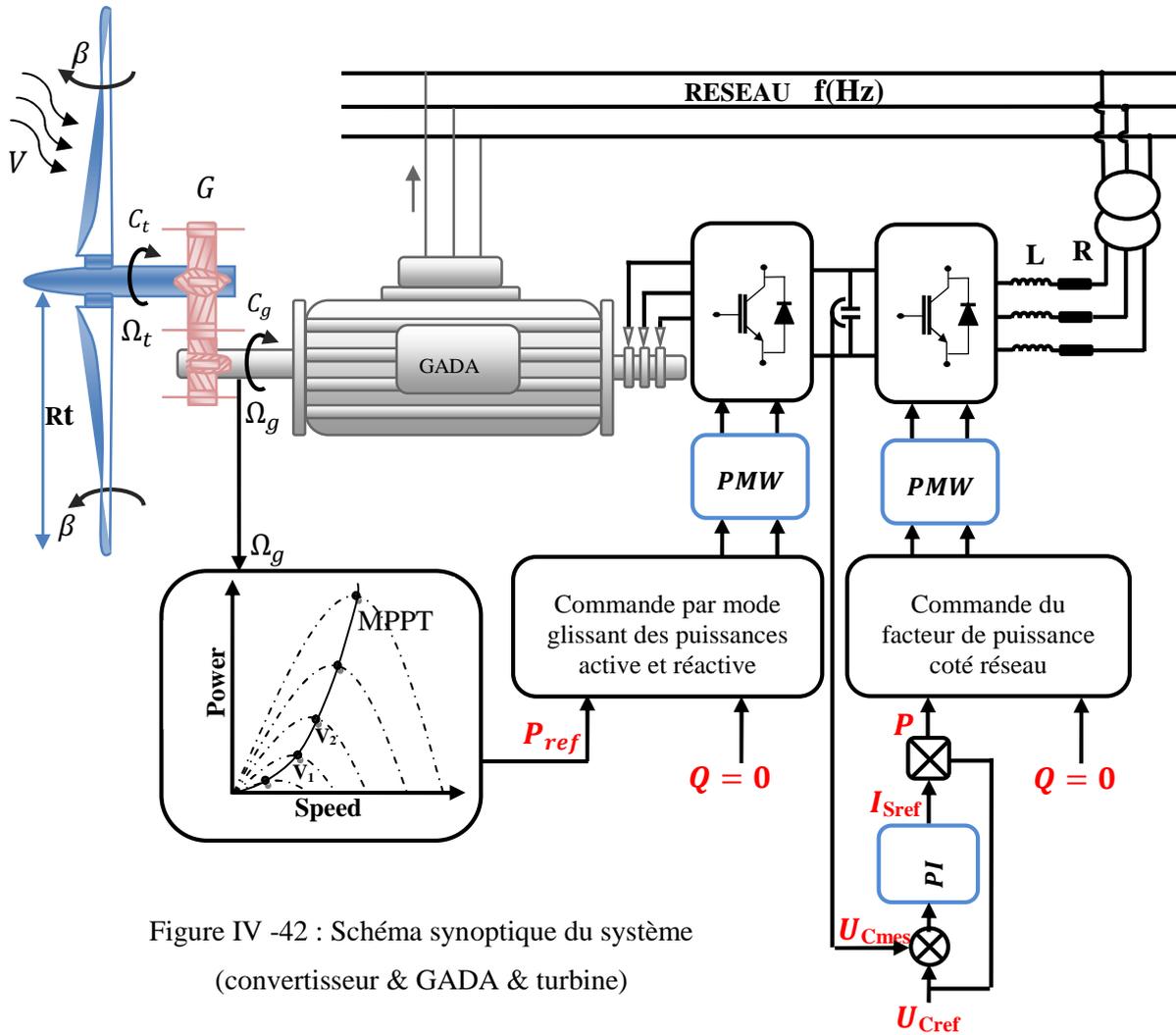


Figure IV -42 : Schéma synoptique du système (convertisseur & GADA & turbine)

IV.9.12 Résultats de Simulation du système avec convertisseur et avec turbine

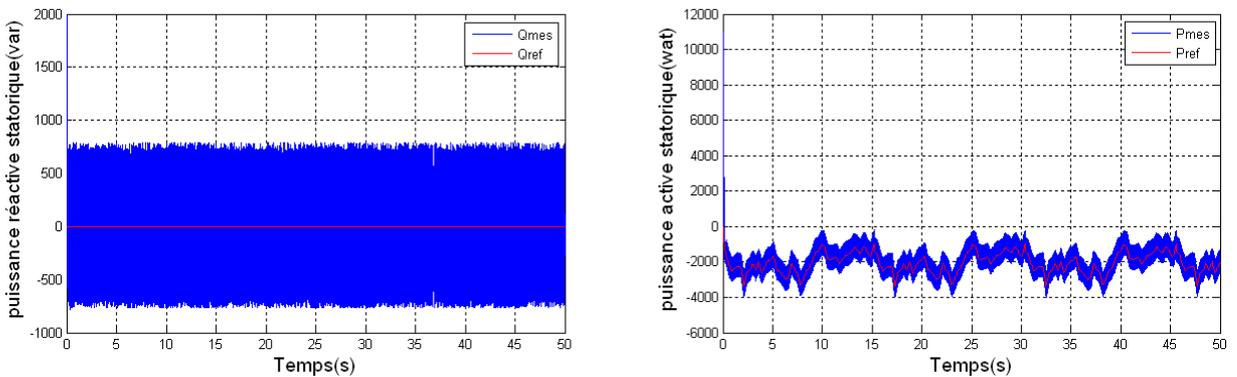


Figure IV -43 : La puissance active et réactive statorique.

