



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

Thème

**Modélisation et commande d'un système
éolien par régulateur PI base de MADA
Avec vitesse variable**

Réalisé par :

 **GUEDDA Adel**
 **SALHI Abd Errazzak**
 **SOUIDE Aymen**

Encadré par :

Dr. Guediri Abdel Karim

Année Universitaire 2019/2020



﴿ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إَصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ
عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا رَبَّنَا وَلَا تُحَمِّلْنَا مَا لَا طَاقَةَ لَنَا بِهِ وَاعْفُ عَنَّا وَاعْفِرْ لَنَا
وَارْحَمْنَا أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ الْكَافِرِينَ ﴾ سورة البقرة : الآية 286 .

" صدق الله العظيم "

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et

la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : GVEDIRI Abdel Karim, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued , pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.

ملخص

Résumé

Abstract

الملخص

يقدم هذا العمل تقنية تحكم بواسطة منظم PI المعتمد على محرك لا متزامن ثنائي التغذية MADA مع سرعة متغيرة مطبقة على نظام تحويل طاقة الرياح ذو الطاقة المتوسطة والمجهز بمولد غير متزامن ثنائي الطاقة. تجد هذه التقنية أقوى تبرير لها مع مشاكل عدم اليقين في النموذج باستخدام قانون التحكم غير الخطي. الهدف هو تطبيق هذا الأمر للتحكم في تبادل الطاقة النشطة والمتفاعلة التي تولدها الآلة غير المتزامنة مع مصدر طاقة مزدوج متصل بشبكة الجهد المتوسط من خلال العمل على إشارات الدوار عبر محول ثنائي الاتجاه. تظهر نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها الاهتمام المتزايد بمثل هذا التحكم في الأنظمة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية:

منظم PI ، مولد مزدوج غير متزامن ، تحكم غير خطي ، أنظمة كهربائية.

RÉSUMÉ

Ce travail présente une technique de **commande par régulateur PI base de MADA avec vitesse variable** appliquée au système de conversion d'énergie éolienne moyenne puissance équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation . Cette technique trouve sa plus forte justification aux problèmes d'incertitudes du modèle par l'utilisation d'une loi de commande non linéaire. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à double alimentation raccordée au réseau moyenne tension en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

LES MOTS CLÉS:

régulateur PI, génératrice asynchrone à double alimentation, le commande non linéaire, les systèmes électriques.

ABSTRACT

This work presents a control technique by **MADA based PI regulator with variable speed** applied to the medium power wind energy conversion system equipped with a dual power asynchronous generator. This technique finds its strongest justification with the problems of uncertainties of the model by the use of a nonlinear control law. The objective is to have this command to control the exchange of active and reactive powers generated by the asynchronous machine with double power supply connected to the medium network via voltage by acting on the signals at a bidirectional converter. The results of numerical simulations obtained have shown the interest of such a control in electrical systems.

KEY WORDS:

PI control. doubly-fed induction generator. nonlinear control. electrical systems.

*Table
des
Matières*

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale.....A

CHAPITRE I: Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques

I.1. Introduction.....	3
I.2 Prédiction optimale de l'énergie.....	3
I.2.1Fonctionnant a vitesse fixe.....	3
I.2.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	4
I.3 La conversion electromecanique dans les systemes eoliennes.....	5
I.3.1 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	5
I.3.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	5
I.3.1.2 Générateur asynchrone à double stator.....	6
I.3.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.....	7
I.3.2 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	8
I.3.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné synchrone.....	9
I.3.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP).....	9
I.3.3 Evolution des systèmes de (G V V) vers la double alimentation.....	9
I.3.3.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné ".....	10
I.3.3.2 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade.....	11
I.3.3.3 Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB).....	12
I.3.3.4 Comparaison des topologies et choix de la MADASB.....	14
I.4 Conclusion.....	15

Chapitre II: Etude et Modélisation du système de conversion éolienne

II-1-Introduction	17
II-2 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	18

II.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	18
II.2.2. Principaux composants d'une éolienne.....	19
II.3. Les différents types d'éoliennes.....	20
II.3.1. Eoliennes à axe vertical.....	20
II.3.2. Eoliennes à axe horizontal.....	22
II.4. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	23
II.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne.....	26
II.5.1. Bilan des forces sur une pale.....	26
II.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	27
II.5.2. 1.Système à décrochage aérodynamique "stall".....	27
II.5.2.2. Système d'orientation des pales "pitch".....	28
II.6. Conclusion.....	29
 <i>Chapitre III: Machine asynchrone à double alimentation (MADA)</i>	
III.1. Introduction.....	31
III.2 Présentation de MADA.....	31
III.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation	31
III.2.2 Description des composants de la MADA	32
III.3. La double alimentation	32
III.4. Structure de la MADA.....	32
III.4.1. MADA à rotor bobiné.....	33
III.4.2. MADA sans balais.....	33
III.4.3. MADA en cascade.....	33
III.5. Mode de fonctionnement.....	34
III.5.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	34
III.5.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	35
III.5.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	35
III.5.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	36
III.6. Les différentes configurations de la MADA à rotor bobiné.....	36
III.6.1. Configuration pour application en génératrice.....	37
III.6.1.1. MADA à énergie rotorique dissipée.....	37
III.6.1.2. Structure de KRAMER.....	37
III.6.1.3. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur	38
III.6.1.4. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI	39

III.7. Avantages et inconvénients de la MADA	40
III.7.1. Avantages de la MADA.....	40
III.7.2 Inconvénients de la MADA.....	40
III.8. Application des machines asynchrones à double alimentation	41
III.8.1 Application moteur	41
III.8.2 Application génératrice.....	41
III.9. Modélisation de la MADA	41
III.9.1 Hypothèses simplificatrices.....	41
III.9.2. Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c).....	42
III.9.2.1. Equations électriques.....	43
III.9.2.2 Equations magnétiques.....	43
III.10. Application de la transformation de Park à la GADA.....	43
III.10.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)	44
III.10.1.1. Equations électriques.....	44
III.10.1.2. Equations magnétiques	45
III.10.1.3. Equations électriques sous forme matricielle.....	45
III.10.1.4. Expression de la puissance active et réactive.....	46
III.10.1.5. Expression du couple électromagnétique.....	46
III.11. Conclusion.....	50

Chapitre IV: Modélisation et commande d'un système éolien par régulateur PI

IV.1. Introduction	52
IV.2. Principe de la commande vectorielle de la DFAM.....	52
IV .3 Schéma bloc réduit de la MADA.....	56
IV.4. Commande vectorielle directe en P et Q de la MADA en génératrice.....	57
IV.4.1. Synthèse des régulateurs.....	58
IV.4.2. Commande indirecte.....	60
IV.4.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte.....	60
IV.4.2.2. Commande indirecte en boucle fermée.....	61
IV.4.2.2.1. Commande sans boucle de puissance.....	61
IV.4.2.2.2. Commande avec boucle de puissance.....	61
IV.5. Modélisation des convertisseurs	62
IV. 6. Régulateur de tension de bus continue.....	65
IV.7. Alimentation de la DFAM.....	67

IV.8. Calculer des régulateurs des courants rotoriques	71
IV.9. Résultats de simulations	73
IV.10. Tests de robustesse.....	77
IV .11. Conclusion	80
Conclusion générale	82
Bibliographie	



Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
CHAPITRE I: Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques		
I.1	Aérogénérateur à vitesse fixe	4
I.2	Aérogénérateur à vitesse variable	4
I.3	Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	6
I.4	Générateur asynchrone à double stator	7
I.5	Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau	7
I.6	Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs	8
I.7	système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable	9
I.8	schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée par le rotor	10
I.9	Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade	12
I.10	machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage ou réluctant	13
I.11	Rotor de la MADASB	13
I.12	Schéma de couplage croisé entre les deux stators	13
Chapitre II: Généralité sur l'énergie éolienne		
II.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent	18
II.2	Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne	20
II.3	Éolienne de Savonius	21
II.4	Éolienne de Darrieus	22
II.5	Éoliennes à axes horizontales	23
II.6	Tube de courant autour d'une éolienne	24
II.7	Coefficient de puissance	25
II.8	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	25
II.9	Bilan des forces sur une pale	26
II.10	Flux d'air sur un profil de pale " stall "	27
II.11	Variation de l'angle de calage d'une pale	28
Chapitre III: Machine asynchrone à double alimentation (MADA)		
III.1	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	31
III.2	Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné	33
III.3	Structure de la MADA sans balais	33
III.4	Structure en cascade de deux machines asynchrones	34
III.5	Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	35
III.6	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	35
III.7	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	36

LISTE DES FIGURES

III.8	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	36
III.9	MADA à énergie rotorique dissipée	37
III.10	MADA à structure de KRAMER	38
III.11	Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur	39
III.12	Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI	39
III.13	Représentation simplifié de la MADA	42
III.14	Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques	44
III.15	schéma bloc de GADA	47
III.16	Courbe de la puissance active statorique avec zoom	48
III.17	Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom	48
III.18	Courbe du courant rotorique avec zoom	49
III.19	Courbe du courant statorique avec zoom	49
III.20	Courbe de la couple avec zoom	50
Chapitre IV: Modélisation et commande d'un système éolien par régulateur PI		
IV.1	Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA	53
IV.2	Orientation de la tension et de flux statorique	54
IV.3	Schéma bloc du système à réguler	56
IV.4	Commande vectorielle avec un seul régulateur	58
IV.5	Schéma bloc d'un système régulé par un PI	58
IV.6	Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension	60
IV.7	Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	61
IV.8	Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance	62
IV.9	Schéma de principe de la commande du RSC	62
IV.10	Structure d'un redresseur triphasé à deux niveaux	63
IV.11	Schéma du Convertisseur GSC et du filtre	64
IV.12	Schéma de principe du contrôle du GSC	64
IV.13	Modèle de la boucle de tension	65
IV.14	Modèle en boucle fermé de la boucle de tension du bus continu	66
IV.15	Spectre des harmoniques de contrôle de la tension du bus continu	67
IV.16	Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI	68
IV.17	Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions	69
IV.18	Onduleur de tension avec onde porteuse	69
IV.19	Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur	70
IV.20	Schéma fonctionnel de régulation du courant idr	71
IV.21	Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA	72
IV.22	Tension du bus continu (V)	74
IV.23	Couple électromagnétique	74
IV.24	Les courants direct et quadrature rotoriques	74

LISTE DES FIGURES

IV .25	Les courants direct et quadrature statorique	75
IV .26	Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique	75
IV .27	Courant triphasé ratorique	75
IV.28	Courant triphasé statoriques	75
IV .29	Courant par phase statoriques	76
IV .30	Courant par phase ratorique	76
IV .31	Le courant et la tension statoriques	76
IV .32	Zoom sur le courant et la tension statoriques	76
IV .33	Couple électromagnétique	77
IV .34	Les courants direct et quadrature rotoriques	77
IV .35	Les courants direct et quadrature statorique	78
IV .36	Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique	78
IV .37	Courant triphasé statoriques	78
IV .38	Courant triphasé rotorique	78
IV .39	Courant par phase rotorique	79
IV .40	Le courant et la tension statoriques	79
IV .41	Zoom sur le courant et la tension statoriques	79

LISTE DES TABLEAUS

Tableau		Page
<i>CHAPITRE I: Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques</i>		
<i>I.1</i>	Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE	14

Notations

et

Symboles

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	Densité de l'air à 15°C
M	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
Λ	Vitesse relative de l'éolienne
B	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La vitesse de synchronisme
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
V	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$J_{pale}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h(kg.m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
K_b	Elasticité de pale
K_h	Elasticité de l'arbre
D_h	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
D_g	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice

f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
F	Coefficient de frottement visqueux
Db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E[J]$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref}[N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}[N.m]$	Couple aérodynamique estimé
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{coor}	Angle coordonnée
$E_r [V]$	f e m au rotor
$E_s [V]$	f e m au stator
Ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
$S_s[VA]$	La puissance apparente au stator
$S_r[VA]$	La puissance apparente au rotor
$P_s[W]$	La puissance active au stator
$P_r[W]$	La puissance active au rotor
$Q_s[VAR]$	La puissance réactive au stator

$Q_r[\text{VAR}]$	La puissance réactive au rotor
G	Glissement
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)
$[M_{rs}]$	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique
$V [V]$	Tension
$I [A]$	Courant
$\Phi [\text{Wb}]$	Flux
$M [H]$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
$l_s [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du stator
$l_r [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
$M_s[H]$	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
$M_r[H]$	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d,q
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d,q
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d,q
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d,q
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d,q
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d,q

S	Opérateur dérivé de Laplace
P	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique
F_r	Fréquence de rotor
F_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système

Sigles utilisés

MADA=DFAM	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel – Intégrale

An orange, rounded rectangular shape with a drop shadow, serving as a background for the title text.

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme. Portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché ont une hélice de plus 120 m de diamètre et une tour qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ, ce qui l'équivalent d'un immeuble d'environ 50 étages ! Cette contrainte mécanique a poussé les chercheurs à mener une nouvelle voie de recherche qui s'intéresse à la maximisation de la puissance et l'amélioration du rendement et des performances des systèmes éoliennes et à leur intégration dans les réseaux électriques.

Donc Ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes, les éléments constitutifs ainsi la modélisation de l'éolienne.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse fixe. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle qui permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive .

Dans le troisième chapitre, on va présenter la modélisation de l'alimentation du rotor, basée sur deux convertisseurs électroniques commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). L'un de ces deux convertisseurs (celui du côté réseau) est commandé pour assurer la stabilisation de la tension du bus continu alimentant le deuxième convertisseur et des courants sinusoïdaux purement actifs à l'entrée. Ce dernier est placé du côté du rotor, il est commandé pour garantir un réglage du couple électromagnétique de la machine à sa consigne optimale qui correspond à la production maximale de l'énergie et permettre l'orientation du flux statorique de la machine tout en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au stator.

CHAPITR I

*Générateurs électriques
utilisés dans les réseaux
électriques*

I.1. Introduction:

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

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique.

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

I.2 Prédiction optimale de l'énergie

I.2.1 Fonctionnant à vitesse fixe:

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I-1), 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.

✓ Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

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

✓ 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.

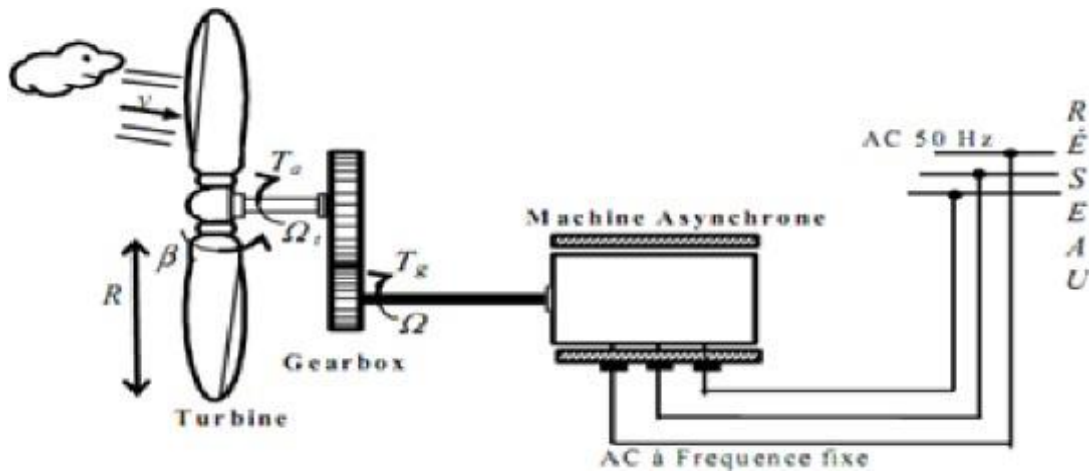


Figure I.1. Aérogénérateur à vitesse fixe.

I.2.2. 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).

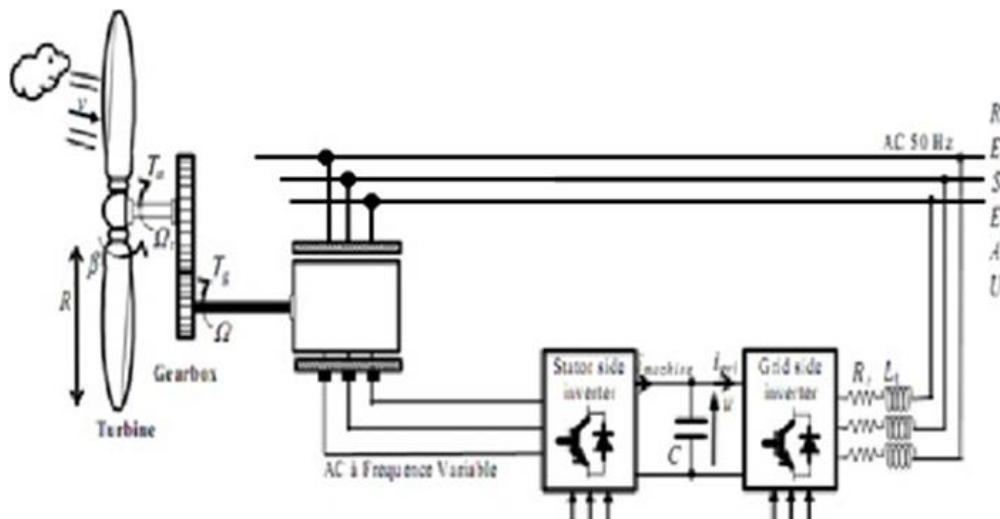


Figure I.2 : Aérogénérateur à vitesse variable

I.3. La conversion électromécanique dans les systèmes éoliens

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'énergie électrique. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable, [6]. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne, [3]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, [6] le générateur asynchrone est plus courant et économique. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.3.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.3.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Écureuil (GACE)

La machine asynchrone à cage d'écureuil en fonctionnement génératrice équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, [3]. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), [7].

Les machines asynchrones à cage sont connues par leur construction extrêmement simple, leurs robustesses, leurs sécurités de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être fabriquées en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé, [7].

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe au réseau. La figure (I.3) représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage, [7]. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie, [7].

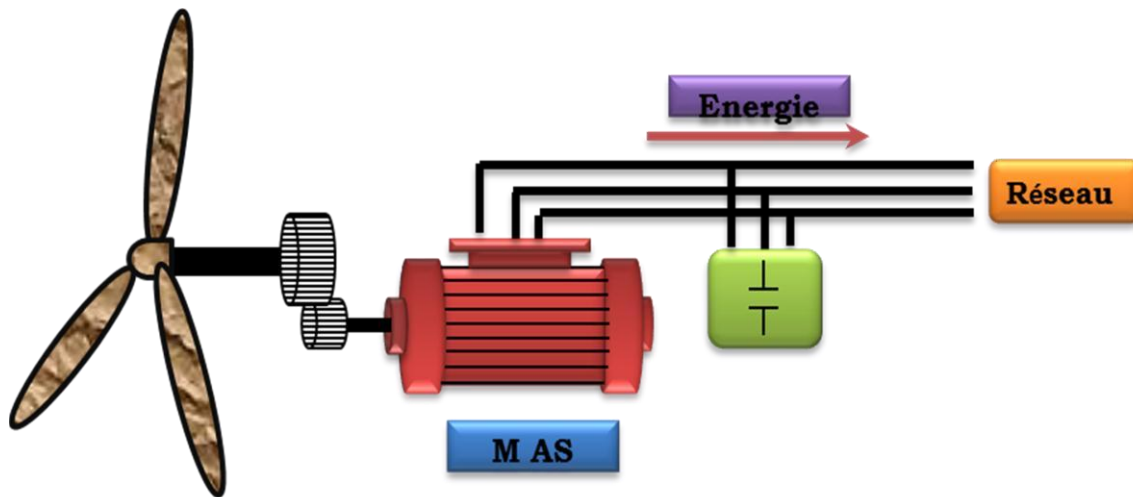


Figure I.3: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- elle ne permet pas une vitesse variable ;
- le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du Couple ;
- elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

I.3.1.2 Générateur asynchrone à double stator

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (figure I.4) :

Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents, [7].

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent, car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [3], [7].

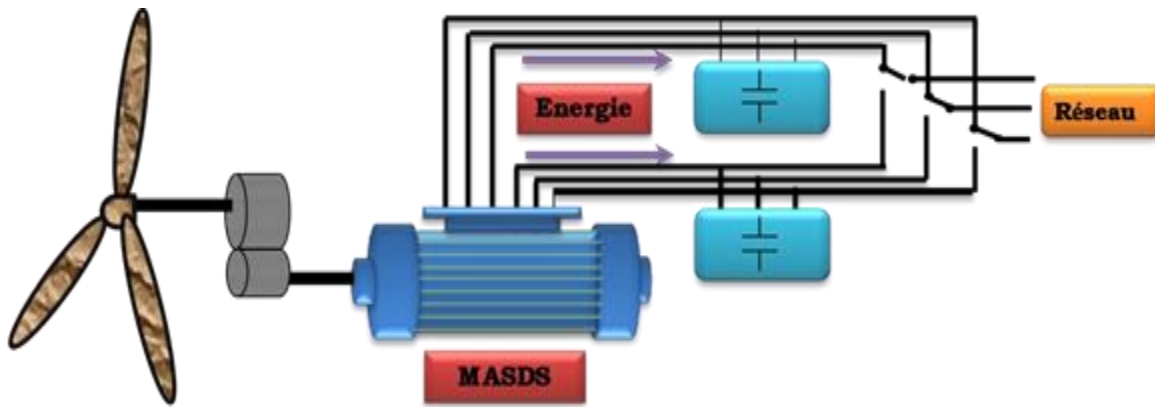


Figure I.4 : Générateur asynchrone à double stator

I.3.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Cette configuration est présentée dans la figure suivante (Figure I.5). Elle est composée d'une machine asynchrone à cage avec un seul stator, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator, [8].