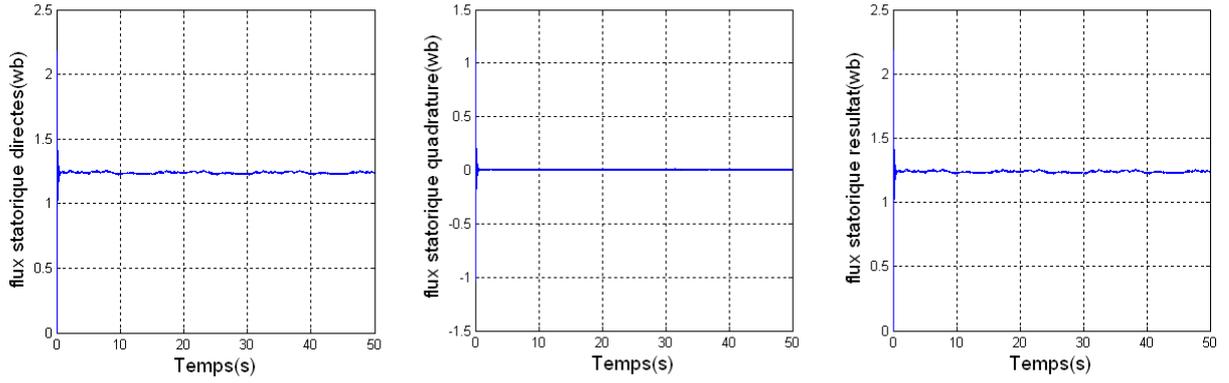


Figure IV -44 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.

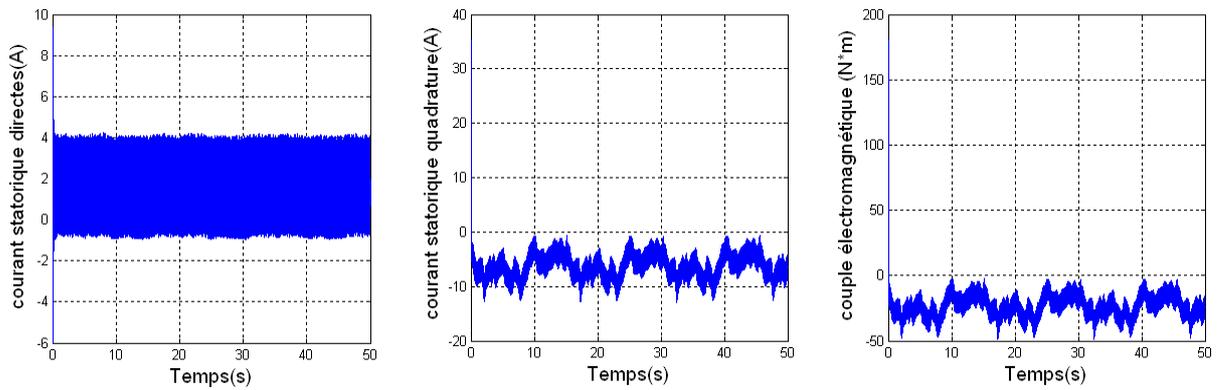


Figure IV -45 : Les composantes du courant statoriques et le couple électromagnétique.

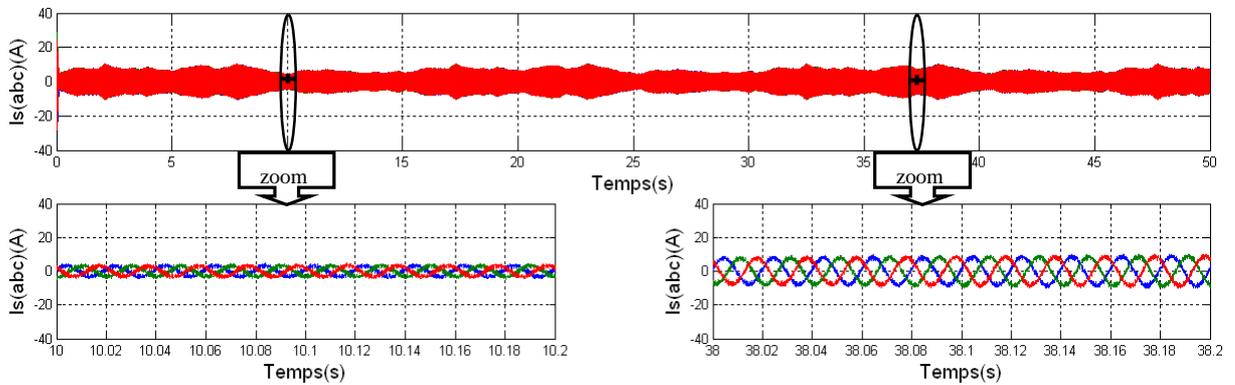


Figure IV -46 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les défèrent instant.

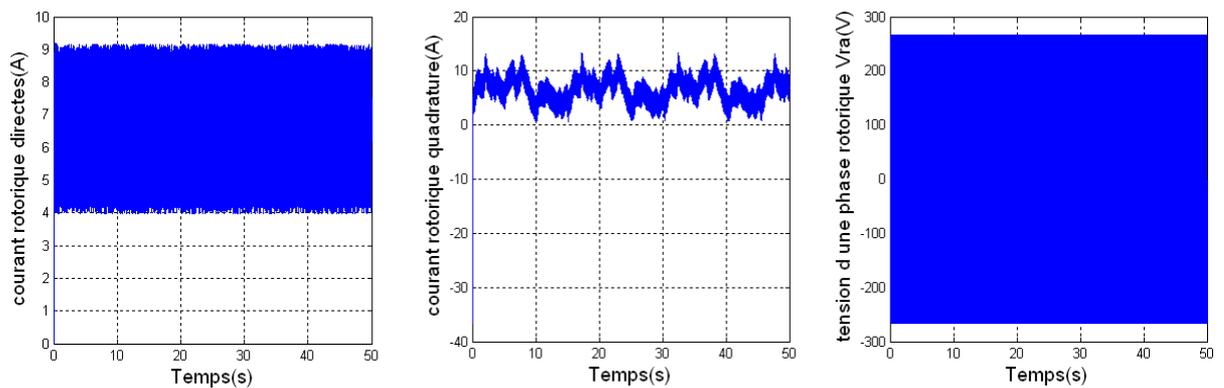


Figure IV -47 : Les composantes du courant rotoriques et la tension ondulée rotorique.

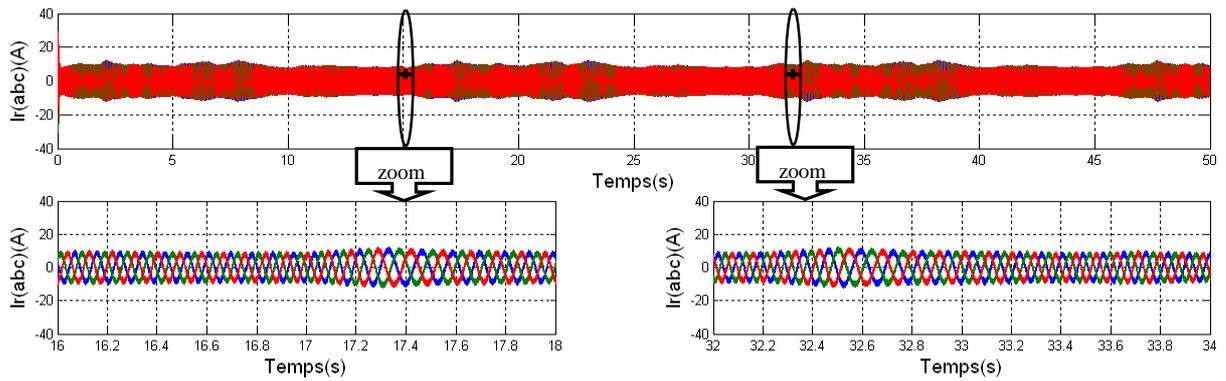


Figure IV -48 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les défirent instant.

IV.9.13 Interprétation des résultats

Les figures présentées montrent les performances de la cascade utilisant un redresseur, et un onduleur à deux niveaux connecte au rotor de la MADA qui est entraîné par une vitesse constant et variable (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.

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.10 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 résultats de simulation d’obtenus pour la variation de la puissance active et réactive avec vitesse constant. La figure (IV -49) montre que la puissance active et réactive suit sa nouvelle référence dans les deux types de commande par contre la C.M.G présente un temps de réponse plus faible que la C.V. Les tensions données par C.V subit un pic de transition, alors que Les tensions données par la C.M.G présente un pic plus important par pour la C.V mais il regagne rapidement.