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

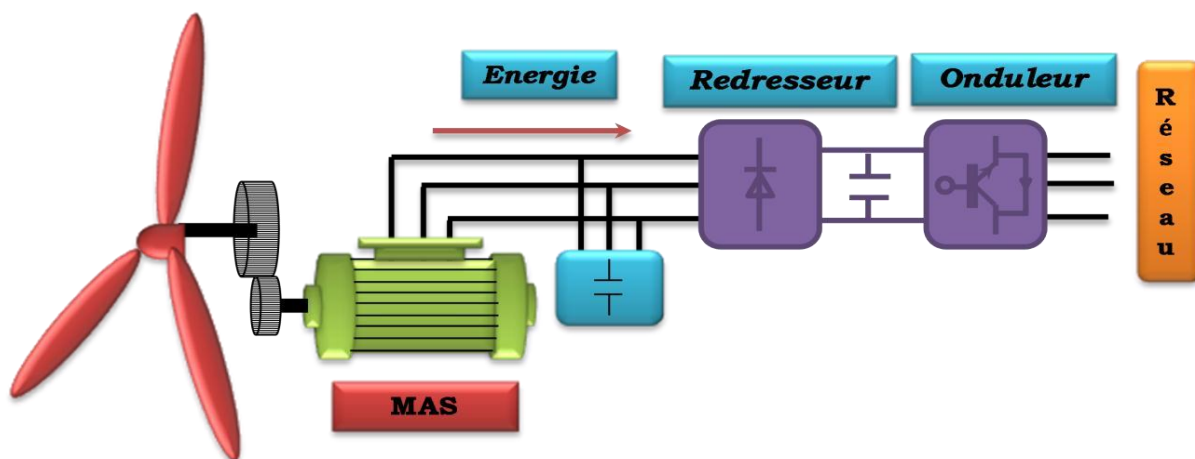


Figure I.5 : Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Figure I.6) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent.

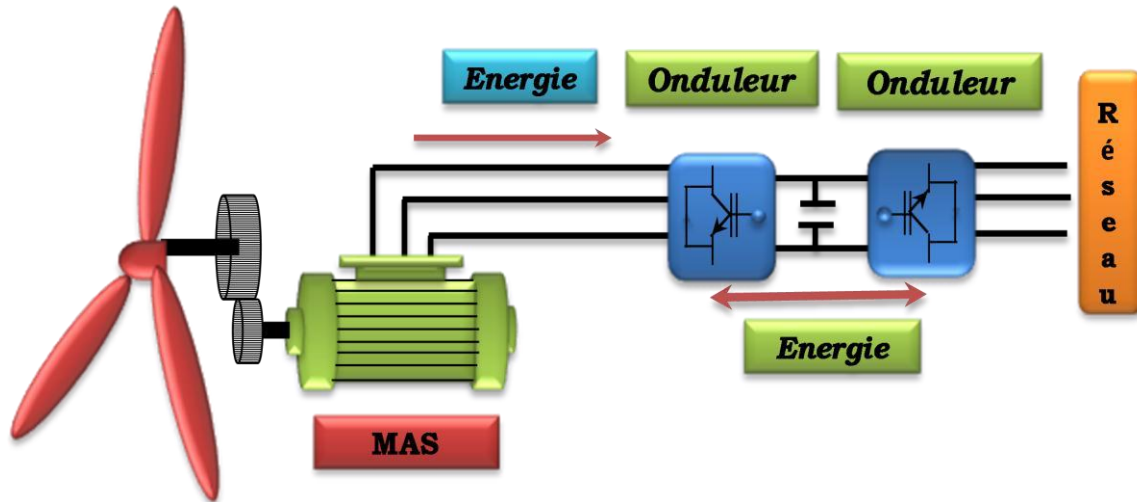


Figure I.6 : Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs.

Cette structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (figure I.6).

Néanmoins, ces deux solutions présentent plusieurs inconvénients : l'augmentation considérable du coût et la complexité de mise en œuvre [5].

Ces deux configurations ne sont pas appliquées en pratique, pour les inconvénients cités ci-dessus. En plus, la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs.

I.3.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Figure I.7), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [10].

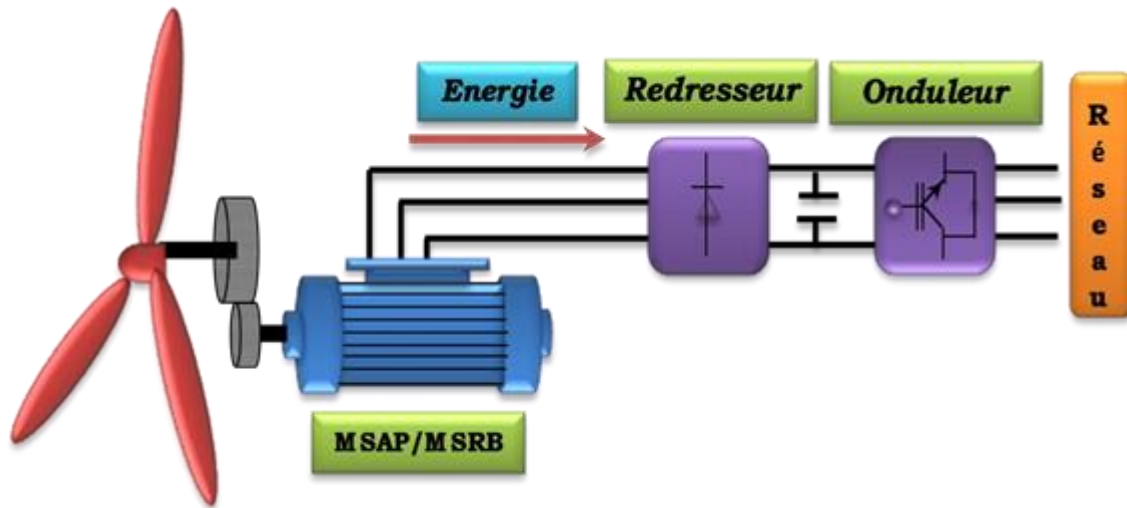


Figure I.7: système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

I.3.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le MSRB tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système. [8].

I.3.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif, [6].

I.3.3 Evolution des systèmes de (G V V) vers la double alimentation.

Le système de GVV éolien idéal doit être composé d'un minimum d'éléments capables d'optimiser le transfert de l'énergie présente dans le vent. La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants

commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage), cette topologie est le meilleur choix des fabricants.[3].

I.3.3.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment, car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne, [6]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.8).

La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominale du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [4]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor, [7].

Si, par exemple, on a prévu une plage de variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, il faudra choisir un convertisseur d'une puissance quatre fois inférieure à la puissance nominale de génération (la plage de vitesses utiles de la MADA se situe dans une plage de 25% à 50% de la vitesse nominale).

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines, [11].

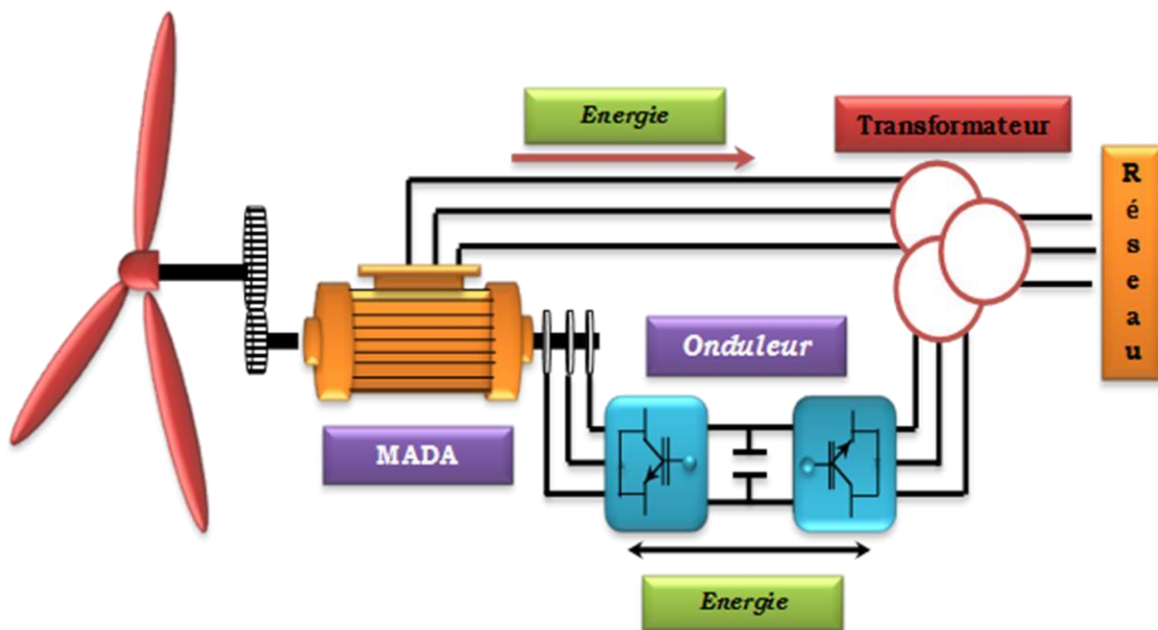


Figure I.8 : schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée par le rotor

Le résumé des points forts de la MADA sont, [6]. :

- ✚ Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- ✚ Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- ✚ Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- ✚ La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.
- ✚ Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

Pour remédier le problème de la présence de bague-balais, les chercheurs :

Proposent une autre structure qui s'appelle machine asynchrone à double alimentation sans balais (brushless). On envisage même l'utilisation de deux machines sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre à l'alimentation des enroulements rotoriques, [8].

I.3.3.2 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la MAC et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée [1]. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (figure I.9). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/BC est proportionnelle au glissement du rotor (BP). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique, [5].

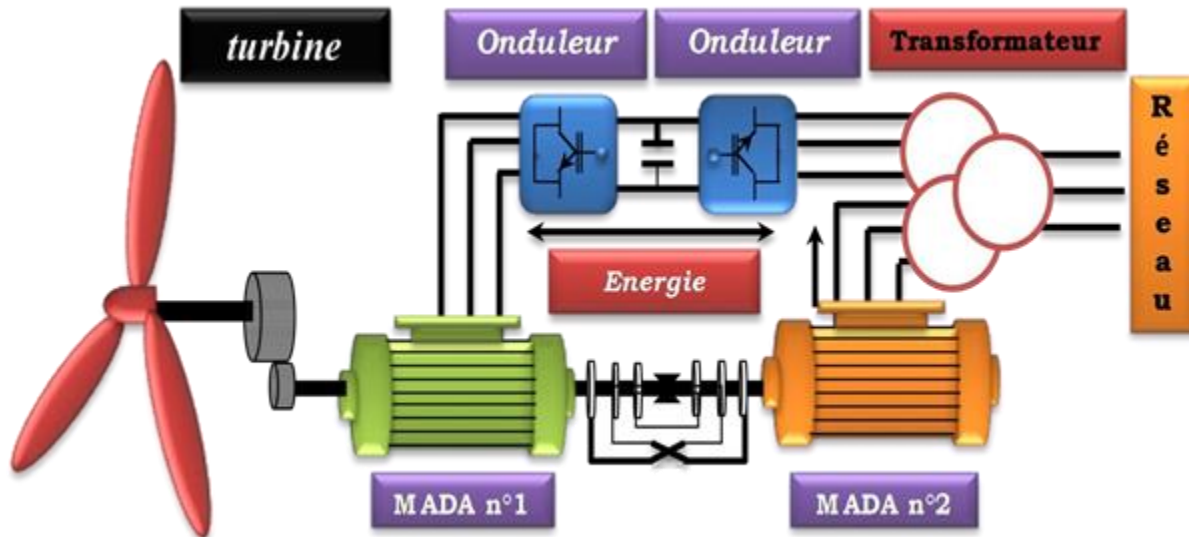


Figure I.9: Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade.

- Les deux stators peuvent être inclus dans la même carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage (Figure I.9). Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [4].

I.3.3.3 Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB)

La cascade est une association de deux MADA que nous considérons comme distinctes (i.e. indépendantes). Afin d'optimiser et d'éviter l'encombrement de celui-ci. On place les enroulements des deux MADA dans des encoches communes : on parle alors de SF-CDFIG (Single Frame-Cascaded Doubly Fed Induction Generator). Dans une telle machine, des couplages magnétiques entre machines sont inévitables et il y a des précautions à prendre dans la conception pour les rendre nuls, en théorie, ou tout du moins aussi faibles que possible en pratique. Le point essentiel porte sur les nombres de paires de pôles des deux MADA. Afin d'obtenir deux MADA découplés magnétiquement, il faut que le flux créé par le stator de l'une ait une résultante nulle sur le stator de l'autre. Il est aisé de découpler deux bobinages en les plaçant en quadrature. Or, ici nous devons découpler des enroulements triphasés entre eux et il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir un découplage par un simple décalage angulaire. On proposera plutôt un découplage par un choix judicieux des nombres de paires de pôles des deux MADA, comme cela est illustré par le schéma de la figure (I.12). On notera que les enroulements rotoriques peuvent être construits sous la forme d'une cage (figure I.11) d'après. Et la construction du rotor fait d'une façon à respecter le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages stator. [11].

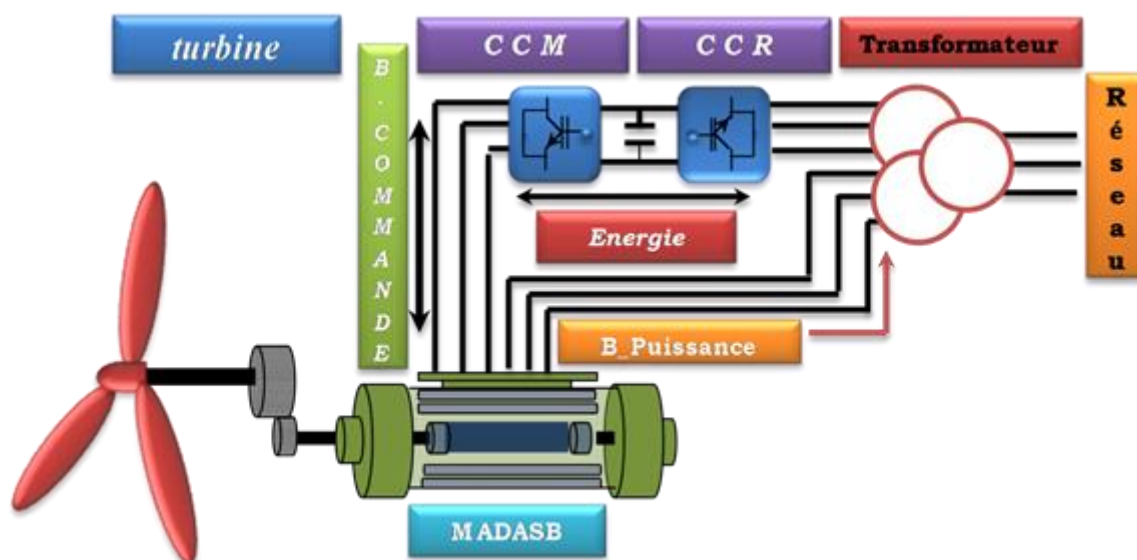


Figure I.10: machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage ou réluctant

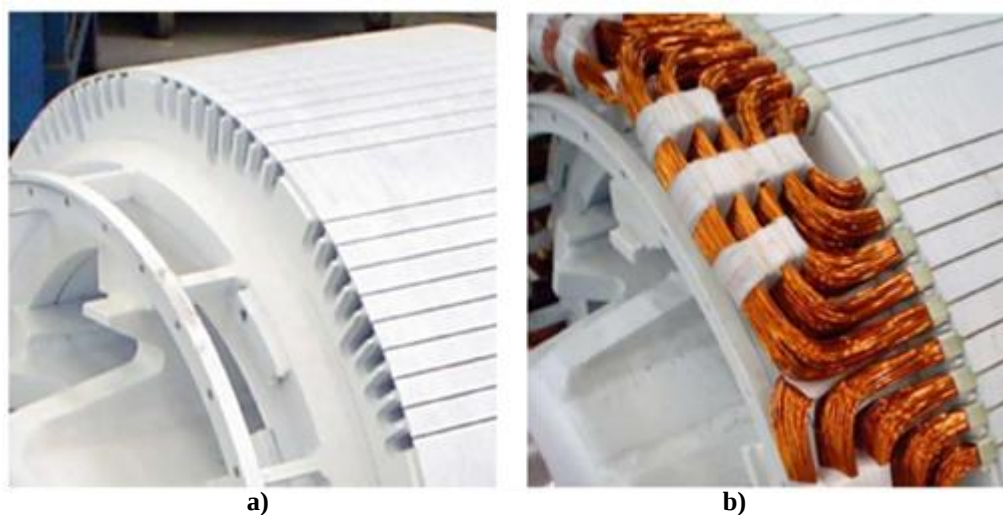


Figure I.11: Rotor de la MADASB

(a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné [8].

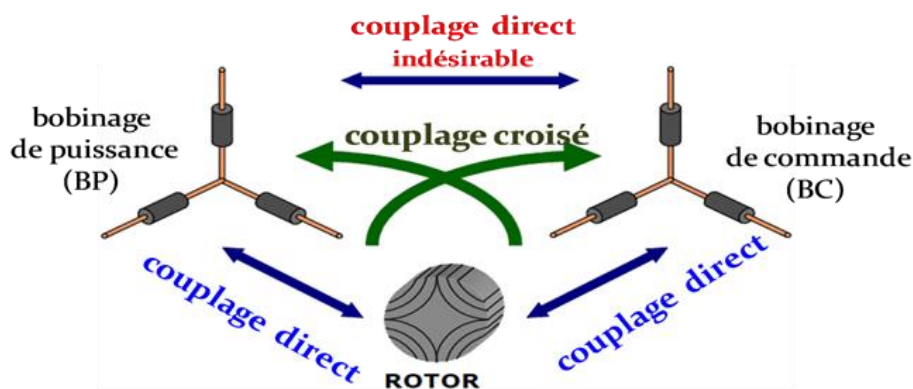


Figure I.12: Schéma de couplage croisé entre les deux stators

Les avantages potentiels de cette structure sont, [22] :

- ✚ Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA).
- ✚ Machine robuste avec une capacité de surcharge grande et une facilité d'installation dans des environnements hostiles (avantage équivalent à celui de la MAC).
- ✚ Coûts d'installation et de maintenance réduits par rapport à la topologie MADA.
- ✚ Élimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

I.3.3.4 Comparaison des topologies et choix de la MADASB

La MADASB fut proposée par René Spée (et autres) de l'Oregon State University (USA). À partir des premiers résultats de leur recherche, ils ont réalisé un brevet sur la conception de la machine et du modèle en régime permanent. Pendant la décade des années 90 ils ont publié des études diverses comprenant la conception, la modélisation [1] et la commande de la machine, [3].

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques principales de chaque structure de conversion:

	^{ère} 1 ^{ère} génération Machine Asynchrone à Cage MAC	^{ème} 2 ^{ème} génération Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA	^{ème} 3 ^{ème} génération Machine Asynchrone à Double Alimentation Sans Balais MADASB
<i>Limitation de la plage de vitesse</i>	Non	Oui	Oui
<i>Puissance du convertisseur</i>	100% de la P_e	25% de la P_e	25% de la P_e
<i>Distorsion harmonique</i>	Haute	Basse	Basse
<i>Cout de maintenance</i>	Bas	Moyen/Haut	Bas
<i>Cout de l'ensemble machine-convertisseur</i>	Moyen/Haut	Moyen	Moyen/Bas
<i>Robustesse, fiabilité</i>	Haute	Moyenne	Haute

Tableau.I.1: Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE, [23].

- ✚ Le choix de la (MADASB) a été retenu comme sujet principal de ce mémoire.

I.4. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes.

Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite la Conversion électromécanique dans les systèmes éoliens, trois grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones et machines à structure spéciale.

Le dispositif du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais regroupant les avantages de la MAC et de la MARB présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Cette dernière machine est appelée à constituer la 3ème génération d'éoliennes.

CHAPITR II

*Modélisation et
Généralité sur l'énergie
éolienne*

II.1. Introduction

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

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique [21].

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

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

II.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

II.2.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure II-1).

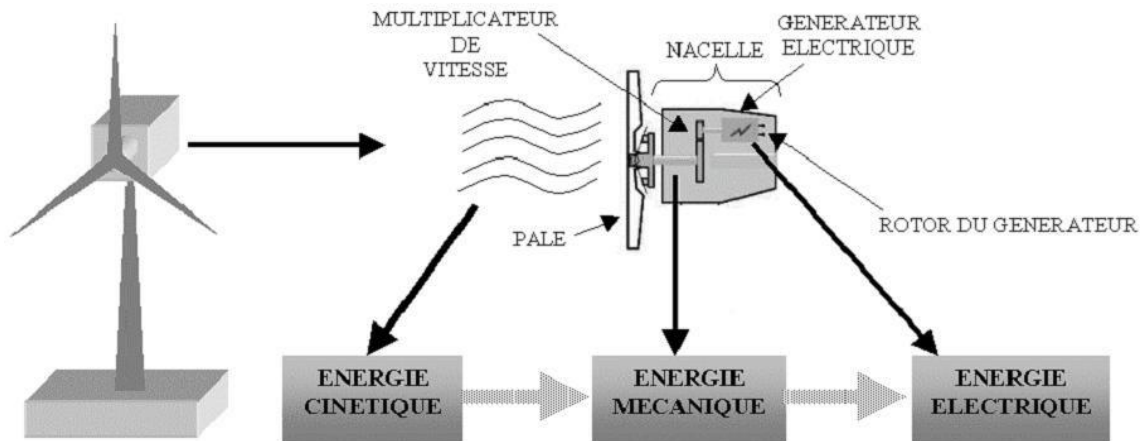


Figure. II-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [30].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [22].

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [30].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- 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.

II.2.2. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- ✓ **Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).
- ✓ **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure II-2) : arbres lent et rapide, roulements,

multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

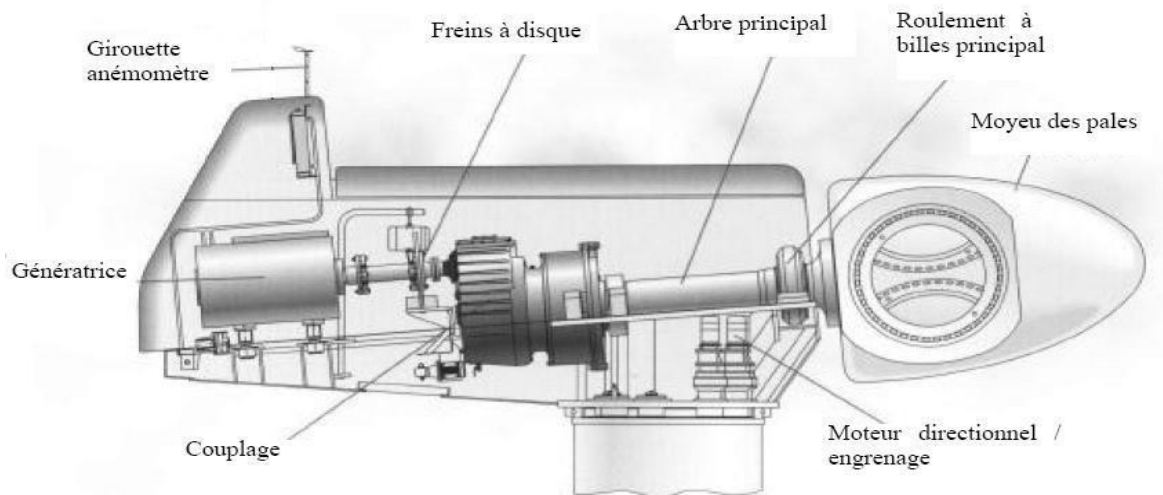


Figure. II-2 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

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

II.3. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical

II.3.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe

horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [9] :

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure II-3).

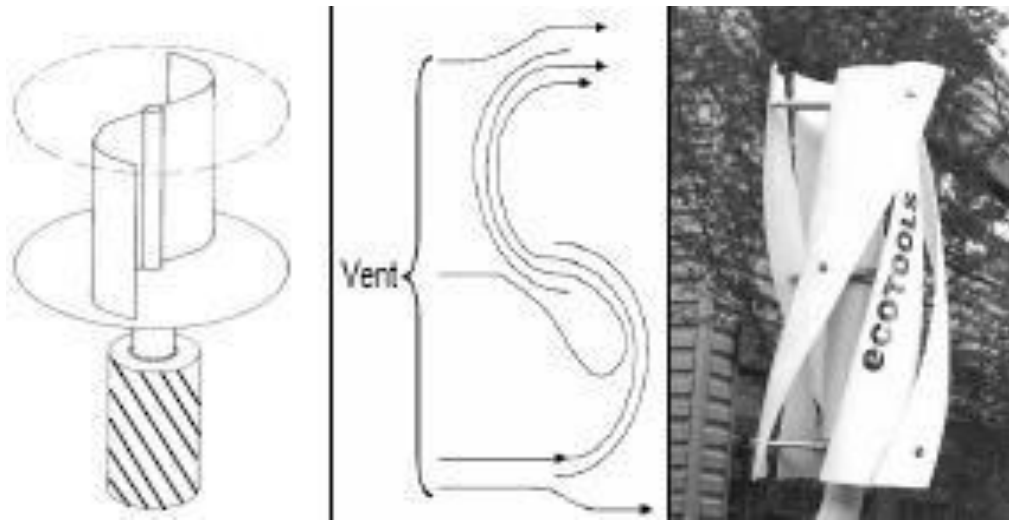


Figure. II-3 : Éolienne de Savonius.

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure II-4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

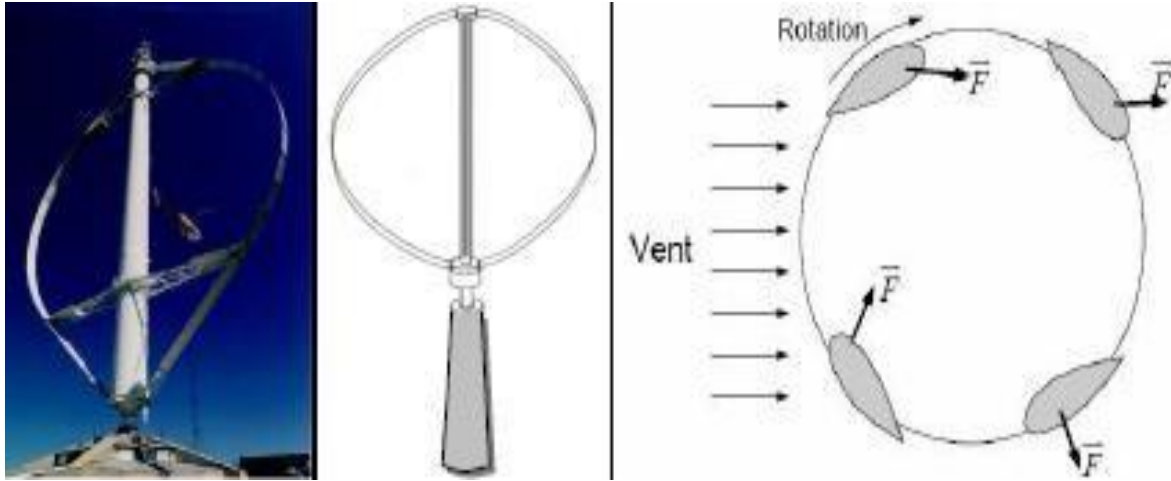


Figure. II-4 : Éolienne de Darrieus.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100 W à 25 kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes. Par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne. Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

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

II.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [25]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études

multi-critères [23]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure. II-5 : Éoliennes à axes horizontales.

II.4. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

- **Loi de BETZ**

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.1})$$

La puissance $P_{aér}$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.1):

$$P_{aér} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.3})$$

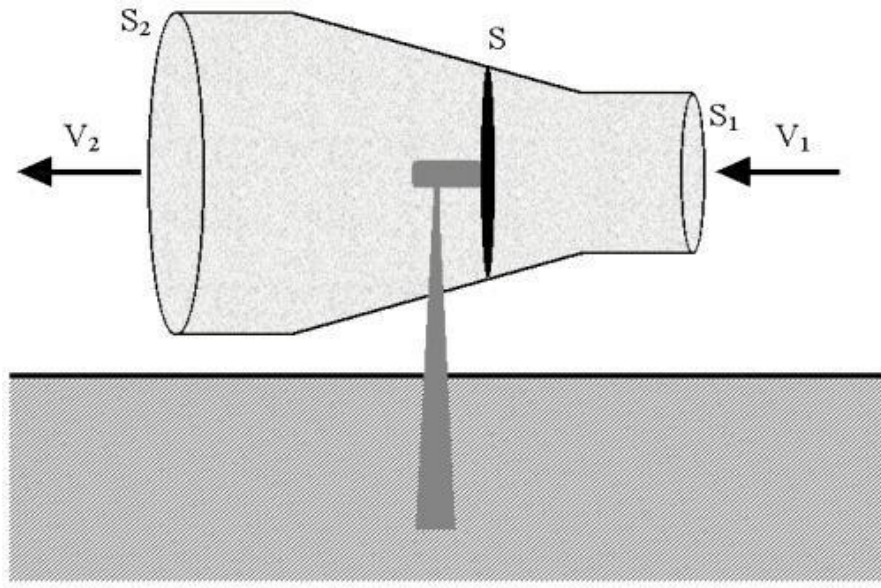


Figure. II-6 : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (\text{II.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. II.7), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent[19] .

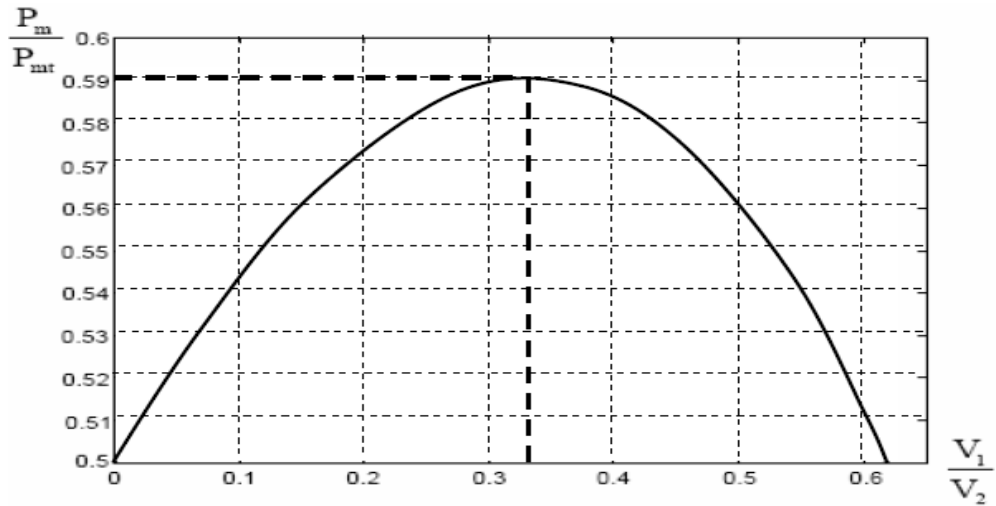


Figure. II-7 : Coefficient de puissance.

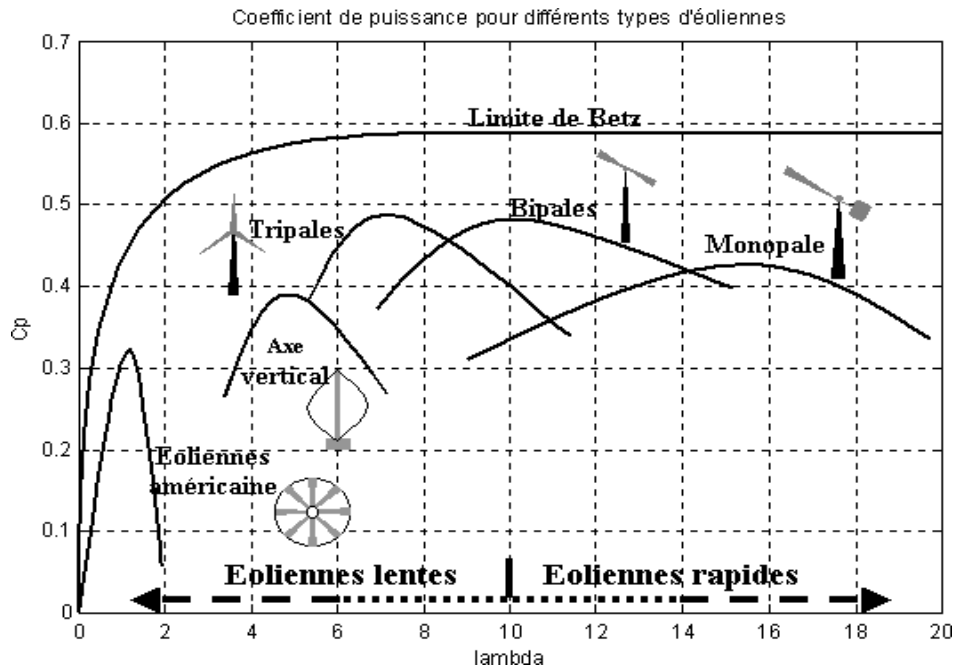


Figure. II-8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure II-8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II-8) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [22].

II.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

II.5.1. Bilan des forces sur une pale

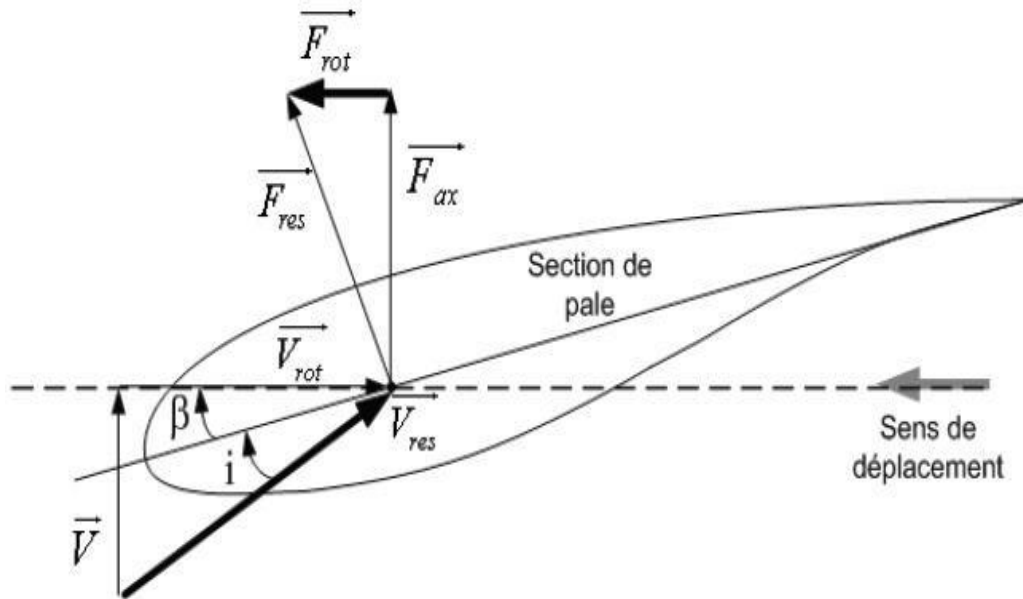


Figure. II-9 : Bilan des forces sur une pale

La Figure (II-9) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [18]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur V_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur

nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

II.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

II.5.2. 1. Système à décrochage aérodynamique "stall"

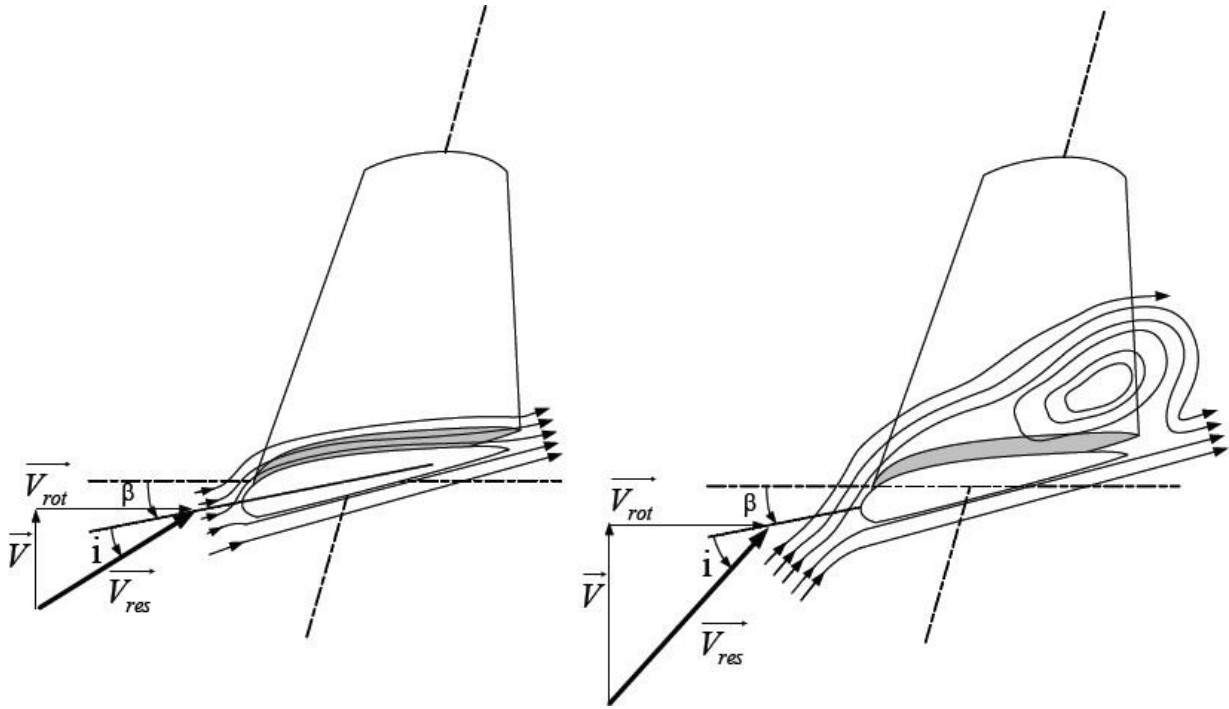


Figure. II-10 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure II-11) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [27].

II.5.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"

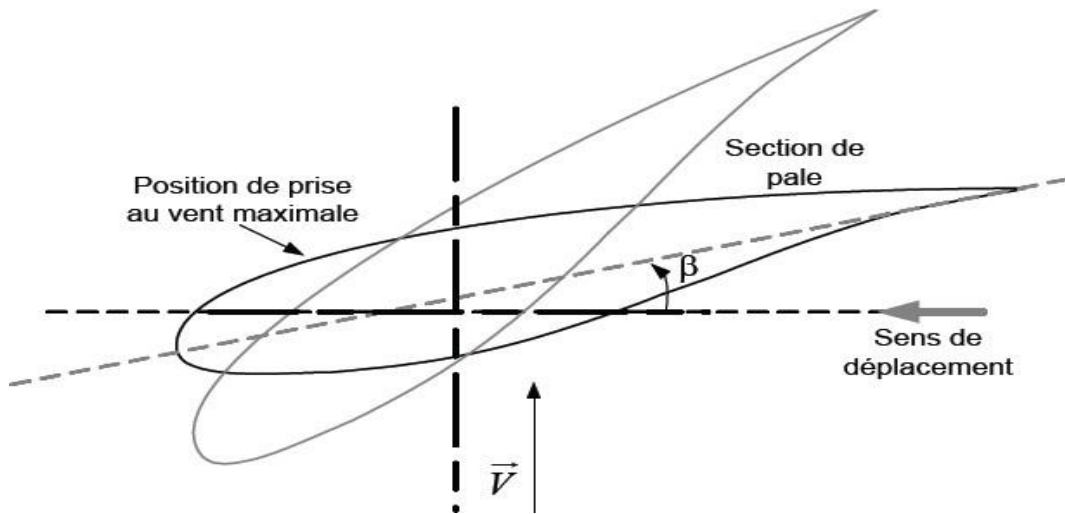


Figure. II-11 : Variation de l'angle de calage d'une pale.

Ce système de régulation utilise l'angle des pales face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

II.6. 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 avons utilisé le développement théorique des systèmes éoliens connu par la théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec un coefficient théorique de 0.59 maximum qui reste inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs.

CHAPITR III

*Machine asynchrone à
double alimentation
(MADA)*

III.1. Introduction:

La plupart des génératrices utilisées dans les systèmes de génération d'énergie éolienne sont des génératrices asynchrones. Elles sont robustes, leur coût est relativement faible. Il existe deux types de machines asynchrones : les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse variable, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine, ainsi que ces modes de fonctionnement en mode génératrice.

III.2 Présentation de MADA :

III.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [1].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure III.1)

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur.

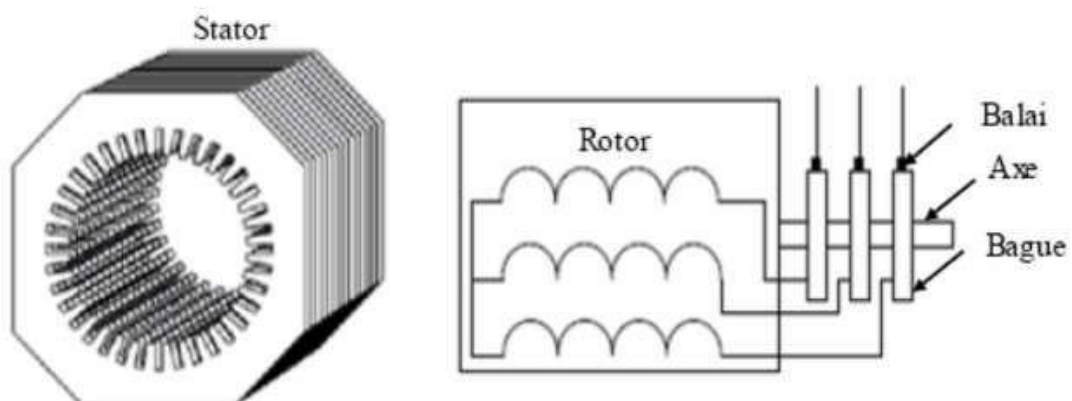


Figure III.1. Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.2.2 Description des composants de la MADA :

Le circuit statorique est directement connecté au réseau. Le circuit rotorique est quant à lui relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un redresseur : C'est le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_g et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau ;
- Un bus continu.
- Un onduleur : C'est le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_r échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM). [2]

III.3. La double alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : Doubly Fed Induction Machine), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [3].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [4].

Dans les moteurs à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statorique sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [4].

III.4. 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.

III.4.1.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 étoile dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. [14]

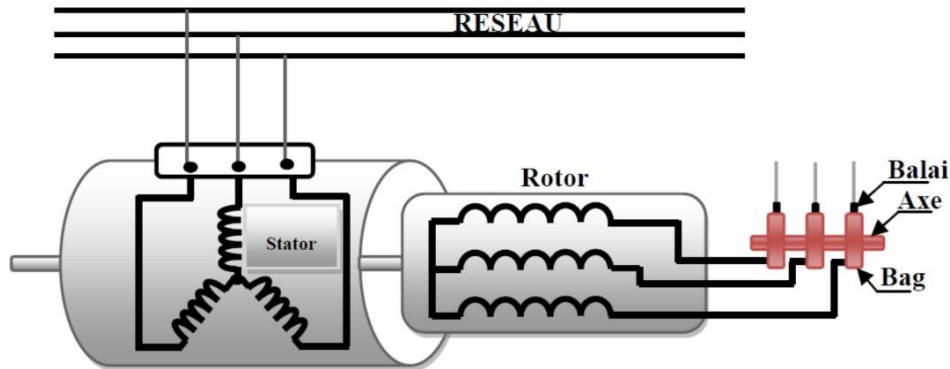


Figure III.2 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

III.4.2.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'écureuil.

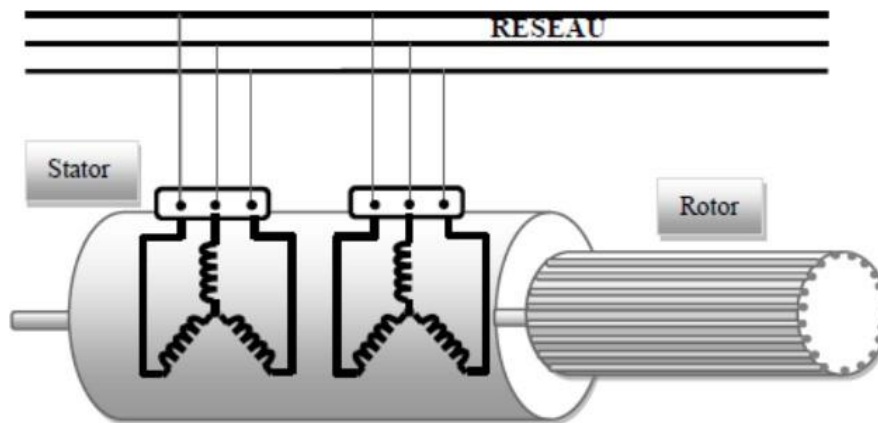


Figure III.3 : Structure de la MADA sans balais

III.4.3.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 coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées [15].