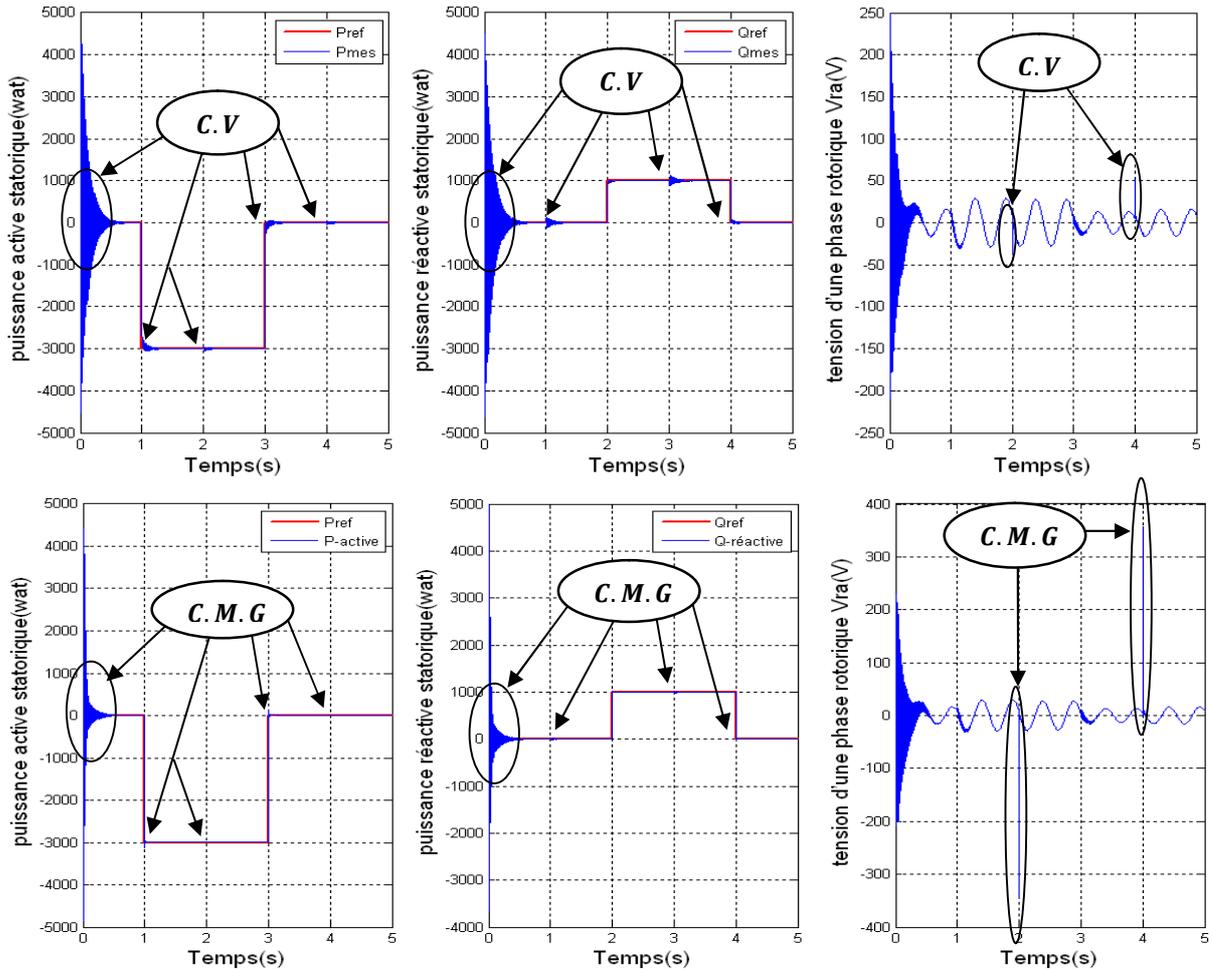
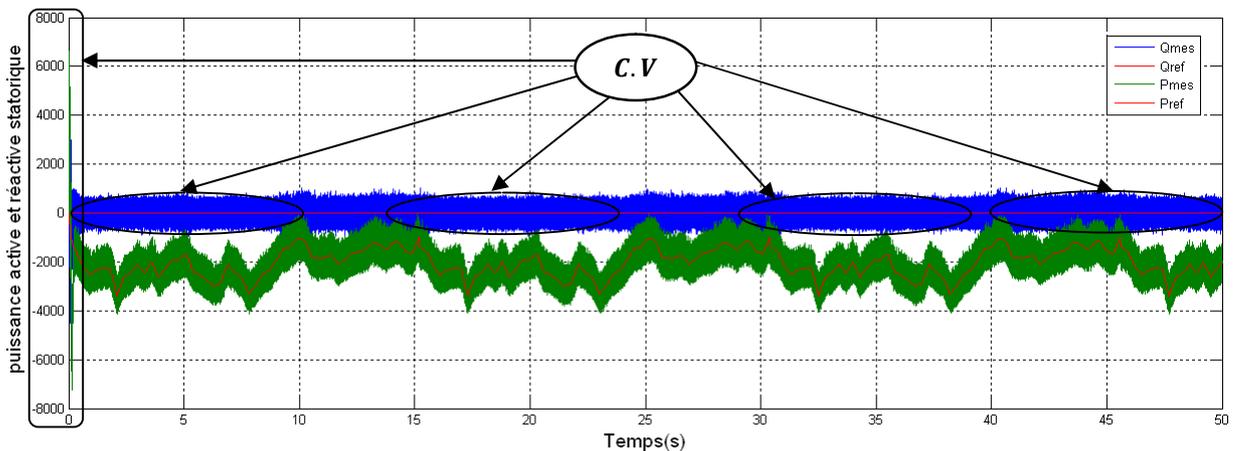


Figure IV -49 : La puissance active et réactive statorique et la tension d'une phase rotorique.

Les résultats de simulation d'obtenus pour la variation de la puissance active (turbine éolienne). La Figure (IV-50) montre les variations de puissance active et réactive lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations. La durée sur laquelle les mesures sont effectuées (50s) et les perturbations induites par l'onduleur ne permettent pas de distinguer des différences de comportements entre les régulateurs en termes de temps de réponse. Toutefois, on peut constater une absence de dépassements importants et une bonne régularité des signaux de puissance dans le cas le réglage par mode de glissement.