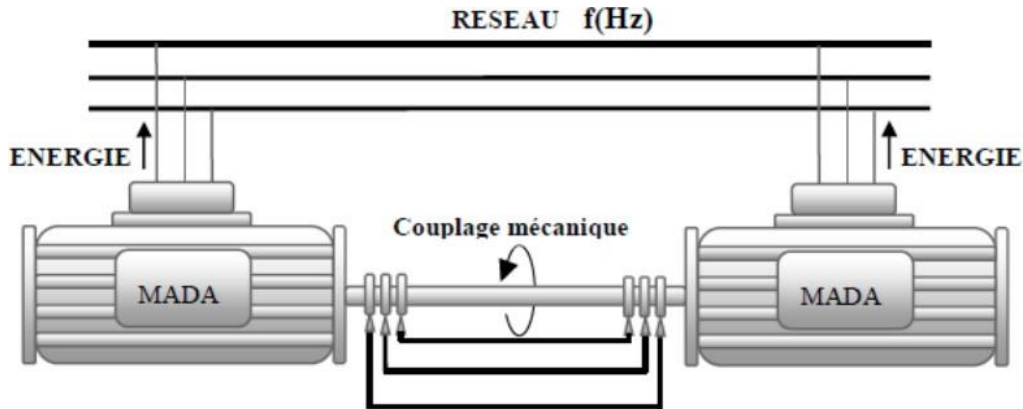


Figure III.4 : Structure en cascade de deux machines asynchrones

III.5.Mode de fonctionnement

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une 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 fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode mo teur qu'en mode générateur [16]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

III.5.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme.
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Fig. III.5).

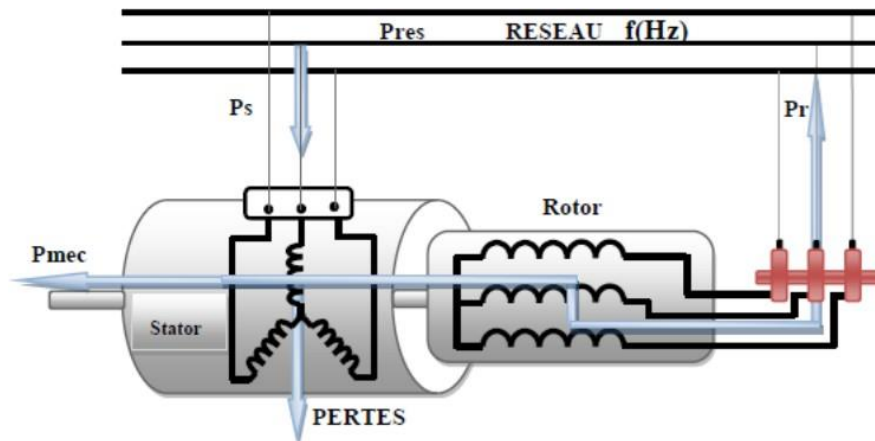


Figure III.5 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

III.5.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator (Fig. III.6).

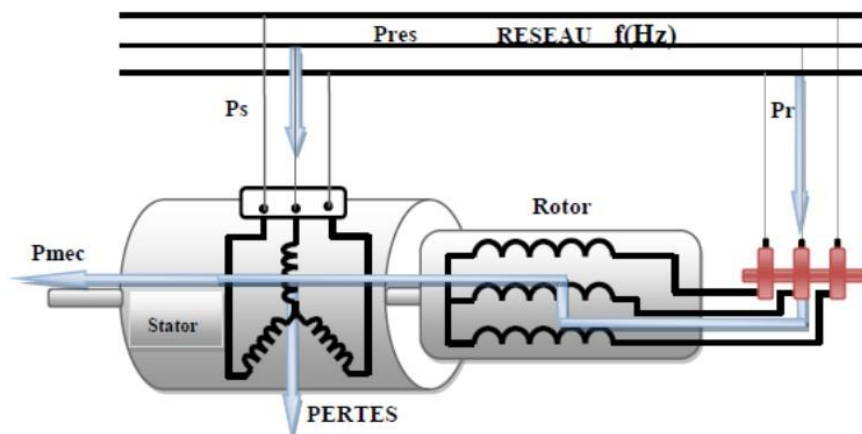


Figure III.6 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

III.5.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique P_{mec} à la machine.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor (Fig. III.7).

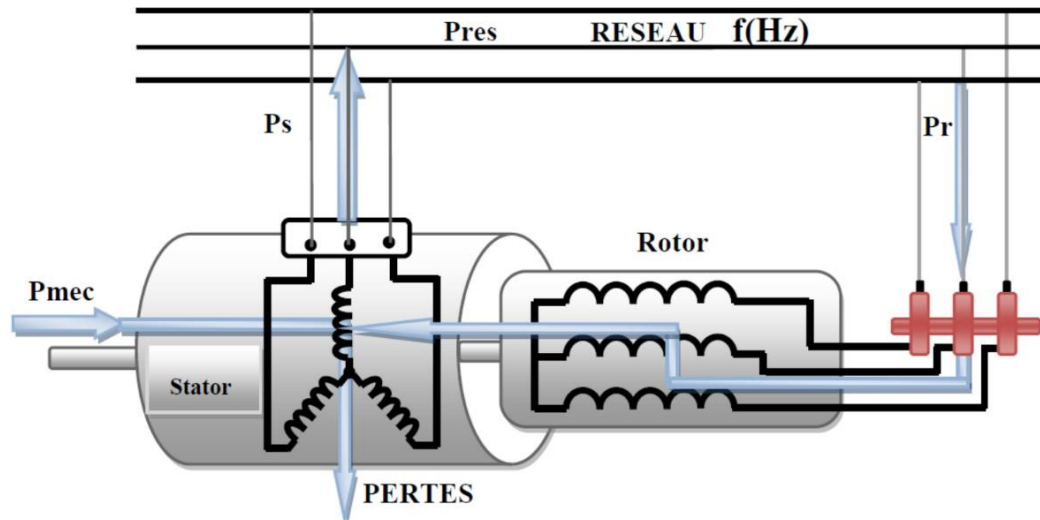


Figure III.7 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

III.5.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice.
- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance correspondant à $g/(1 - g) P_{mece}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor (Fig. III.8).

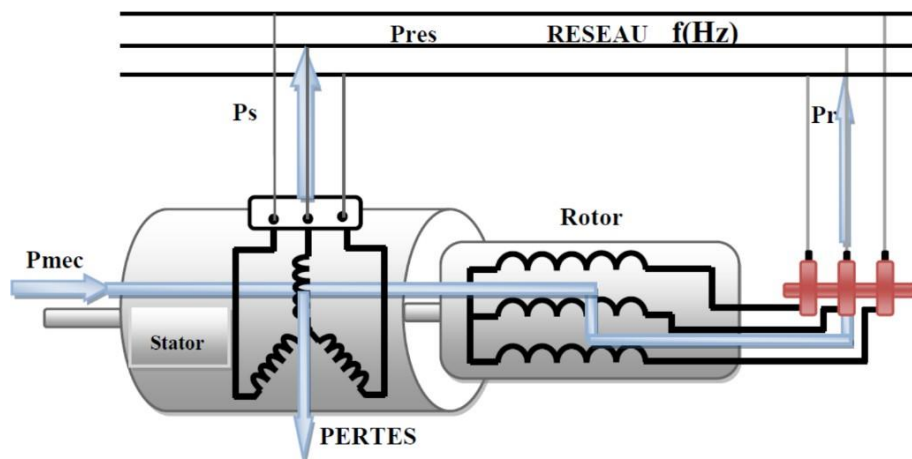


Figure III.8 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

III.6.Les différentes configurations de la MADA à rotor bobiné

Le mode de fonctionnement de la MADA aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur est imposé par la commande des tensions rotoriques. Chaque mode est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisi. Les différentes configurations les plus utilisées dans les aérogénérateurs pour un fonctionnement en mode génératrice sont présentées ci-dessous.

III.6.1. Configuration pour application en génératrice

Le mode générateur est le mode idéal pour l'utilisation d'une MADA, puisqu'elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant entre $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques permet de contrôler les puissances actives et réactives produites, et de faciliter ainsi sa commande. [15]

Généralement, le stator de la MADA est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté de différentes façons que nous allons montrer dans ce qui suit.

III.6.1.1. MADA à énergie rotorique dissipée

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

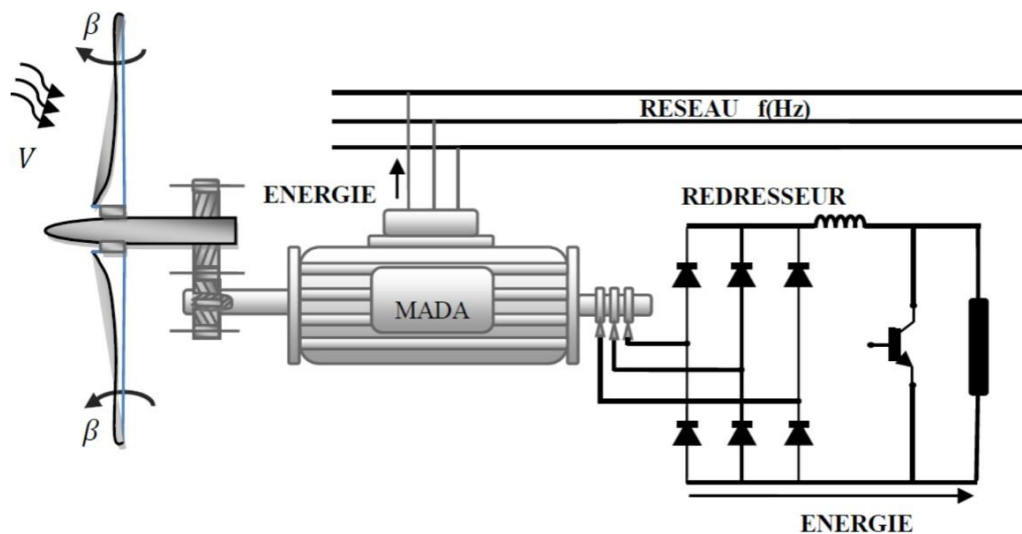


Figure III.9 : MADA à énergie rotorique dissipée.

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. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. [17]

III.6.1.2. Structure de KRAMER

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (Fig. III.10) [5]

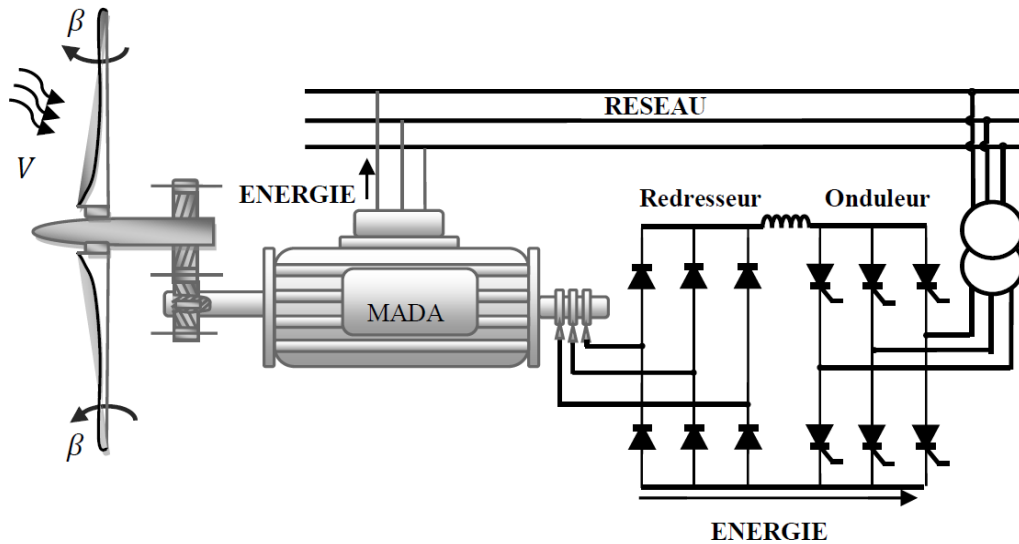


Figure III.10 : MADA à structure de KRAMER

L'ensemble « redresseur-onduleur » est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine sans balais, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%.

L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de SCHERBIUS avec convertisseurs à IGBT. [18]

III.6.1.3. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure III.11), l'ensemble est alors appelé structure de SCHERBIUS. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [12]. 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 en MLI.

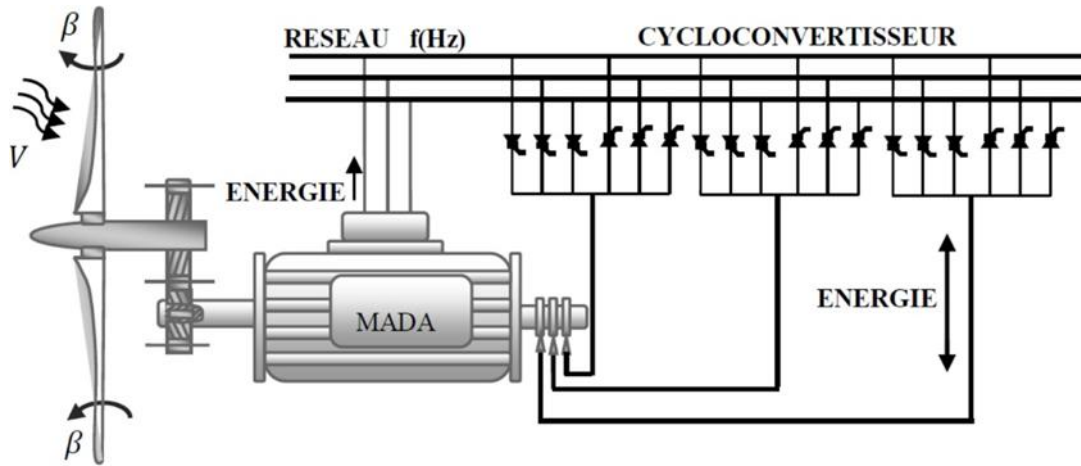


Figure III.11 : Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.

III.6.1.4. 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 [13].

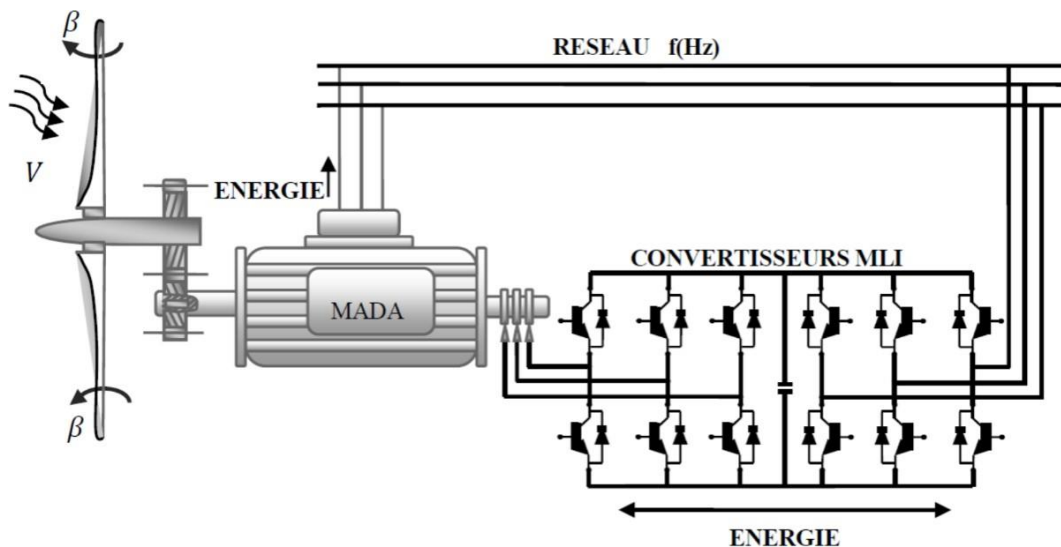


Figure III.12 : Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.

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 dimensionnés pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1%

de cette puissance [15]. 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.

III.7. Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [19].

III.7.1. Avantages de la MADA :

- 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 ;

III.7.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais [19].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [19].

III.8. 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.

III.8.1 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 [6] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

III.8.2 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 [7] ;
- 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.

III.9. Modélisation de la MADA :

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

III.9.1 Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.

- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [20]

La figure (III.13) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique, où l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase.

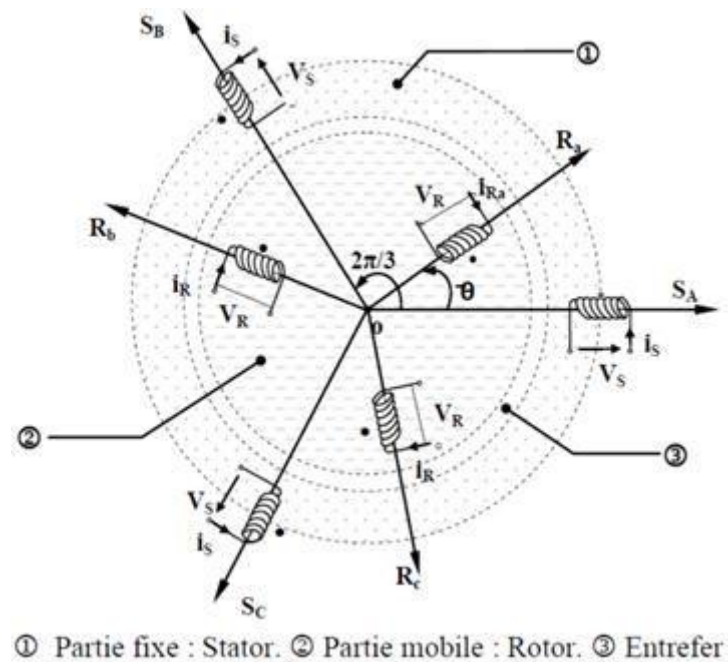


Figure III.13 : Représentation simplifiée de la MADA.

III.9.2. Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c)

La machine asynchrone à double alimentation MADA comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaires à celles du stator.

Les équations générales de machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé en mode hypo synchrone s'écrivent sous forme matricielle.

III.9.2.1. Equations électriques

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

Avec:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MADA sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

III.9.2.2. Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

III.10. Application de la transformation de Park à la GADA

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$

- **Tensions:**

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Courants :**

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Flux:**

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

III.10.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)

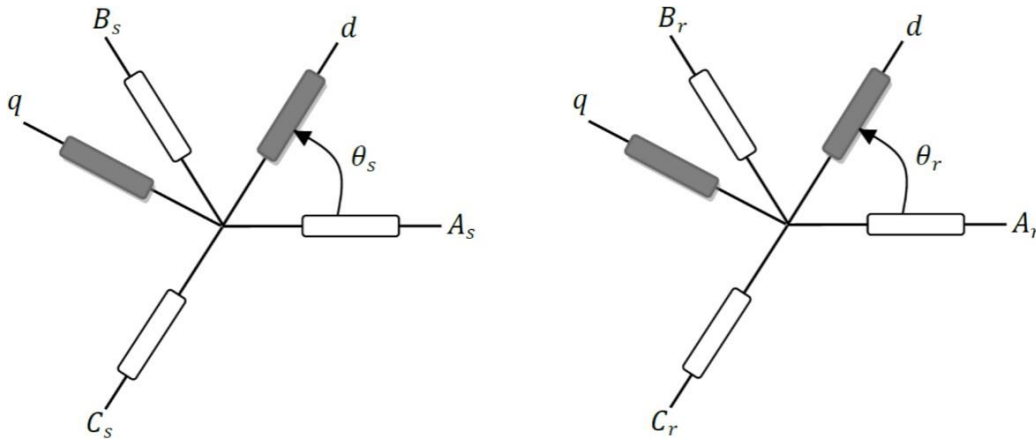


Figure III.14 : Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques.

III.10.1.1. Equations électriques

En multipliant les systèmes des équations (III.3) par la matrice de Park, on obtient :

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

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad J: \text{appelée matrice de rotation.}$$

III.10.1.2. Equations magnétiques

En multipliant les systèmes des équations (III.4) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

III.10.1.3. Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (III.3) et (III. 5) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

Ce système d'équation (III. 6) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \\ &+ \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

$$\Rightarrow [V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (\text{III. 8})$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][I] \quad (\text{III. 9})$$

Dont :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

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

III.10.1.4. Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (III.10)$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (III.11)$$

III.10.1.5. Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (III.12)$$

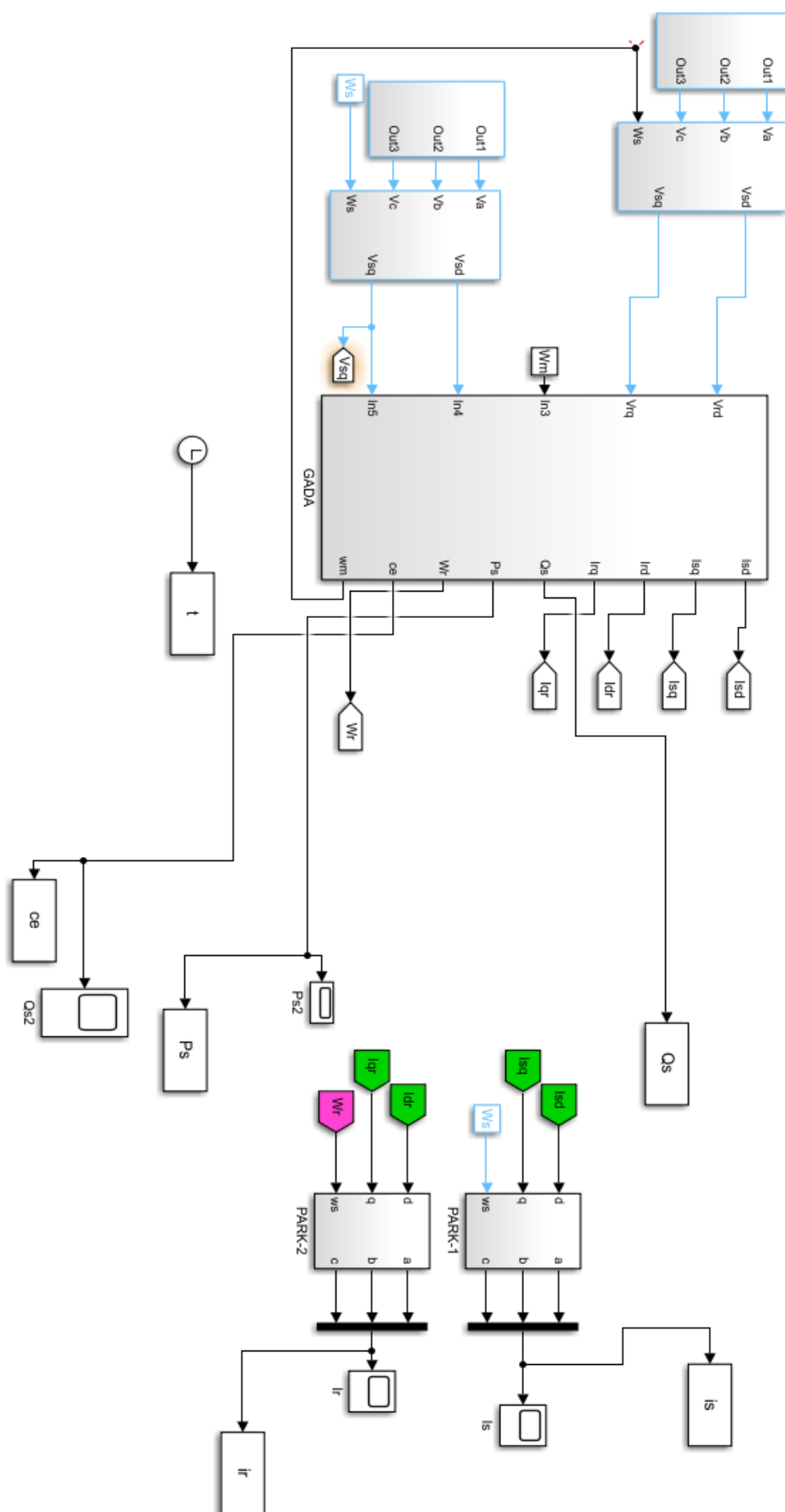


Figure III.15 .schéma bloc de GADA

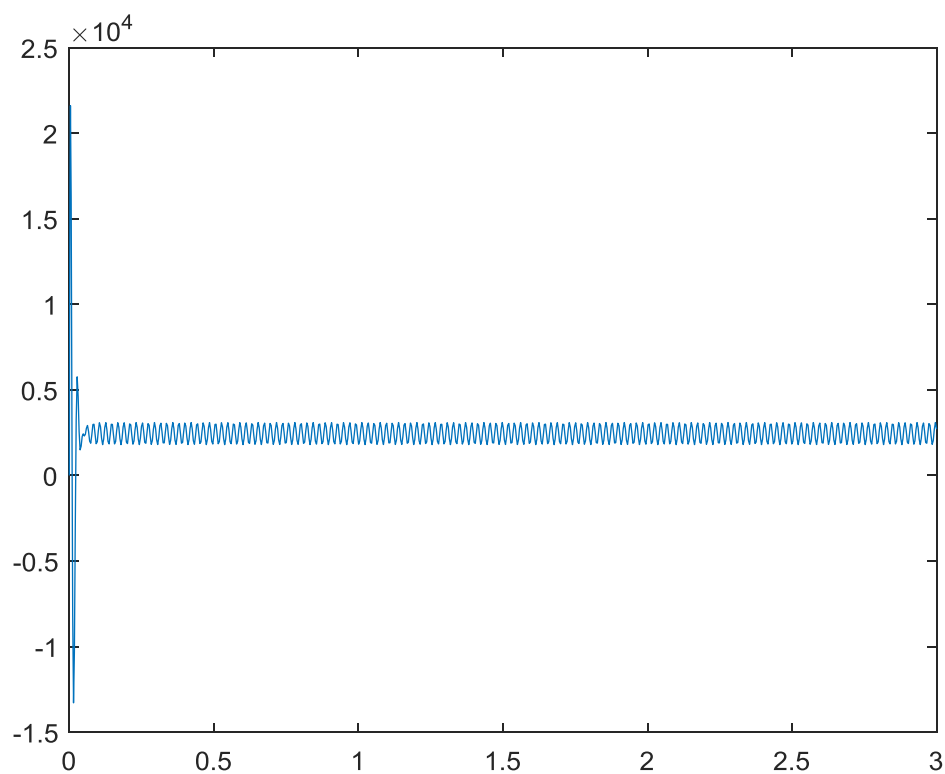


Figure III.16 Courbe de la puissance active statorique avec zoom.

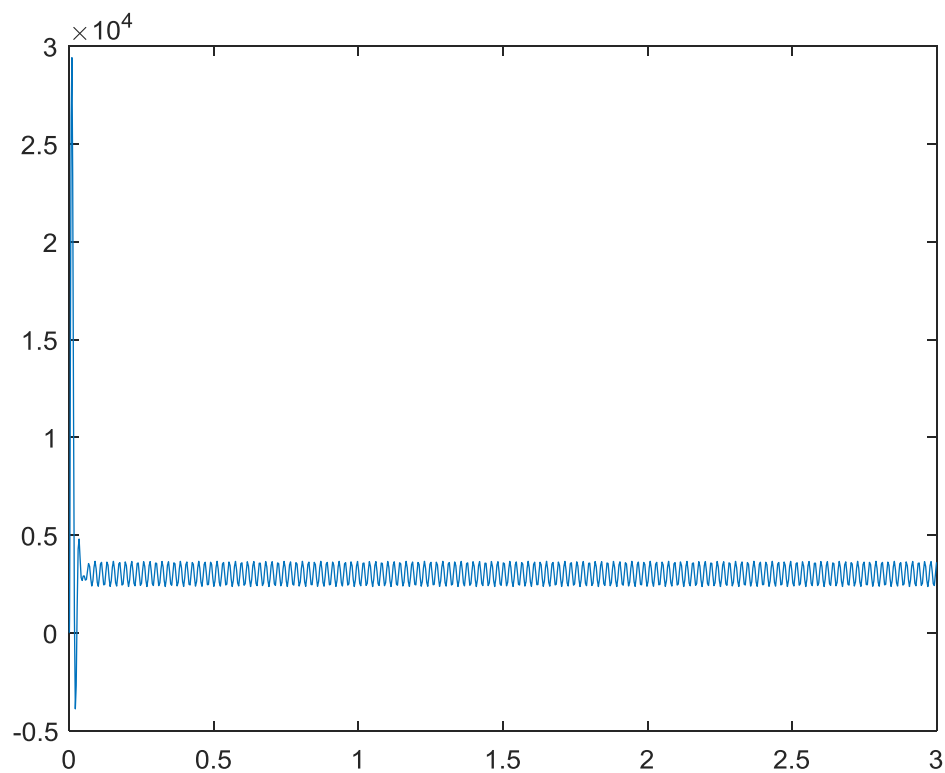


Figure III.17 Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom.

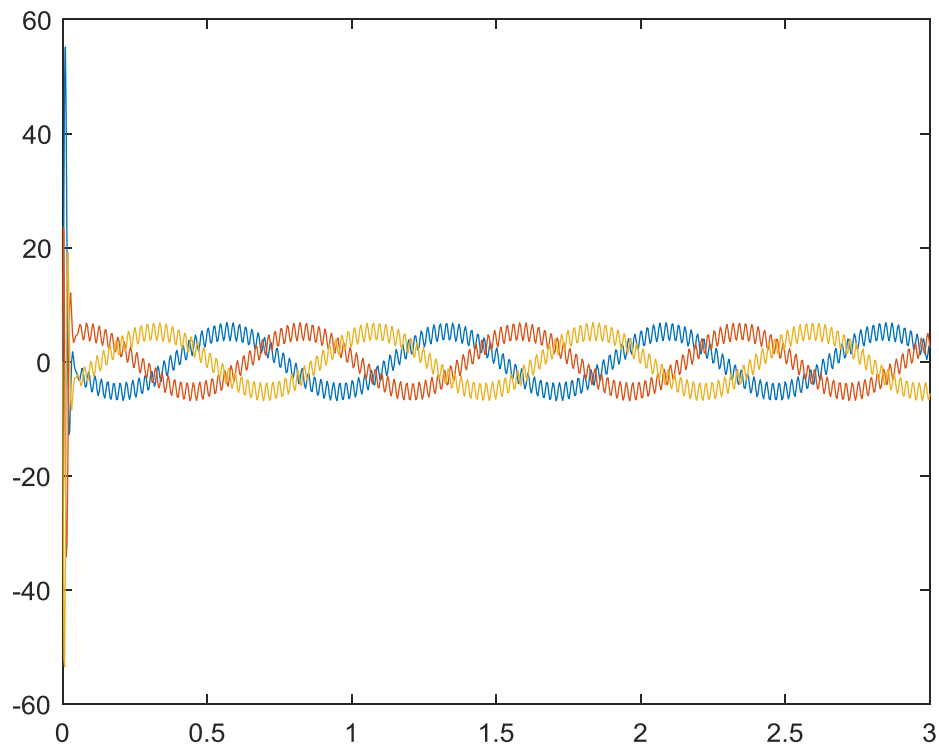


Figure III.18 Courbe du courant rotorique avec zoom

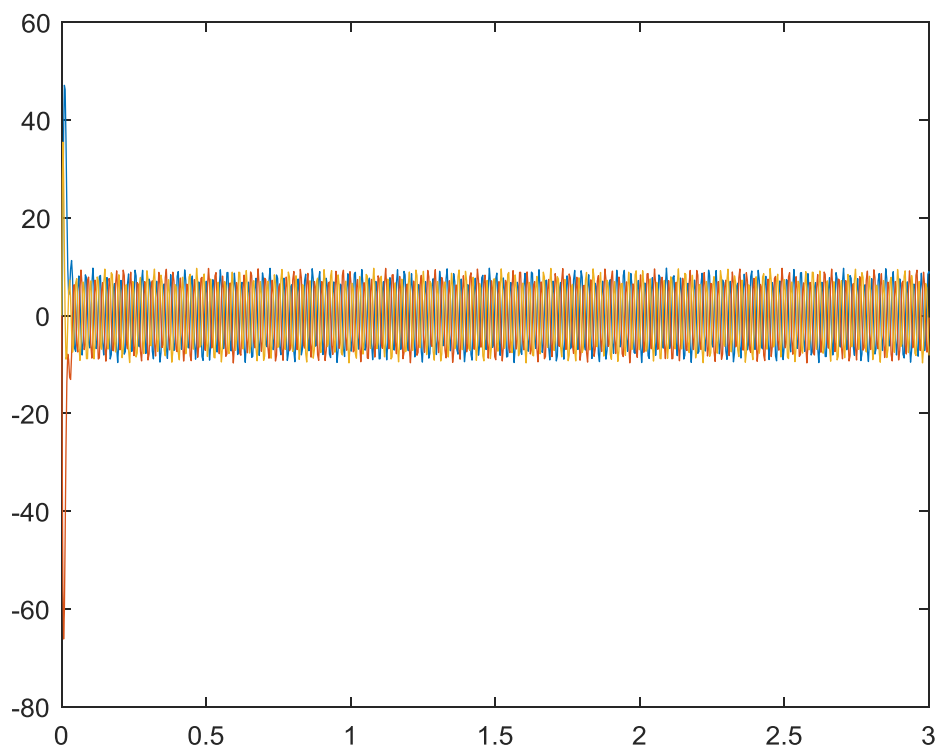


Figure III.19 Courbe du courant statorique avec zoom

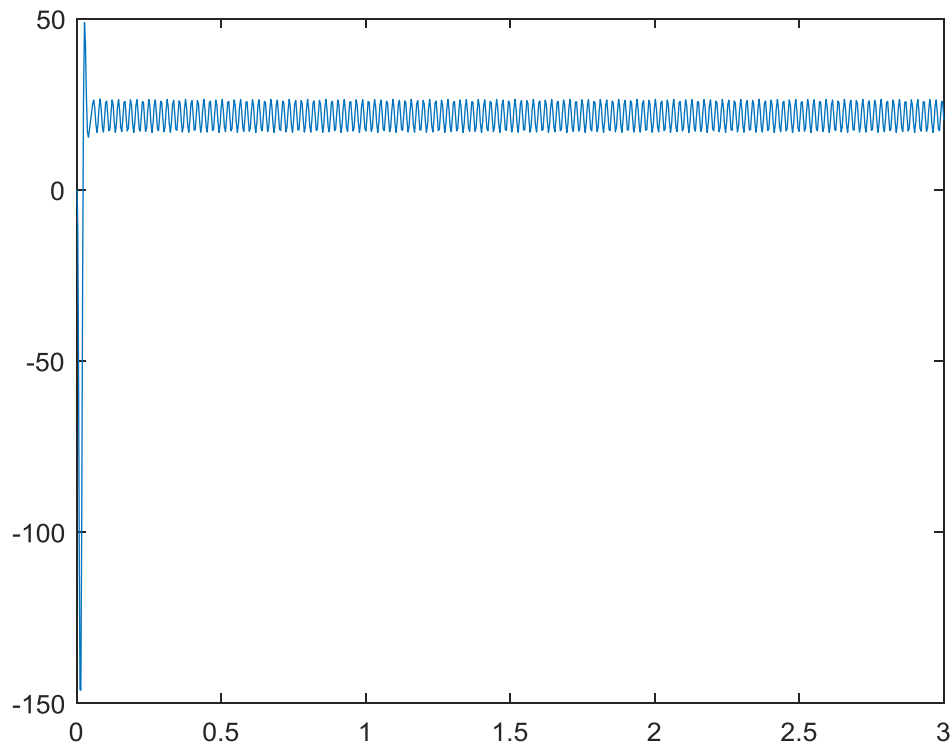


Figure III.20 Courbe de la couple avec zoom

III.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu faire une synthèse sur les différents modes de fonctionnement des machines asynchrone notamment les génératrices à double alimentation. Aussi, nous avons présenté quelque configuration pour la connexion de ce type de machine dans le réseau de distribution électrique.

Dans une seconde partie de ce chapitre nous avons décrit les différentes équations mathématiques qui permettent de modéliser et de simuler ces machines électriques.

CHAPITRE IV

*Modélisation et commande d'un
système éolien par régulateur
PI basé sur une MADA pour
la fourniture de puissances au
réseau électrique*

IV.1. Introduction :

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergies renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter [31]. La génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande vectorielle est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes [33]. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable, comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive [34]. Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système [5-6]. Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance. Les performances et la production de puissance ne dépendent pas uniquement de la MADA, mais aussi de la manière avec laquelle les deux parties du convertisseur «back-to-back » sont contrôlées.

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 [34].

IV.2. Principe de la commande vectorielle de la DFAM :

Le contrôle vectoriel permet de modéliser la machine asynchrone 'MADA' comme une machine à courant continu, à excitation séparée figure. IV.1, où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q) , repère tournant biphasé orienté sur φ_r (flux rotorique) ou sur φ_s (flux statorique) et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux. Le découplage peut être réalisé par orientation du flux statorique ou du flux d'entrefer ou du flux rotorique.

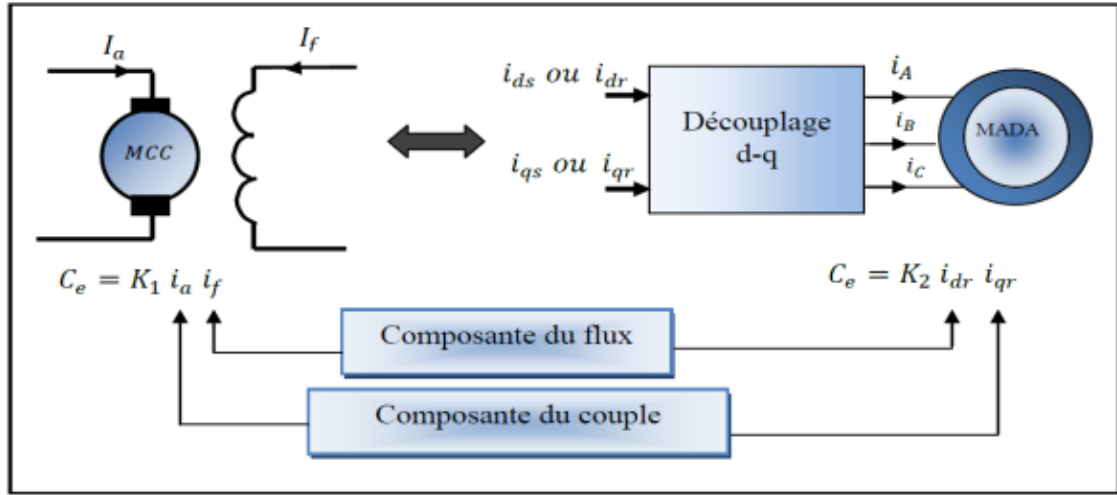


Figure IV.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant.

On a donc:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \& \quad \varphi_{sq} = 0$$

Les équations (II.3) et (II.5) deviennent:

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Si l'on néglige la résistance du stator ' R_s ', les tensions statoriques V_{sd} , V_{sq} sont:

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} = V_s \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (IV.4)$$

L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure. IV.2

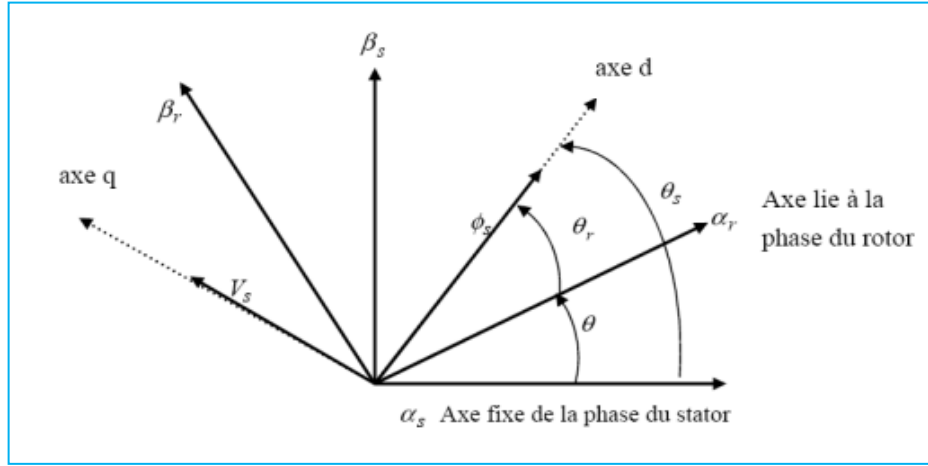


Figure. IV.2 Orientation de la tension et de flux statorique

À partir de système des équations (IV.2), on obtient les expressions suivantes

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

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (IV.6)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.5) et la valeur de φ_s de l'équation (IV.4) dans l'équation (IV.6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive[5].

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.7)$$

L'équation (II.7) de couple devient alors:

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} \varphi_s I_{rq} \quad (IV.8)$$

Il ressort de l'expression (IV.7) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. La puissance active au stator produite par la machine est contrôlée par la

composante I_{rq} . Si la tension et la fréquence sont imposées par le réseau, la puissance réactive peut être contrôlée par la composante I_{rd} et éventuellement contrôlée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire au stator[6].

En remplaçant (IV.2) dans les expressions des tensions rotoriques du système d'équations (IV.1) on a:

$$\text{avec } g\omega_s = (\omega_s - \omega)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(L_r I_{rd} + M I_{sd}) - g\omega_s (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(L_r I_{rq} + M I_{sq}) + g\omega_s (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases}$$

(IV.9)

En remplace les valeurs du courant de l'équation (IV.5) dans (IV.9) pour obtenir la relation suivant :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases}$$

(IV.10)

Après la transformation de la place des équations (IV.10) deviennent:

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.11)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.12)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite[27].

IV .3 Schéma bloc réduit de la MADA

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [21]. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée.

Dans ce paragraphe, nous considérons que la MADA fonctionne en mode hypersynchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

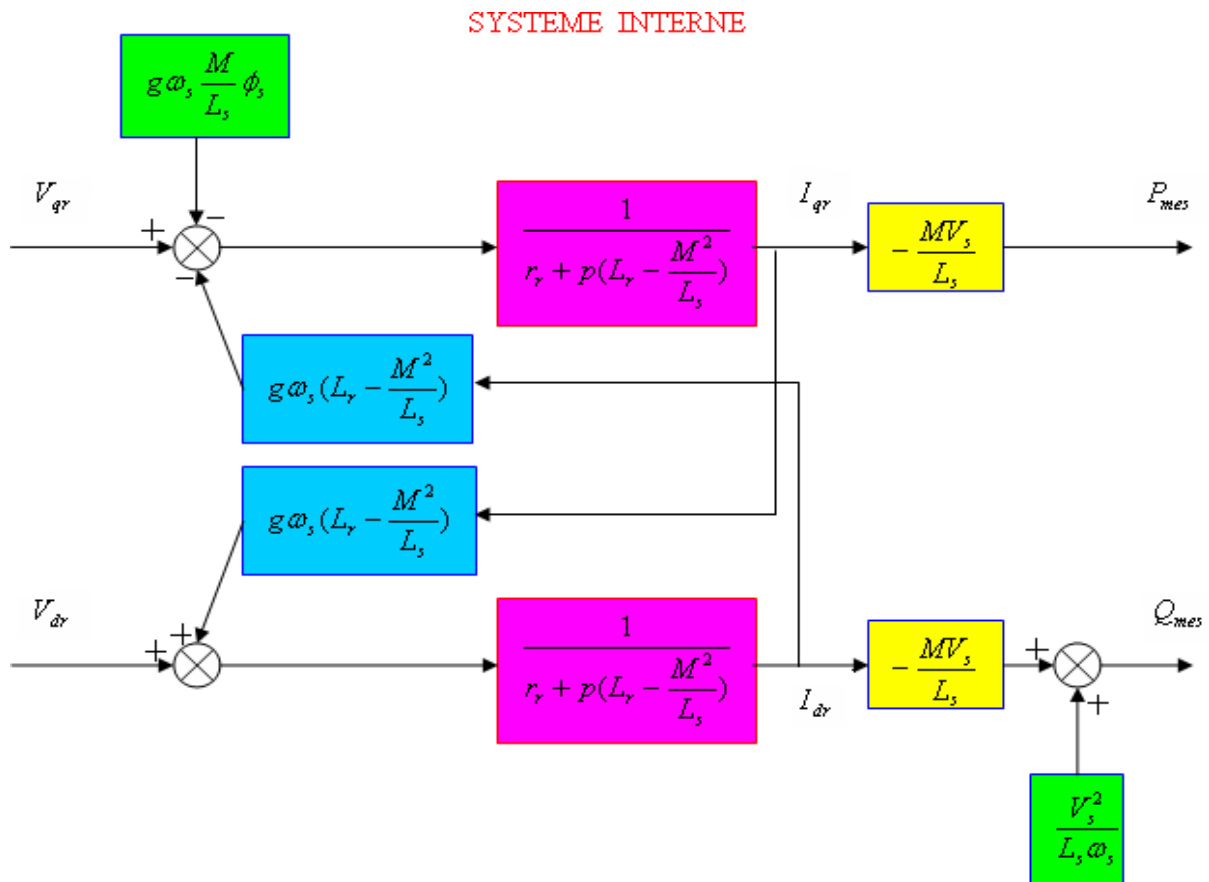


Figure. IV.3 : Schéma bloc du système à réguler.