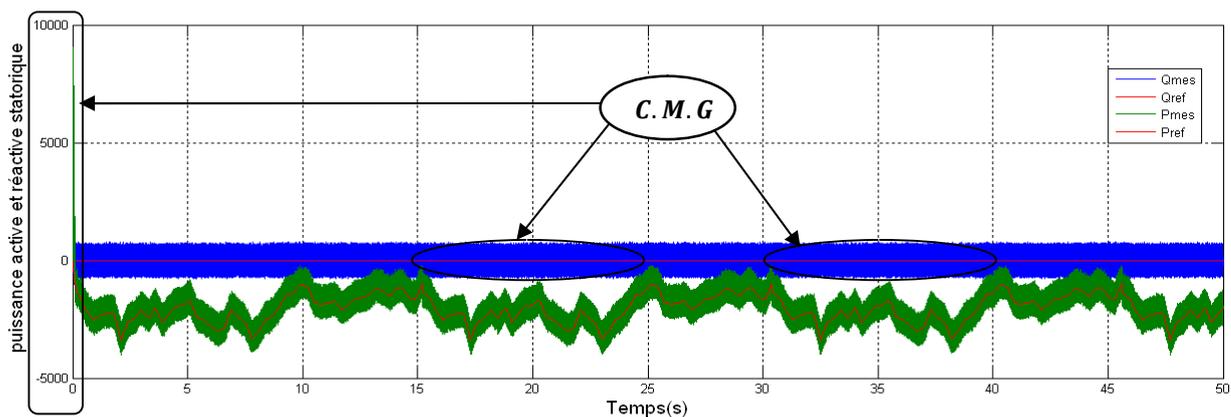


Figure III-50 : La puissance active et réactive statorique.

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. La figure (IV -51) montre que la puissance suit sa nouvelle référence dans les deux types de commande par contre la C.M.G présente un temps de réponse plus faible que la C.V. La puissance réactive donnée par la C.V subit une perturbation de transition puis regagnent leurs valeurs de référence, alors que la puissance réactive donnée par la C.M.G présente une perturbation plus faible mais il regagne rapidement sa valeur de référence. Les courbes des puissances active et réactive donnée par la C.M.G présentent des oscillations faible lors de régime transitoire par rapport Les courbes donnée par la C.V.

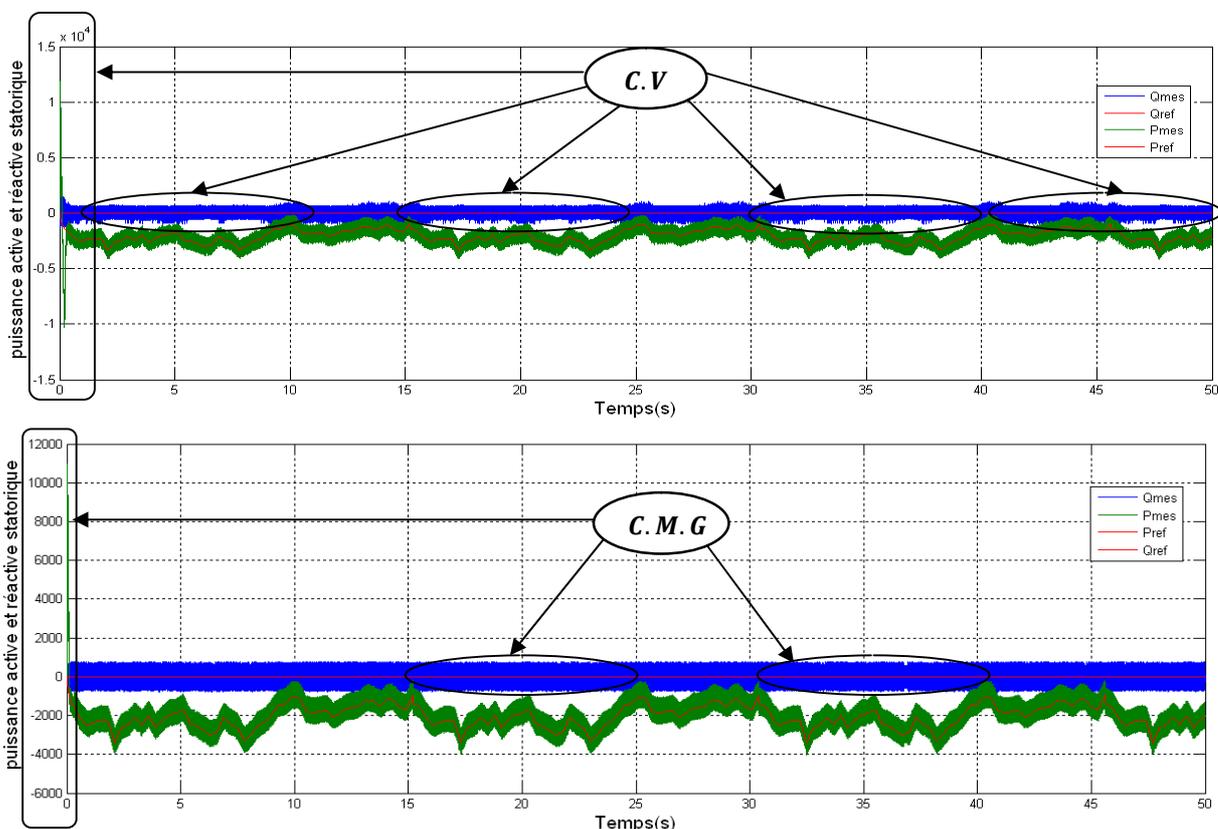


Figure III-51 : La puissance active et réactive statorique.