Dans ce schéma nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

IV.4. Commande vectorielle directe en P et Q de la MADA en génératrice

Bien que la dynamique du système éolien soit faible par rapport à celle de la génératrice, nous pouvons proposer le schéma de principe suivant (figure IV-4). Il nous permet un transfert de puissance maximale via le stator et le rotor vers le réseau, en fonctionnement hypersynchrone.

Dans ce schéma nous avons utilisé des régulateurs Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice. Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donné la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température. Le dispositif de mesure de puissance de référence est constitué d'un transformateur de Park (V , I) et d'un bloc de mesure de puissance (P , Q).

En tenant compte de la présence du transformateur entre l'onduleur et le réseau, les tensions moyennes aux bornes du redresseur et de l'onduleur, ainsi que la puissance moyenne renvoyée au réseau sont données par [26, 29] :

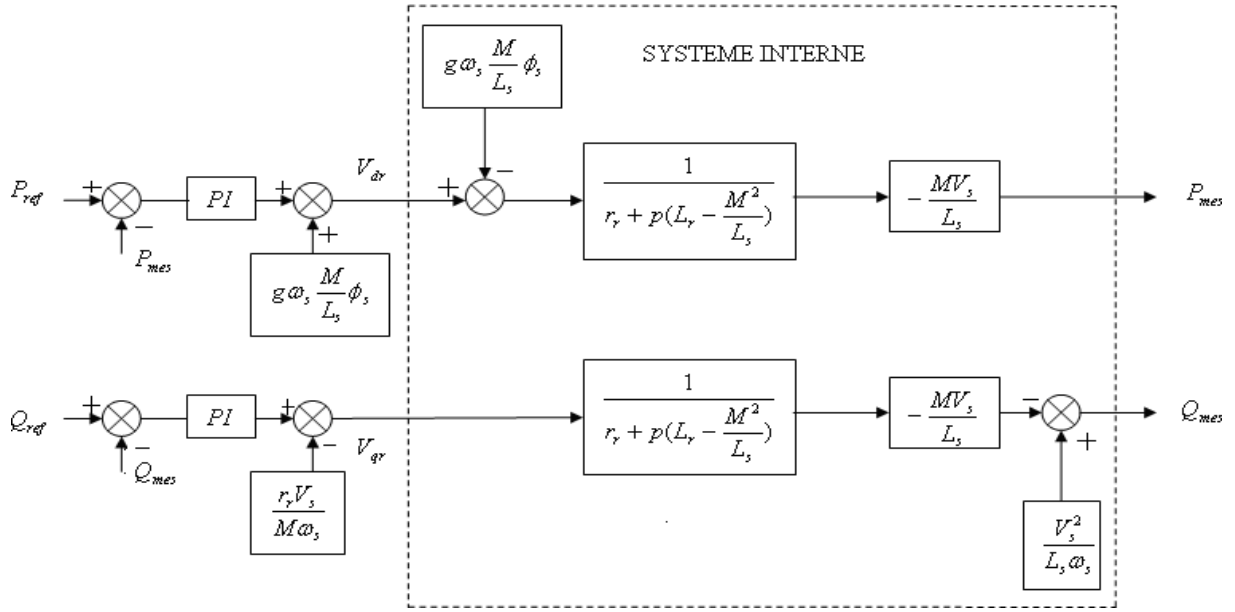


Figure. IV.4 Commande vectorielle avec un seul régulateur

IV.4.1.Synthèse des régulateurs

➤ Synthèse du régulateur Proportionnel-Integral (PI)

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la MADA.

Sa fonction de transfert est de la forme : $F_R(p) = \frac{1+pT_n}{pT_i}$. Le schéma suivant montre la boucle de régulation du système corrigé par le PI. T_n et T_i représentent respectivement la constante de temps de dosage de la corrélation d'intégration et la constante de temps d'intégration [29].

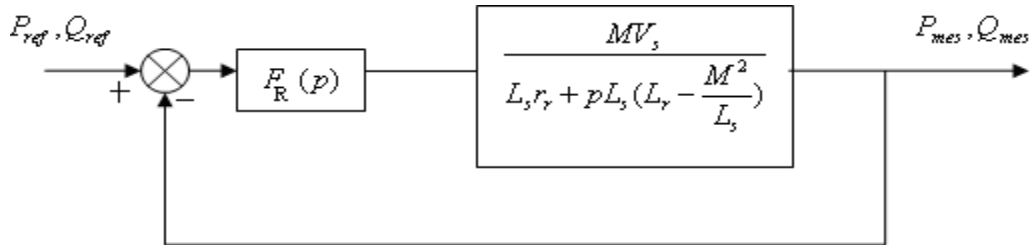


Figure. IV.5 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}} \quad (IV.13)$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)} \quad (IV.14)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{k_p}} \quad (IV.15)$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant[30].

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_o(t)}{1 + F_o(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M} \quad (IV.16)$$

τ_r est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables[31].

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)} \quad ; \quad k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M} \quad (IV.17)$$

IV.4.2. Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques. [32]

IV.4.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure. IV.6.

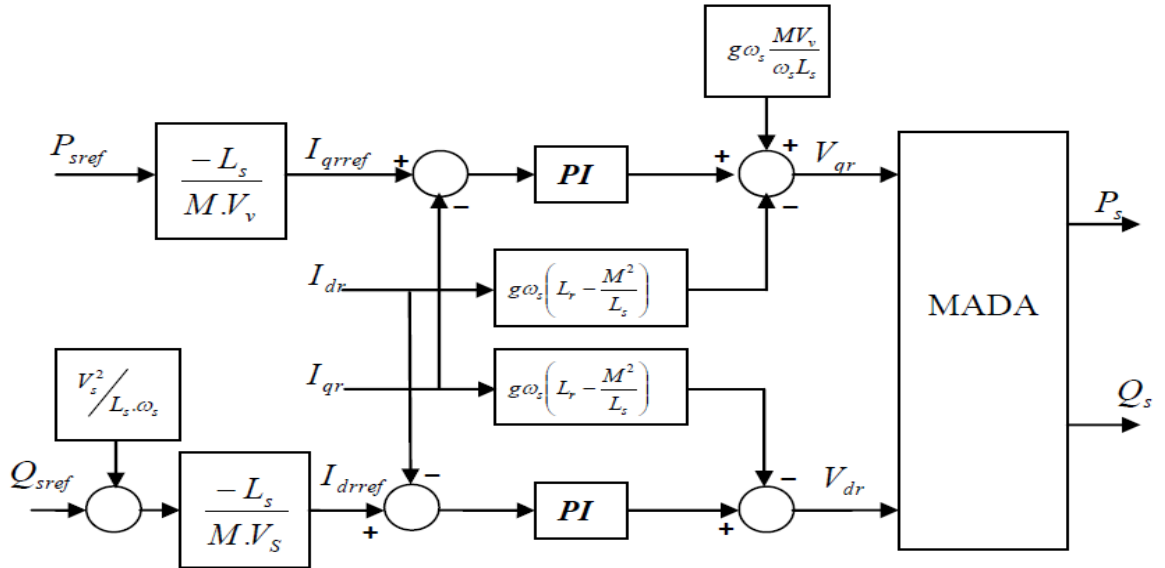


Figure. IV.6 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension

IV.4.2.2. Commande indirecte en boucle fermée

IV.4.2.2.1. Commande sans boucle de puissance

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure IV-7.

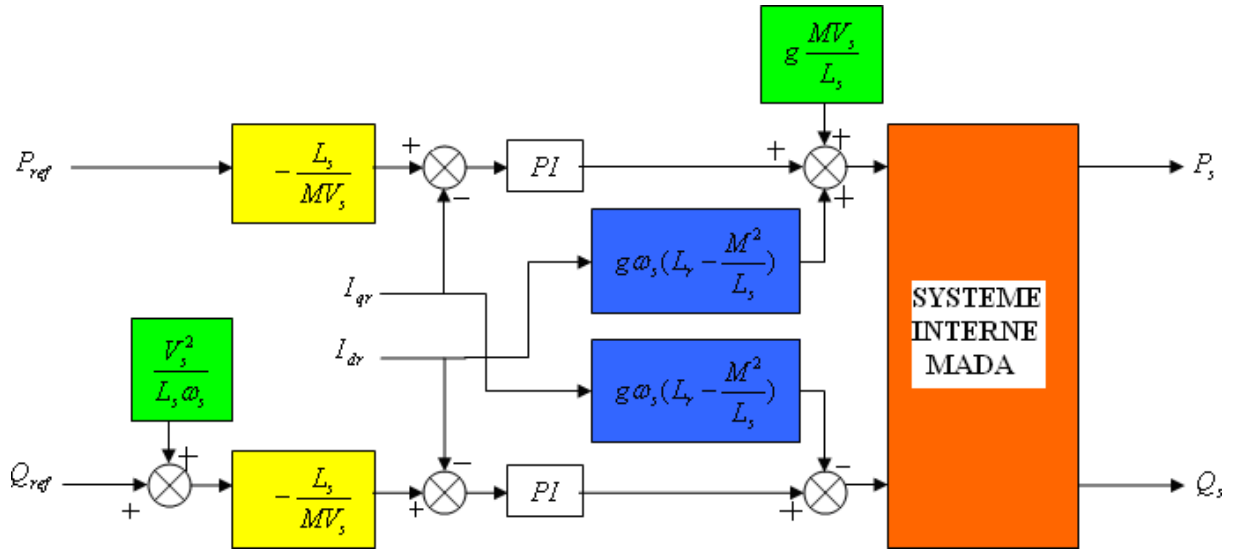


Figure. IV.7 Schéma de la commande indirecte en boucle fermée

IV.4.2.2.2. Commande avec boucle de puissance

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure IV-8 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

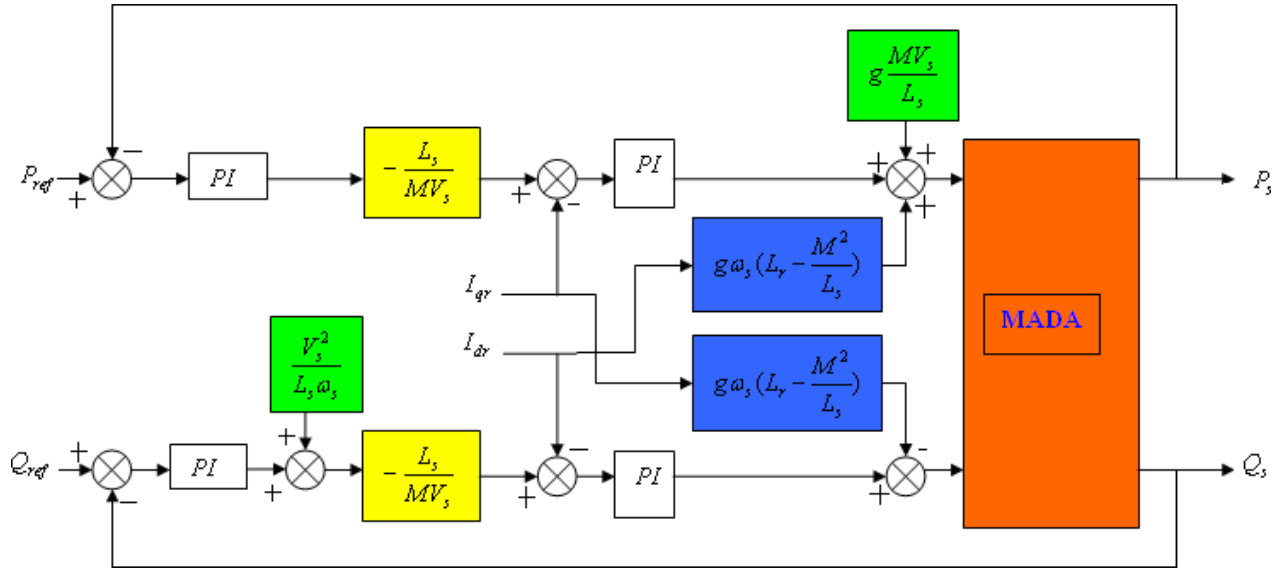


Figure. IV.8. Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

IV.5. Modélisation des convertisseurs :

A. Convertisseurs côté rotor (RSC)

Le principe de commande du convertisseur côté rotor (RSC) est illustré par la figure IV.8.

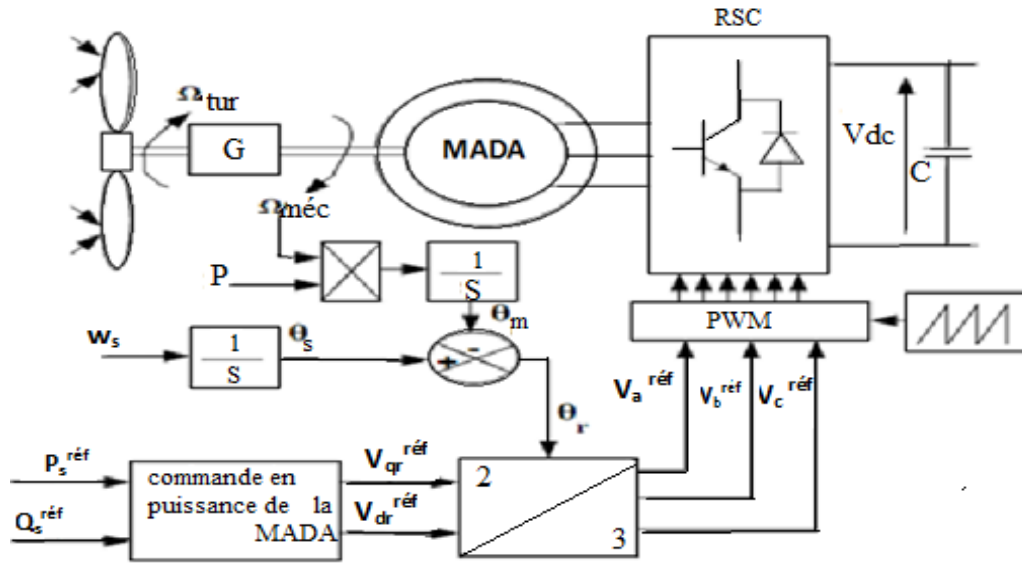


Figure. IV.9. Schéma de principe de la commande du RSC[14]

La structure du redresseur utilisé, pour un fonctionnement hyper synchrone de la MADA est illustrée par la figure IV.10. D'après cette structure, on peut écrire :

$$U_C = U_{M'} - U_M \quad (IV\ 18)$$

À noter que la tension de sortie du redresseur doit être toujours supérieure à la tension d'entrée.

Le redresseur est commandé par l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} (V_a > V_b) \text{ et } (V_a > V_c) \rightarrow U_{M'} = F_{11} V_a \\ (V_b > V_a) \text{ et } (V_b > V_c) \rightarrow U_{M'} = F_{21} V_b \\ (V_c > V_a) \text{ et } (V_c > V_b) \rightarrow U_{M'} = F_{31} V_c \end{cases} \quad (\text{IV. 19})$$

$$\begin{cases} (V_a < V_b) \text{ et } (V_a < V_c) \rightarrow U_M = F_{12} V_a \\ (V_b < V_a) \text{ et } (V_b < V_c) \rightarrow U_M = F_{22} V_b \\ (V_c < V_a) \text{ et } (V_c < V_b) \rightarrow U_M = F_{32} V_c \end{cases} \quad (\text{IV. 20})$$

Avec F_{sk} : fonction de commutation de l'interrupteur k du bras s . $k=\{1,2\}$ et $s=\{1,2,3\}$.

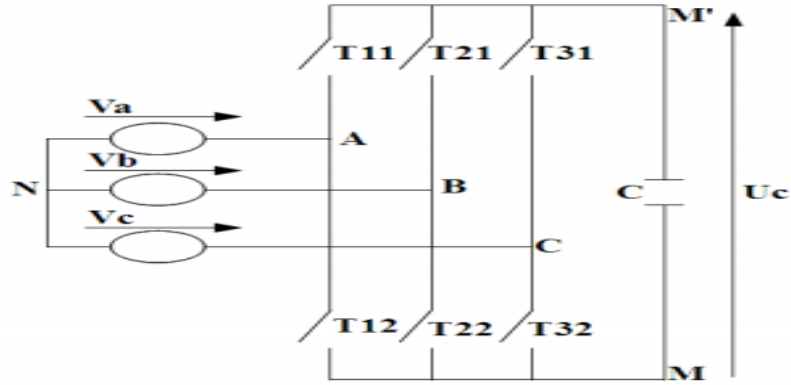


Figure. IV.10. Structure d'un redresseur triphasé à deux niveaux[14]

B. Convertisseurs côté réseau (GSC)

Ce convertisseur permet d'assurer une régulation de la tension du bus cc, et le réglage du facteur de puissance côté réseau.

L'objectif de sa commande est de maintenir la tension du bus cc constante tout en absorbant un courant qui doit être le plus sinusoïdal possible, avec la possibilité de réglage du facteur de puissance côté réseau. [14]

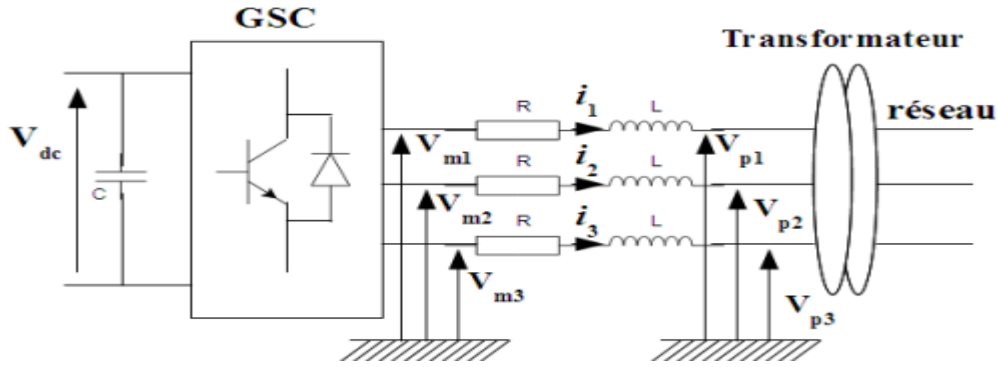


Figure. IV.11. Schéma du Convertisseur GSC et du filtre[14]

Le convertisseur GSC est bidirectionnel. Il fonctionne en redresseur lorsque le glissement (g) est positif (mode hyposynchrone) et en onduleur lorsque le glissement est négatif (mode hypersynchrone). Le convertisseur côté réseau est commandé tel que la puissance active et la puissance réactive côté réseau s'écrivent comme suit [15]:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} U_m \cdot i_d \\ Q = -\frac{3}{2} U_m \cdot i_q \end{cases} \quad (IV.21)$$

Avec : U_m : L'amplitude de la tension de phase.

Le schéma global de la commande du convertisseur côté réseau est représenté par la figure (IV.12).

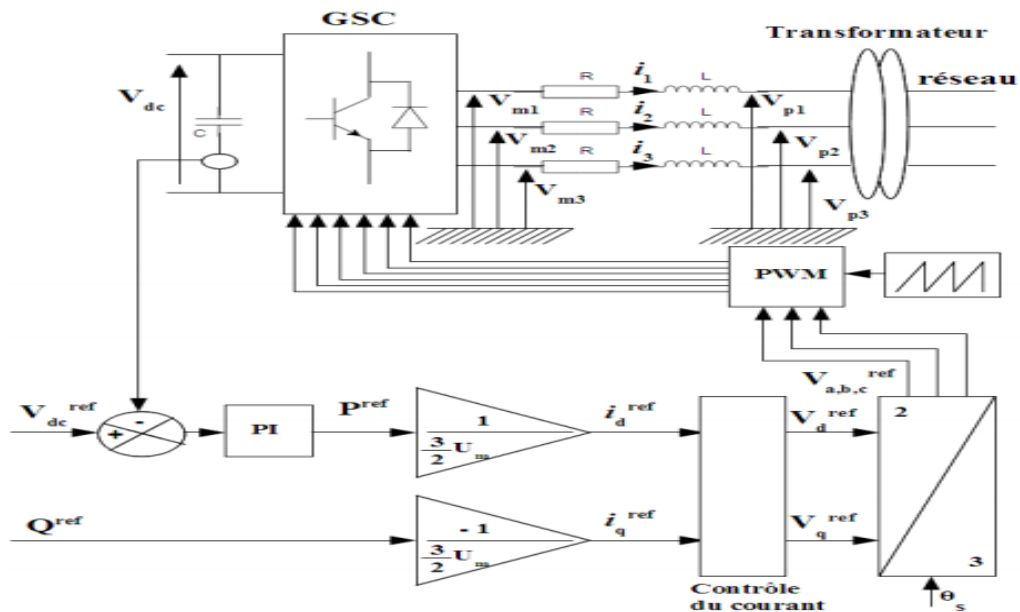


Figure. IV.12. Schéma de principe du contrôle du GSC[14]

IV. 6. Régulateur de tension de bus continue

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur, un contrôleur PI est utilisé pour réguler cette tension, il est défini par la formule suivante [16]:

$$G_c(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (\text{IV. 22})$$

En négligeant les pertes actives dans le convertisseur et dans les inductances de couplage, l'application du principe de conservation de la puissance donne la relation entre la puissance active débitée par le système éolien et celle reçue à la sortie du pont. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$P_{dc} = P_g \quad (\text{IV. 23})$$

$$U_{dc} i_{dc} = 3v \cdot i_{max} = 3v \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (\text{IV. 24})$$

$$i_{dc} = i_c + i_{ch} \quad (\text{IV. 25})$$

Avec:

$$\begin{cases} i_c = C \frac{dU_{dc}}{dt} \\ i_{ch} = \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (\text{IV. 26})$$

Donc, on peut établir le modèle suivant :

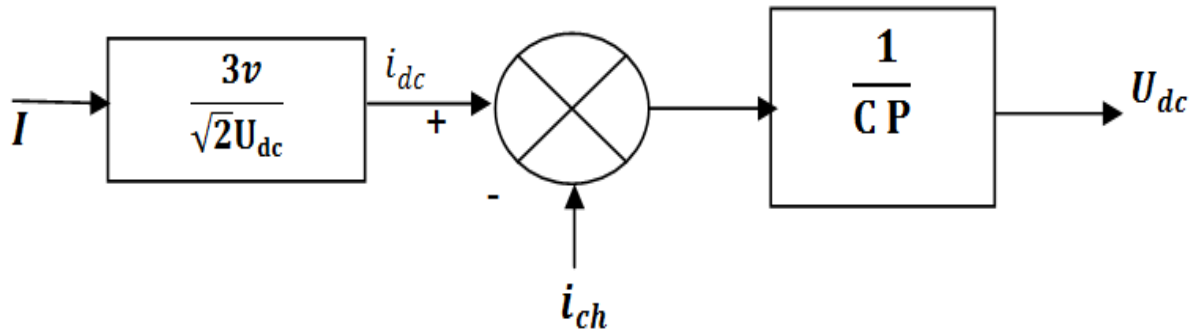


Figure. IV.13. Modèle de la boucle de tension.