IV.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'aspect théorique de la commande à structure variable et ces différentes structures. Nous avons d'abord fait un rappel sur le mode glissant. Ensuite on a définie les conceptions nécessaires de cette commande comme le choix convenable de surface de commutation et la loi de commande, enfin la manière par laquelle réduire le phénomène de broutement résultant par la loi de commande.

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.

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). Ces résultats obtenus dans le cadre de cette application en simulation mettent en valeur les performances de chaque technique de commande (dépassement, robustesse, rapidité...).

Finalement on peut conclure que le réglage par mode de glissement présente une meilleure robustesse que celle de la commande vectorielle, en plus des avantages inhérents à l'utilisateur de la MADA (robustesse, fiabilité), cette robustesse garante une bonne insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques. On ne peut a priori affirmer que telle ou telle méthode est adéquat pour la régulation des puissances active et réactive avec les différents contrôles des grandeurs électriques qui accompagnent cette régulation.

CONCLUSION GÉNÉRAL

Le but de ce travail était l'étude et simulation d'un système de production d'énergie éolienne. Nous avons modélisé des différents composants du système éolien ensuite utiliser ces modèles pour élaborer deux stratégies de commande qui permettent l'amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique.

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, nous nous sommes intéressés à l'étude de la partie mécanique de l'éolienne et à sa commande. Nous avons développé un technique de maximisation de la puissance extraite. Les résultats de simulation d'un algorithme ont montré l'efficacité du contrôle que se soit pour la poursuite du point de fonctionnement optimale. Ensuite, les différentes structures utilisées pour la conversion électromécanique ont été décrites, parmi les quelles figure le système étudié à base d'une machine asynchrone à double alimentation qui a été détaillée dans le **deuxième chapitre**, en abordant ses aspects théoriques et ses différentes applications en tant que moteur ou génératrice. Le chapitre a été conclu par une modélisation de cette machine qui a validé sa convenance pour les systèmes à vitesse variable. 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 exprimée les grandeurs statoriques de la MADA 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 statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue supposée 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. La première série de simulations est effectuée sans onduleur, La deuxième série de simulations est effectuée avec onduleur, La troisième est effectuée avec convertisseur, dans tous les cas, la MADA est entraînée par une vitesse fixe et variable (turbine éolienne), Pour améliorer les performances de cette commande et parvenir à des meilleurs résultats, l'identification en ligne des paramètres de la machine s'avère indispensable.

Dans ce sens, notre contribution est de proposer une méthodologie de commande robuste liée aux systèmes à structures variables, qui a été détaillée dans le **quatrième chapitre**, dont le but est de palier les inconvénients des commandes classiques, vu que la CMG est par nature une commande non linéaire et que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue, en l'occurrence, la commande par mode glissant. 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 l'étude du contrôle par mode glissant de la MADA présente une stratégie de commande 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. On peut donc conclure que la technique de commande par mode glissant utilisée pour la commande de la MADA a conduit à des bonnes performances, dans beaucoup de cas, on obtient une qualité de réglage meilleur par rapport à la commande vectorielle, cette dernière offre certaines avantages :

- Une robustesse par rapport aux variations des paramètres du système.
- Un dynamique très performant "temps de réponse acceptable et erreur stationnaire pratiquement nulle".
- Une simplicité de la mise en œuvre de la loi de commutation.

En guise de perspective de recherche, nous envisageons :

- ❖ L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- ❖ L'établissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique
- ❖ L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique flou, réseaux de neurones, mode glissant...etc.
- ❖ L'intégration éventuelle d'un système de stockage inertiel
- ❖ 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

- [AOU 09] D. AOUZELLAG, K. GHEDAMSI, E.M. BERKOUK. « *Network power flux control of a wind generator* ». Renewable Energy, Volume 34, Issue 3, pp 615- 622, Elsevier 2009.
- [AHC 07] B. AHCENE, « *Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés* », mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique, Février 2007.
- [ABD 06] B. ABDELOUHAB et H. Adel, « *Commande par mode de glissement d'une suspension active d'un véhicule* », PFE, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.
- [ABB 06] M. ABBAS, M. MECHENTEL, « *Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'énergie éolienne* », Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale Polytechnique Alger 2006.
- [BOU 06] B. BOUKHEZZAR. « *Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable* ». Thèse de doctorat, université paris XI 2006.
- [BET 03] F. BETIN, « *Commande d'actionneurs électriques soumis à une charge mécanique à fortes variations paramétriques* », Habilitation à diriger des recherches, Centre de Robotique d'Electrotechnique et d'Automatique (CREA) UPRES Equipe d'accueil 3299, Université de Picardie Jules Verne, 02880 Cuffies, France, 2003.
- [BÜH 86] H. BÜHLER, « *Réglage par Mode de Glissement* », Presses Polytechniques Romandes, EPFL, Ecublens, Lausanne, Suisse, 1986.
- [BEN 07] H. BENSAAD, « *L'Energie Éolienne au service de la préservation et du développement durable de la steppe.* », Bulletin des Energies Renouvelables N°11, CDER, 06/2007.
- [BAR 09] H. BAREAU, « *Dans l'air du temps, l'énergie éolienne* », Brochure de l'Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), 02/2009.
- [BOY 06] A. BOYETTE, « *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I 2006.
- [BOU 08] Omar BOUHALI, « *Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique* ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [BIA 07] F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ. « *Wind turbine control systems, principles, Modelling and Gain Scheduling Design* ». Springer 2007.
- [BOL 06]. I. BOLDEA. « *Variable speed generators* ». Taylor & Francis 2006.