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée :

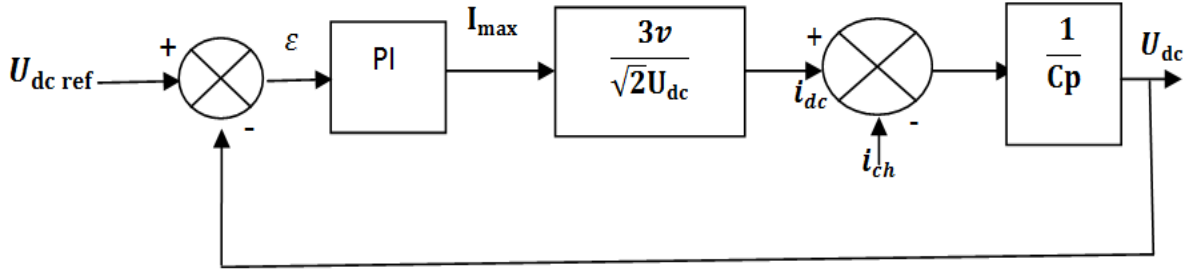


Figure. IV.14. Modèle en boucle fermée de la boucle de tension du bus continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$FTBO(P) = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \cdot \frac{3v}{\sqrt{2}U_{dc}} \cdot \frac{1}{c_p} \quad (IV. 27)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$FTBF(P) = \frac{FTBO(P)}{1 + FTBO(P)} \quad (IV. 28)$$

D'autre part :

$$FTBF(P) = \frac{1 + k_p \cdot P}{\frac{1}{w_n^2} \cdot P^2 + \frac{2 \cdot \varepsilon}{w_n} \cdot P + 1} \quad (IV. 29)$$

Donc:

$$k_i = 2c \frac{U_{dc}}{3v} w_n \quad (IV. 30)$$

Et:

$$k_p = \frac{2 \cdot \varepsilon}{w_n} \quad (IV. 31)$$

$$T_n = \frac{k_p}{k_i}, T_i = \frac{1}{k_i} \quad (IV. 32)$$

T_n : Constante de temps du correcteur PI.

T_i : Constante de temps intégrale du correcteur PI.

La tension de bus continu dans la figure (IV.15), qui représenté sous forme de spectre harmonique:

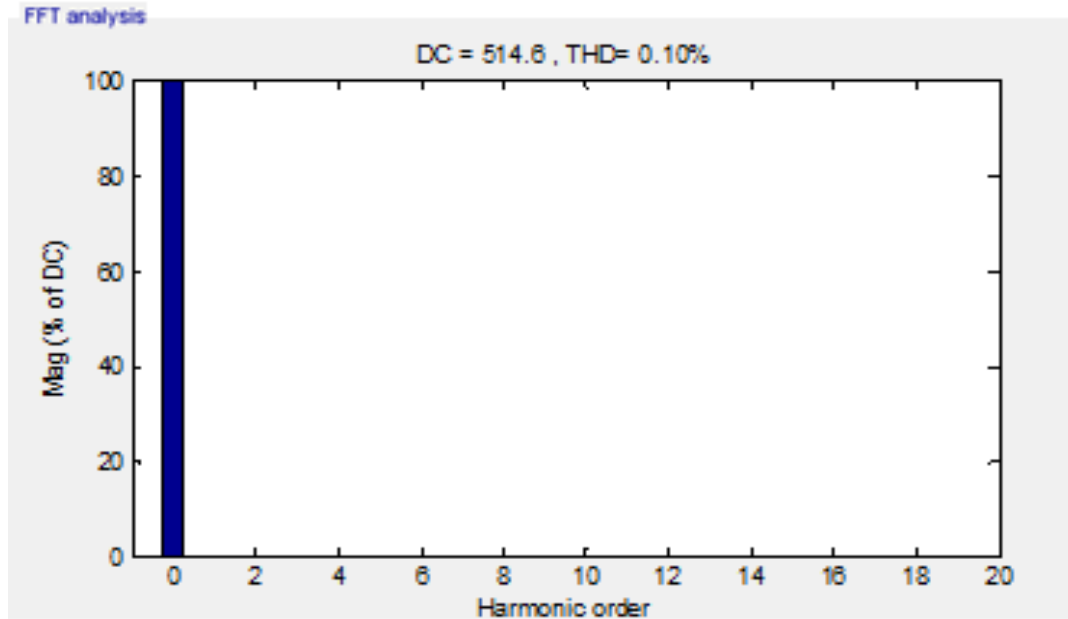


Figure. IV.15. Spectre des harmoniques de contrôle de la tension du bus continu.

De plus les ondulations de cette tension sont très petites, où son spectre d'harmoniques représente un THD très réduit qui égale à 0.10%, comme le montre la figure IV.15. De plus, pendant tout la plage de la variation du profil du vent, cette tension continue reste stable par conséquent un transite continu de puissance est assuré entre le rotor du générateur et le réseau.

IV.7. Alimentation de la DFAM :

Le long de tout notre travail, les différentes structures de commande sont constituées de l'association d'une machine asynchrone à double alimentation avec un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'association redresseur-filtre-onduleur de tension est représentée dans la figure (IV.16).

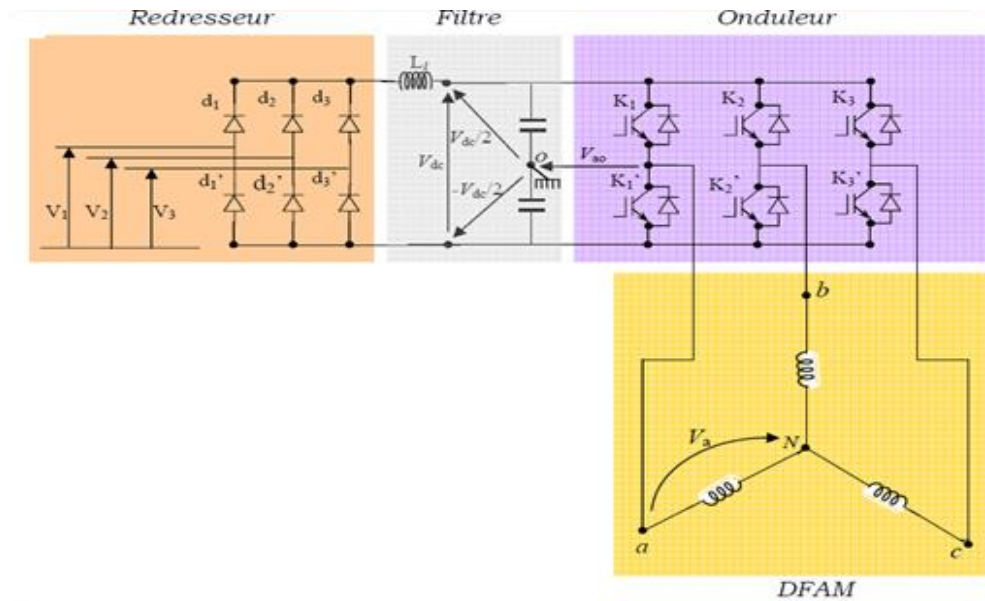


Figure. IV.16. Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI

Les machines électriques sont alimentées par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance (Fig. IV.16). L'onduleur de tension avec onde porteuse est utilisé pour la commande vectorielle des machines électriques. [17]

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal dents de scie, et en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- si $V_{ref} > V_p$ - le transistor supérieur du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_p$ - le transistor inférieur du bras de pont conduit.

Où V_{ref} représente une des trois tensions de référence et V_p représente le signal dents de scie ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou (PWM en anglais).

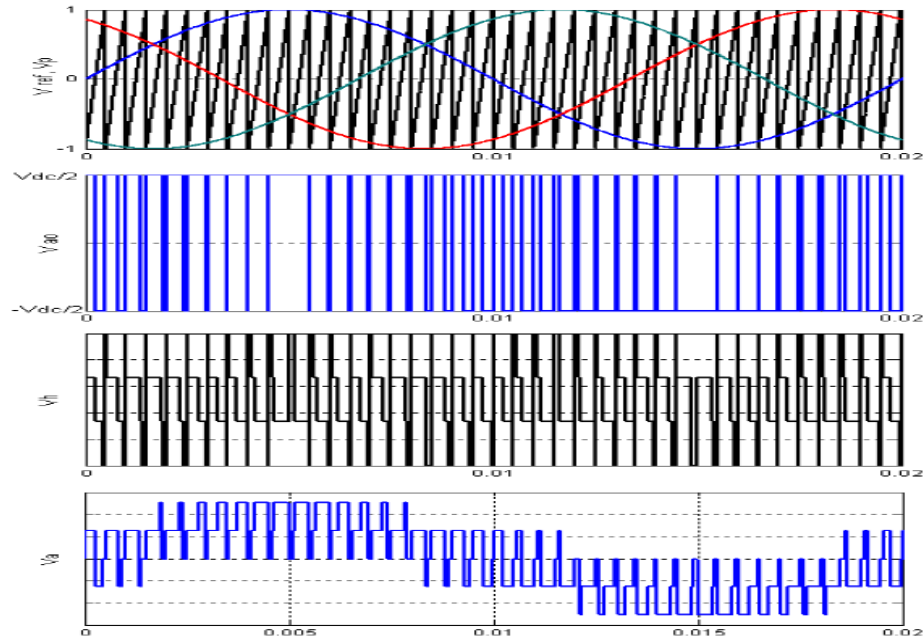


Figure. IV.17. Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions

La Figure (IV.17) représente le principe de la commande MLI et quelques enveloppes des tensions. Sur cette figure, V_h est la tension homopolaire qui peut s'exprimer par :

$$V_h = V_{No} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{IV. 33})$$

La commande MLI présente l'avantage d'une fréquence constante de commutation, qui est fixée par la fréquence de l'onde porteuse. Le schéma Simulink pour ce type d'onduleur est présenté dans la Figure (IV.18).

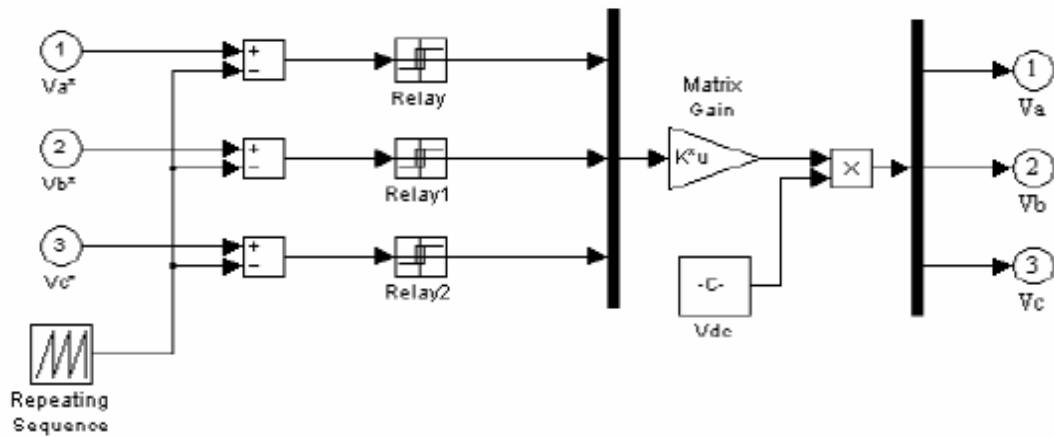


Figure. IV.18. Onduleur de tension avec onde porteuse

La *DFAM* et le réseau électrique sont des systèmes continus, mais le convertisseur électronique est un système discret. Comme on le voit dans la figure (IV.18), le schéma Simulink du convertisseur est assez compliqué et il s'avère gourmand en temps de calcul, surtout à cause des relais,[28].

Dans ce travail, le rapport de modulation est égal à 1, et la fréquence de la porteuse est égale 2 KHz.

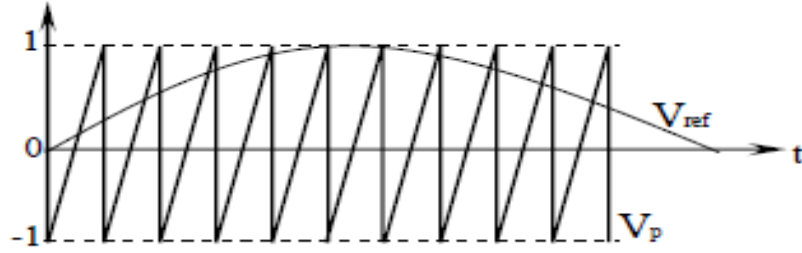


Figure. IV.19. Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur

Dans la Figure (IV.19) on voit que l'amplitude de V_p est unitaire. L'amplitude de l'onde de référence V_{ref} (ou l'onde modulatrice) peut prendre des valeurs comprises entre $[0,1]$. Sachant que les tensions polaires de l'onduleur peuvent prendre seulement deux valeurs qui sont différentes de zéro ($\pm V_{dc}/2$) et en supposant que la fréquence de l'onde porteuse est infinie, on peut écrire la relation suivante entre les composantes utiles des tensions polaires et les signaux de référence :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad (IV.34)$$

Les convertisseurs d'aujourd'hui peuvent fonctionner à des fréquences de commutation de quelques kHz, beaucoup plus grandes que les fréquences des signaux de référence. On peut donc considérer que la relation (IV.29) est vraie aussi pour un convertisseur réel, [28-29]. En appliquant la transformation directe de Park à la relation (IV.29), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{dref} \\ V_{qref} \end{bmatrix} \quad (IV.35)$$

Pour déterminer l'évolution de la tension V_{dc} du bus continu, il est nécessaire de déterminer le courant circulant dans le condensateur du bus continu . Ce courant dépend des courants introduits dans le bus continu. Ces courants peuvent être déterminés à partir du bilan de puissances aux deux extrémités du convertisseur. Pour le convertisseur de la Figure (IV.19), on peut écrire [19]:

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c = \frac{V_{dc}}{2} (V_{a\text{ref}} \cdot i_a + V_{b\text{ref}} \cdot i_b + V_{c\text{ref}} \cdot i_c) \quad (\text{IV.36})$$

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q = \frac{V_{dc}}{2} (V_{d\text{ref}} \cdot i_d + V_{q\text{ref}} \cdot i_q) \quad (\text{IV.37})$$

A partir de (IV.37), on déduit facilement :

$$i_{dc} = \frac{1}{2} (V_{d\text{ref}} \cdot i_d + V_{q\text{ref}} \cdot i_q) \quad (\text{IV.38})$$

IV.8. Calculer des régulateurs des courants rotoriques :

En supposant que le découplage est réalisé, on aura :

$$\frac{i_{dr}^*(s)}{V_{dr}^*(s)} = \frac{1}{\gamma_r + s} \quad (\text{IV.39})$$

La boucle de régulation du courant i_{dr}^* est représentée par le schéma bloc de la figure (IV.20) :

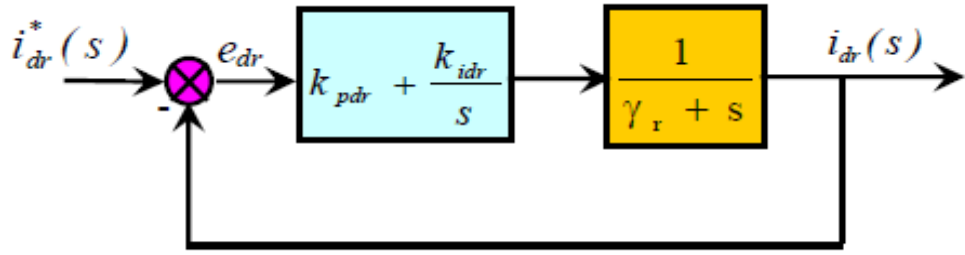


Figure. IV.20. Schéma fonctionnel de régulation du courant idr

La fonction de transfert en boucle fermée (BF) est la suivante :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (\gamma_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} \quad (\text{IV.40})$$

Pour que le système en BF puisse avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est $\frac{1}{1+\tau \cdot s}$; Il faut que :

$$\frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (\gamma_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Après simplification on aura :

$$k_{pdr} = \frac{1}{\tau}, \quad k_{idr} = \frac{Y_r}{\tau}$$

Avec : $\tau < \tau_e$

τ_e : la constante de temps électrique ratorique du système.

Dans notre cas $\tau_e = \frac{L_r}{R_r} = 0.13 \text{ s}$.

Nous avons choisi $\tau = 0.002 \text{ s}$, pour avoir une dynamique du processus plus rapide.

L'application numérique nous donne : $k_{pdr} = 500, k_{idr} = 62040$.

Pour déterminer les deux coefficients k_{pqr}, k_{iqr} , il sera procédé de la même façon que pour le courant i_{dr} , $k_{pqr} = 500, k_{iqr} = 62040$.

Le schéma de commande complet est illustré dans la figure (IV.21) :

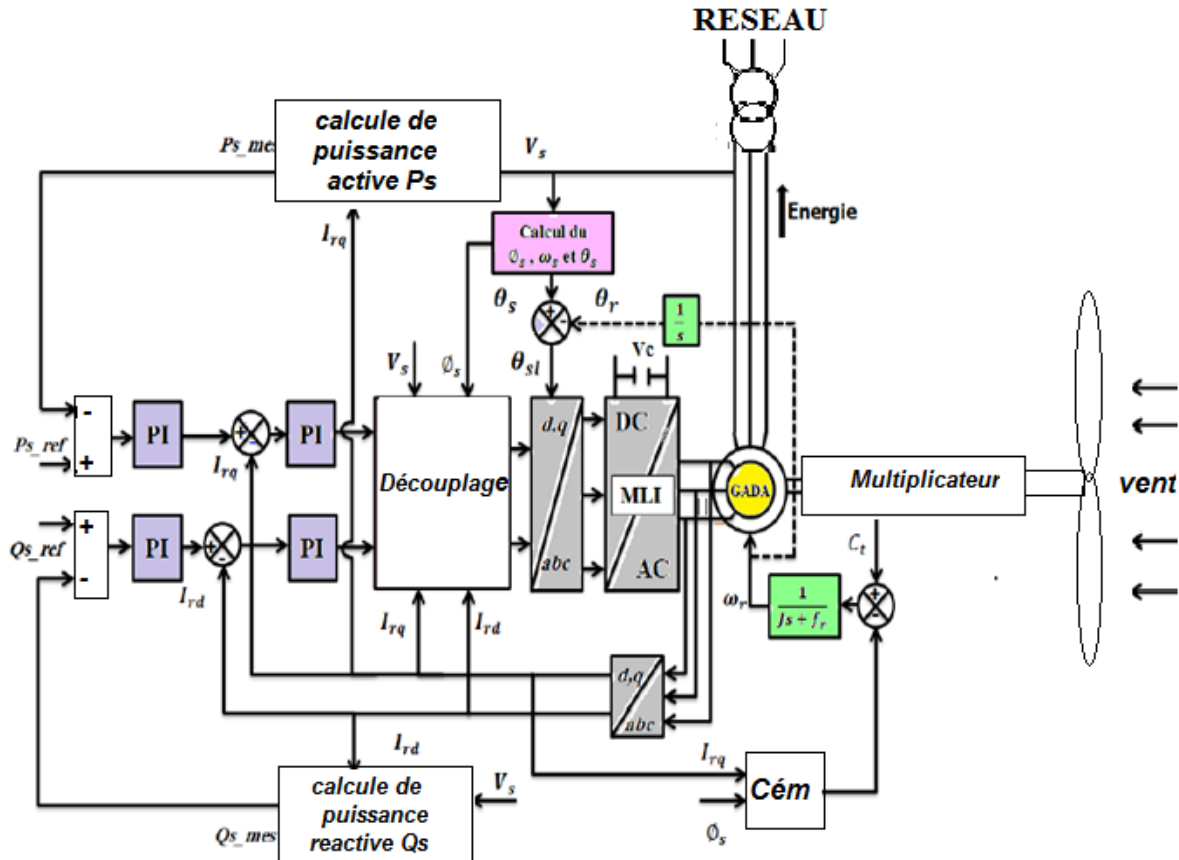


Figure. IV.21. Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA

IV.9. Résultats de simulations :

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des régulateur PI. De ce fait, nous reteindrons la commande indirecte pour la suite de nos travaux.

Les résultats présentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la GADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou celle du flux et du couple.

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=0.2$ s ($P_{\text{réf}} = 0$ W);
- ❖ Entre $t=0.2$ s et $t=0.6$ s échelon négative ($P_{\text{réf}} = -20000$ W);
- ❖ Entre $t=0.6$ s et $t=1$ s ($P_{\text{réf}} = -10000$ W);

La puissance réactive :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=1$ s ($Q_{\text{réf}} = 0$ var);

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la GADA.

La figure IV.22 représente l'évolution de la tension du bus continu, qui fait montrer que :

- La tension du bus continu atteint sa consigne qui est 514.6V à un temps de réponse plus petit, sans dépassement.
- La forme de la tension du bus continu est plus douce, qui présente une supériorité lors des variations de la vitesse du vent.