- [BOU 06] B. BOUKHEZZAR, H. SIGUERDIDJANE, M. M. HAND. « *Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization* ». Journal of Solar Energy Engineering Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006.
- [BEL 02] L. BELHADJI, K-S. SERBIS, « *Implémentation sur carte DSP de la commande directe du couple d'une machine asynchrone* ». Mémoire de fin d'études. Ecole Militaire Polytechnique Alger 2002.
- [CHO 01] H. S. CHOI, Y. H. PARK, Y. CHO and M. LEE, « *Global Sliding-Mode Control Improved Design for a Brushless DC Motor* », IEEE Control Systems Magazine, June 2001.
- [CHE 90] M. CHERKAOUI, « *Contribution à la modélisation, à l'étude et à la commande des machines application à une machine asynchrone à double alimentation* », thèse de doctorat, Polytechnique de Lorraine 1990, France
- [CAM 03] H. CAMBLONG. « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2003.
- [CAL 08] V. CALDERARO, V. GALDI, A. PICCOLO, P. SIANO. « *A fuzzy controller for maximum energy extraction from variable speed wind power generation systems* ». Electric Power Systems Research, Volume 78, Issue 6, pp 1109-1118, Elsevier 2008.
- [CIM 05] Gabriel-Octavian CIMUCA « *systèmes inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens* » Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2005
- [DRI 05] 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.
- [DJE 07] Dr. Hind DJEGHLOUD « *Filtrage actif de puissance* » ; Thèse de doctorat Université de Constantine ; 2007.
- [ELA 04] S. EL AIMANI. « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [ELT 08] Y. EL TOUS. « *Pitch angle control of variable speed wind turbine* ». American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (2), pp 118-120, 2008.
- [FNA 06] M. A. FNAIECH, F. BETIN, F. FNAIECH, G. A. CAPOLINO, « *Sliding mode control for dual three-phase induction motor drives* », IEEE ISIE, Montréal, Québec, Canada, pp. 2281–2285, July 2006.
- [FNA 05] D. Ali et D.Tarek, « *Commande par mode de glissement des Pôles d'une machine à induction linéarisée par orientation du flux* », PFE, université de M'sila, 2005.

- [FNA 96] H. S. KIM, J. H. PARK, Y. K. CHOI, « *Variable Structure Control of Brushless DC Motor using Evolution Strategy with Varying Search Space* », IEEE, 1996.
- [GRI 06] T. GRIGNOUX, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION, « *Éoliennes en milieu urbain - État de l'art* », actualisation 01/2006 (P.SALVI)
- [GHE 08]. K. GHEDAMSIA, D. AOUZELLAGA, E.M. BERKOUK. « *Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system* ». Renewable Energy, Volume 33, Issue 9, pp 2145-2156, Elsevier 2008.
- [GWE 10] Global Wind Energy Council, « *Global Wind 2008 Report.* », disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [HAM 08] I. HAMZAOU, « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [HOC 08] A. 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.
- [IOV 04] F. IOV, A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. BLAABJERG. « *Wind turbine blockset in matlab/Simulink, general overview and description of the models* ». Institute of Energy Technology, Aalborg University. Danemark, March 2004.
- [KHO 06] Sejr KHOJET EL KHIL, « *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)* ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [KHA] F. KHATOUNIAN', E. MONMASSON, F. BERTHEREAU, E. DELALEAU, J.P. LOUIS, « *Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application* ». Univenité de Cergy, France.
- [LAV 05] N. LAVERDURE, « *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires* ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005
- [LEG EY] D.LEGOURIERE, « *Energie éolienne* », éditions EYROLLES, pp 28-31.
- [LOU 10] Lamri LOUZE ,«*Production décentralisée de l'énergie électrique :Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée* ». », Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine. 08/07/2010.
- [MER 08] N. K. MERZOUK, « *Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ?* », Bulletin des Energies Renouvelables N°14, CDER, 12/2008.
- [MUL] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, « *Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne* », ENS de Cachan Antenne de Bretagne.

- [MIR 05] A. MIRCKI, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », Thèse de doctorat De L'Institut national polytechnique de Toulouse.04/2005.
- [MUL 08] B. MULTON, Equipe SETE, « *Energies. Energie électrique : les enjeux*». Ecole Normale Supérieure de Cachan.11/2008.
- [MUY 09] S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA. « *Stability augmentation of a grid-connected wind farm* ». Springer 2009.
- [MUN 08] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « *Optimal control of wind energy systems* ». Springer 2008.
- [MAN 04] M.N. MANSOURI, M.F. MIMOUNI, B. BENGHANEM, M. ANNABI. « *Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network* ». Renewable Energy, Volume 29, Issue 3, pp 421-431, Elsevier 2004.
- [MOL 08]. M. G. MOLINA, P. E. MERCADO. « *A new control strategy of variable speed wind turbine generator for three-phase grid-connected applications* ». Power Systems Conference and Exposition, vol.2, pp 759 – 764, IEEE 2008.
- [MUL 06] Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, « *Aérogénérateurs électriques* ». L'Université de Paris 6, Universités à l'Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan/SATIE.
- [MAC 89] M. MACHMOUM, « *Contribution à l'étude de la commande numérique de l'ensemble Cycloconvertisseur triphasé-Machine Asynchrone à Double Alimentation* », Thèse de doctorat. Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, 1989.
- [NOU 01] S.NOUI, « *Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux* », Mémoire de magister. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2001
- [QUA 08]. N. P. QUANG, J.-A. DITTRICH. « *Vector control of three-phase ac machines* ». Springer, 2008.
- [ROG 04] V. ROGEZ. « *Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire* ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004.
- [RIO 96] P.RIOUAL, H. POULIQUEN, J-P. LOUIS, « *Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized mode l*». IEEE Transactions on power electronics. Vol 11, No 3. 05/1996.

- [SAL 07] Georges SALLOUM « *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2007.
- [SEG 06] Guy SEGUIER, Francis NOTELET, « *Electrotechnique industrielle* ». Edition Lavoisier, 2006.
- [THE 10] The Wind Power, « *Base de donnée sur les éoliennes et parcs éoliens* », sur site internet : [//www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net). 02/2010.
- [POI 03] F. POITIERS, « *Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau* ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- [VID 04] Paul-Etienne VIDAL, « *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2004.
- [ZAR 11] By B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro «Power conversion and control of wind energy systems ». © 2011 the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Published 2011 by John Wiley & Sons, Inc.
- [ZIN] B. ZINE LAABIDINE « *Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la machine asynchrone a double alimentation par régulateur pi-flou* », Mémoire de magister, Ecole normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran .

ANNEXES

Annexe A :**1- Les paramètres de la machine à induction double alimentée:****Valeurs nominales :**

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

Paramètre :

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

Constantes mécaniques :

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

2- Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale:	$N_p = 3$
Diamètre d'une pale :	$R_T = 3m$
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 :	$L_f = 0.005H$

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

$$C = 4400 \mu F$$

Annexe B

3- Dimensionnement du régulateur PI

La figure (AN-51) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

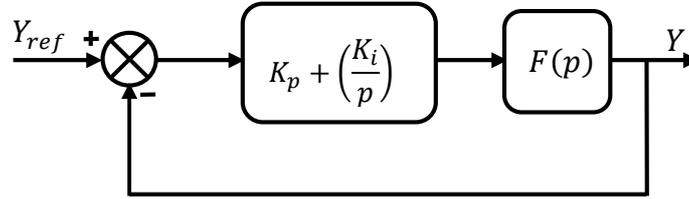


Figure AN-52 : Schéma bloc d'un système réglé par un PI

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

Avec K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur ;

Si on considère la fonction du transfert suivante :

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

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

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

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

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

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

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

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

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

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

Résumé

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales. Le premier chapitre présenté un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre, Le troisième et le quatrième chapitre présenté la commande en puissance active et réactive de la MADA en utilisant deux stratégies différentes Ensuite nous somme intéressé à des cascades basées sur une machine asynchrone à double alimentation et des convertisseurs deux – niveaux. Les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances de l'application de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine éolien.

Mots clés:

Turbine Eolienne - Modélisation - MADA- Commande Vectorielle - Commande Par Mode Glissant – Convertisseur.

Abstract

In this thesis, we expose the study of a wind system with a doubly fed induction generator driven by a variable pitch wind turbine. The first chapter presented a state of the art on the wind mills, the various structures of feeding and the type of generator used, we chose the asynchronous machine with double power supply controlled through the rotor variables. The modeling of the asynchronous machine with double power is detailed in the second chapter. The third and the fourth chapter are dedicated to the modeling and the control of the active and reactive powers of the DFIG using two different strategies ,then we are interested in cascades based on an asynchronous machine with double power supply and two levels converters. Lastly, we made a control of a whole chain of wind conversion by applying an MPPT algorithm to optimize the energetic efficiency of the wind chain. The results obtained with simulation allowed the performance evaluation of the application of the asynchronous machine double power supply in the wind field.

Key words:

Wind Turbine - Modelling – DFIG - Vector Control - Sliding Mode Control –Converters.

ملخص:

في هذه المذكرة, نعرض دراسة لنظام توليد طاقة الرياح باستخدام مولد حيثي مزدوج التغذية مقتاد بواسطة عنفه ذات الشفرة المتغيرة. المحور الأول يعرض الحالة الفنية على الناعورة الهوائية مختلف بنيات التغذية و نوع المولدة المستعملة, فوق اختيارنا على المكنة اللامتزمنة ذات تزويد مضاعف والمنقادة من خلال متغيرات الدوار. نموذج المكنة اللامتزمنة ذات تزويد مضاعف تم تفصيله في الفصل الثاني. المحور الثالث والرابع يعرض التحكم بالقدرة الفعالة و قدرة رد الفعل للساكن للمكنة اللامتزمنة ذات تزويد مضاعف و ذلك باستخدام خطتين مختلفتين وبعد ذلك نهتم بالربط القاعدي للمكنة اللامتزمنة ذات تزويد مضاعف و محول ثنائي المستوى. نتائج التمثيل المحصل عليه سمحت بتقييم تطبيق المكنة اللامتزمنة ذات تزويد مضاعف في مجال الطاقة الهوائية.

كلمات مفتاحيه:

ناعورة هوائية, محاكاة, مكنة لا تزامنية ثنائية التغذية, تحكم شعاعي, تحكم بالانزلاق, محول