Les figures IV.23 montrent que le couple électromagnétique de la machine asynchrone double alimentation.

Le figure IV.24, IV.25 montrent que les performances de poursuite des courants rotoriques et statoriques sont satisfaisantes; cependant on remarque un dépassement au régime transitoire (au démarrage et au changement de consigne), ce qui signifie que le régulateur PI ne maîtrise pas le régime transitoire.

La figure IV.26 montre que la puissance active du côté du stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur d'énergie fournie par la DFAM. La

puissance réactive est toujours nulle, c'est une condition de fonctionnement de la DFAM pour avoir un facteur de puissance unitaire.

La figure IV.32 montre que la tension de phase statorique est en phase avec le courant de phase statorique.

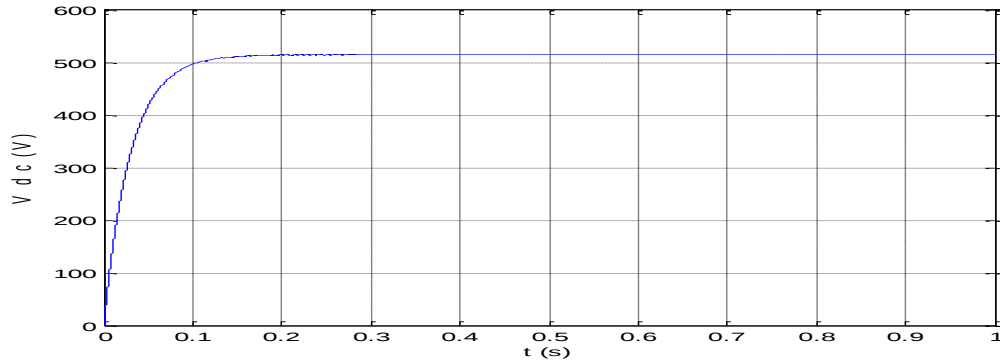


Figure. IV.22. Tension du bus continu (V)

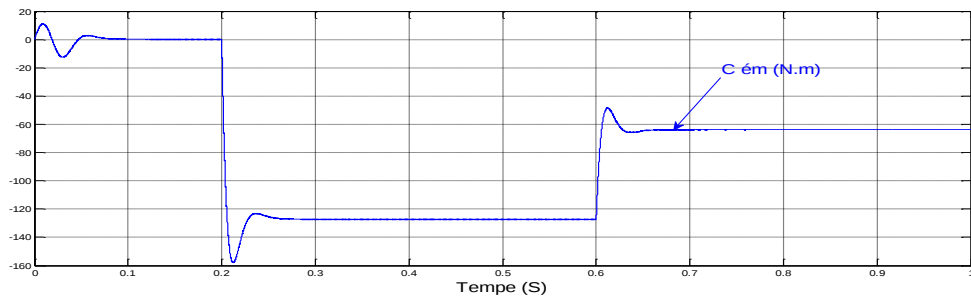


Figure. IV.23. Couple électromagnétique

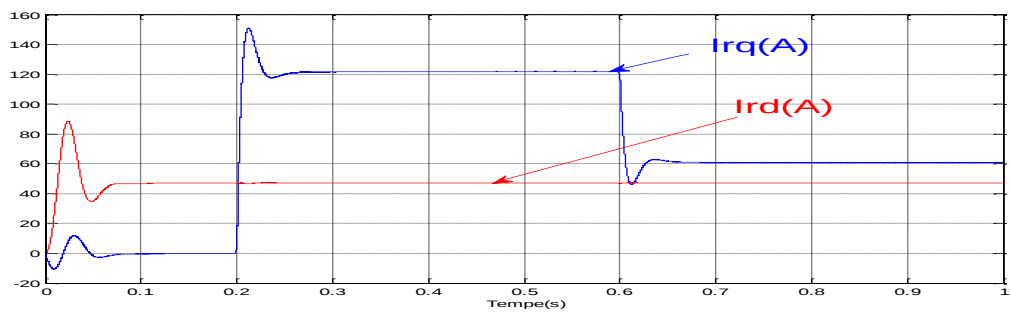


Figure. IV.24. Les courants directs et quadrature rotoriques.

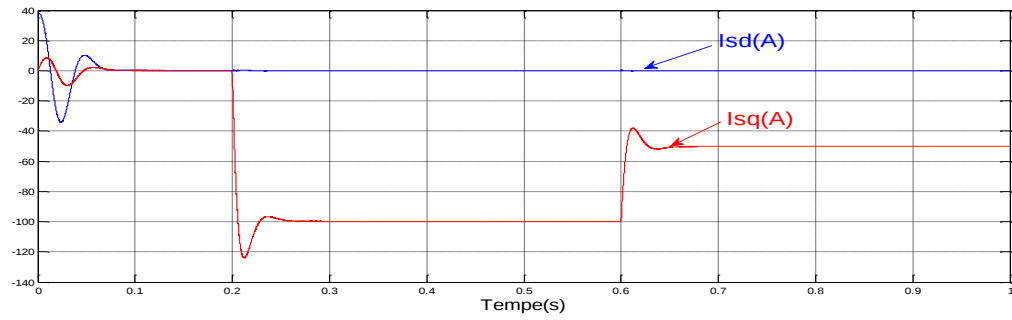


Figure. IV.25. Les courants direct et quadrature statorique .

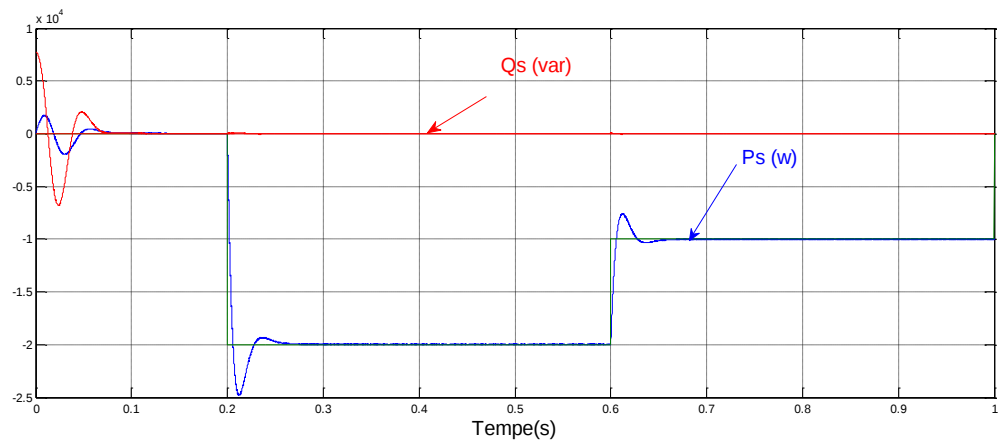


Figure. IV.26. Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

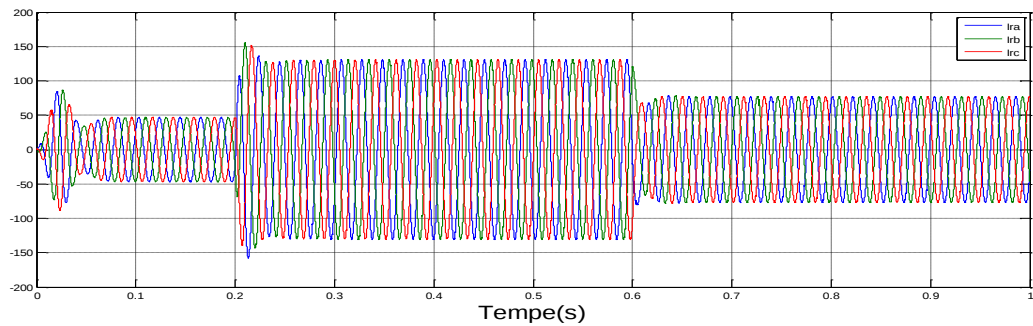


Figure. IV.27. Courant triphasé ratorique

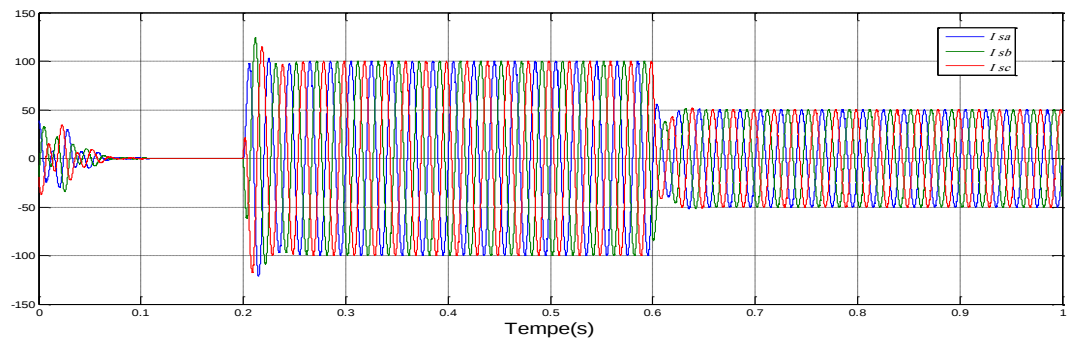


Figure. IV.28. Courant triphasé statoriques

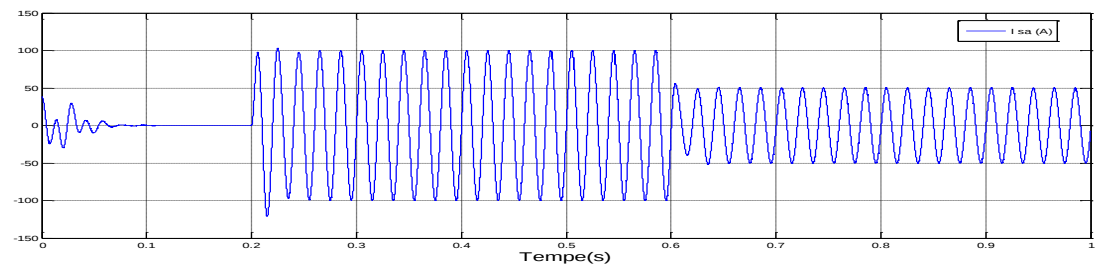


Figure. IV.29. Courant par phase statoriques

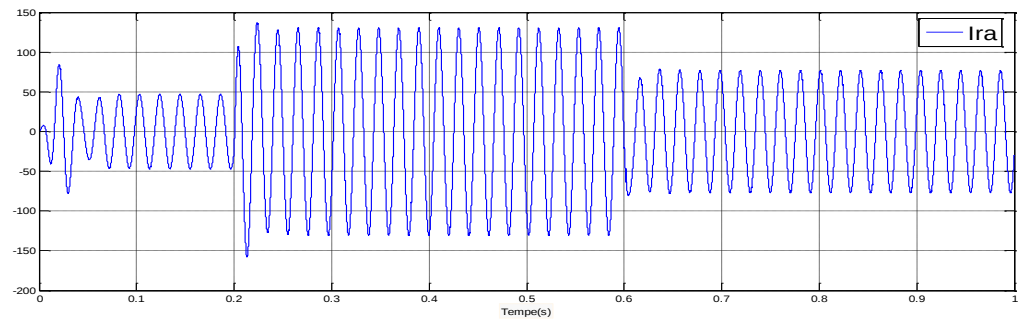


Figure. IV.30. Courant par phase ratorique

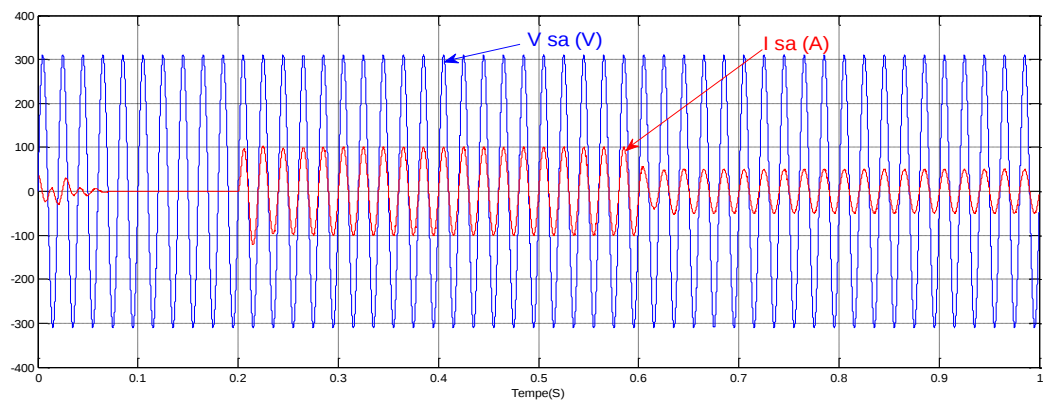


Figure. IV.31. Le courant et la tension statoriques

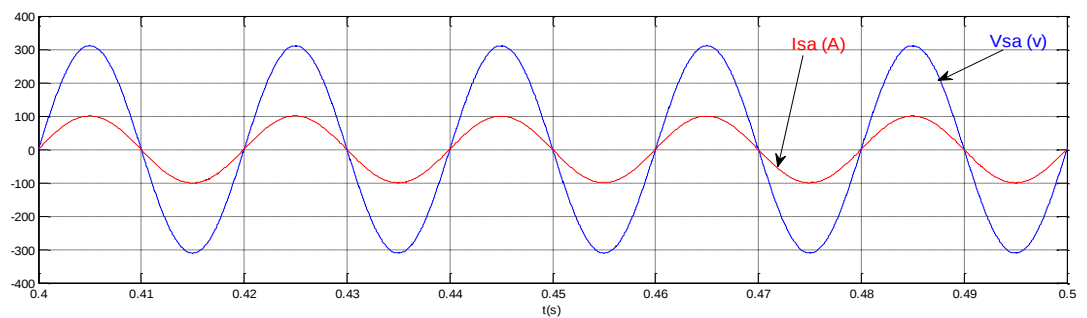


Figure. IV.32. Zoom sur le courant et la tension statoriques

IV.10. Tests de robustesse

Dans le but de tester la robustesse de la commande par les régulateurs PI, nous avons également étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique, inductance et mutuelle sur le découplage entre le flux et le couple.

Pour cela nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance rotorique (R_r) introduite à $t = 0.3s$, aussi une diminution de 25% des inductances propres et mutuelle (L_r , L_s et M) introduite à $t = 0.3s$.

Les figures IV.33-IV.41 illustrent les résultats du test de simulation.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la commande par les régulateurs PI présente une faible robustesse dans le cas de variations paramétriques de la machine. La dynamique de poursuite de la consigne est affectée par la variation paramétrique introduite sur le système.

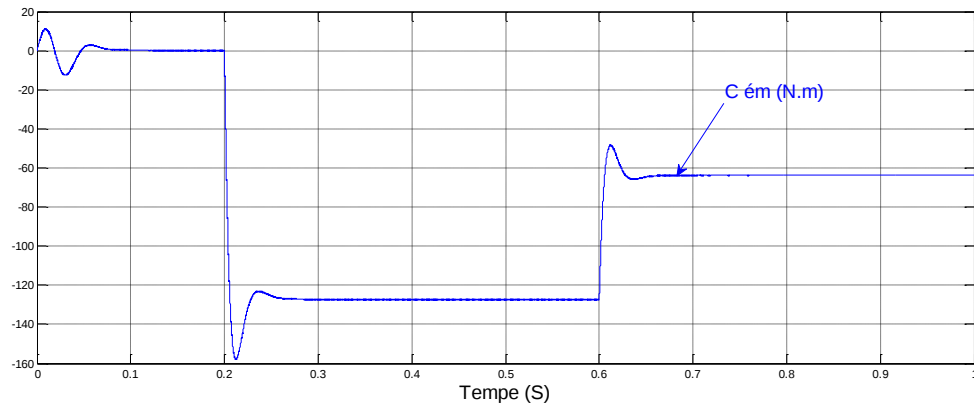


Figure. IV.33. Couple électromagnétique

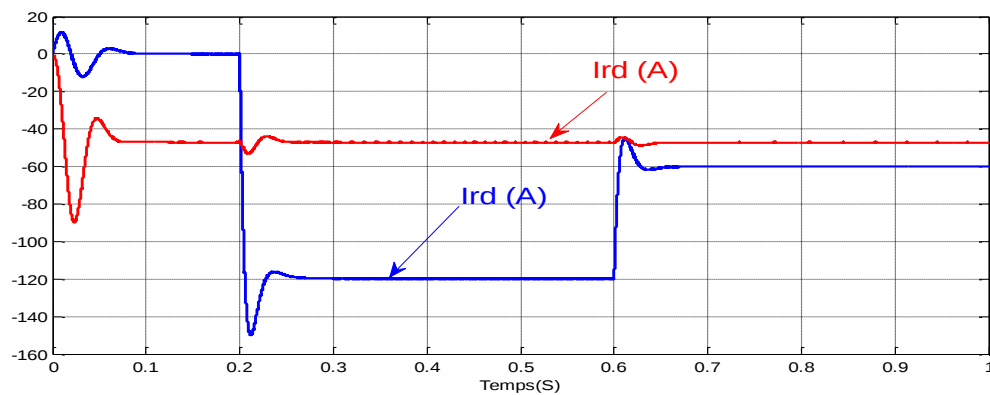


Figure. IV.34. Les courants direct et quadrature rotoriques.

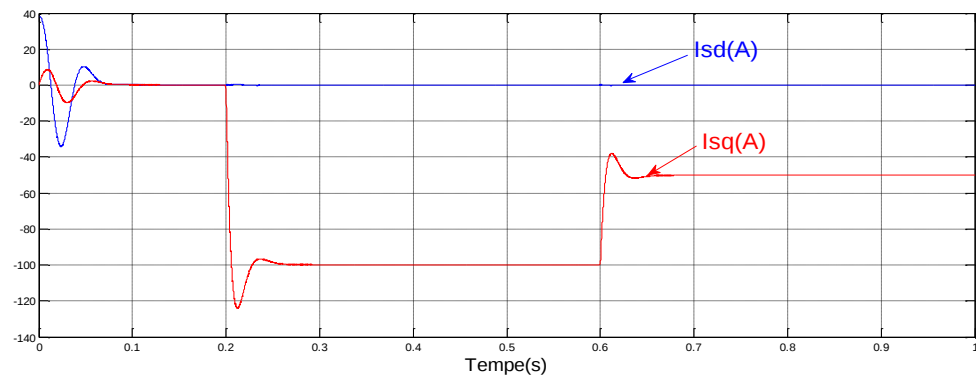


Figure. IV.35. Les courants direct et quadrature statorique .

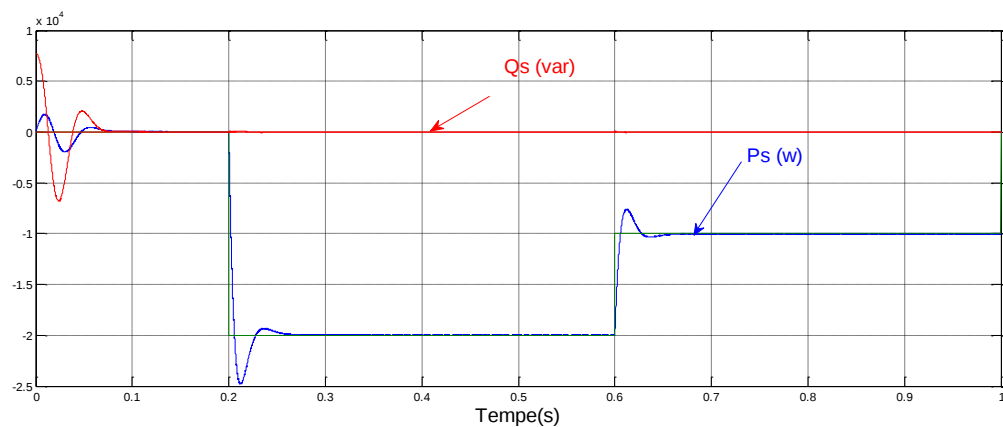


Figure. IV.36. Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

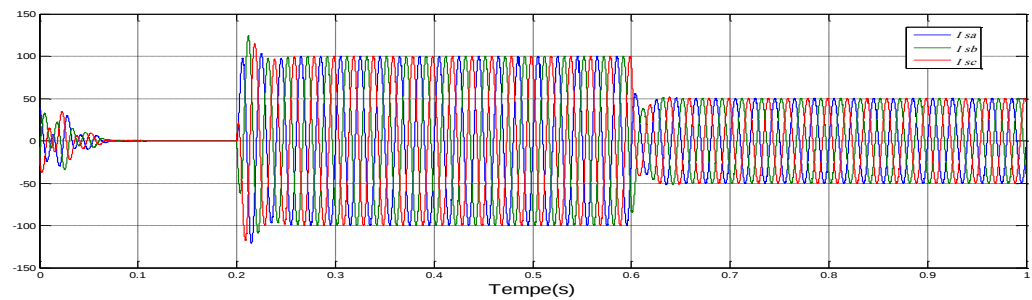


Figure. IV.37. Courant triphasé statoriques

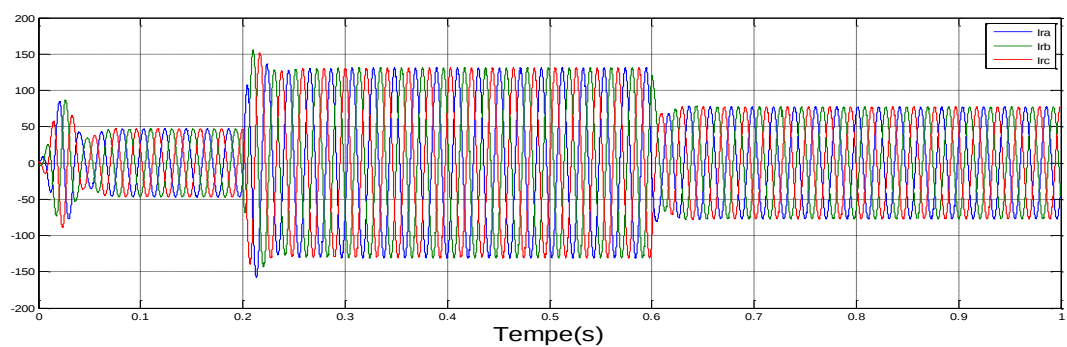


Figure. IV.38. Courant triphasé rotorique

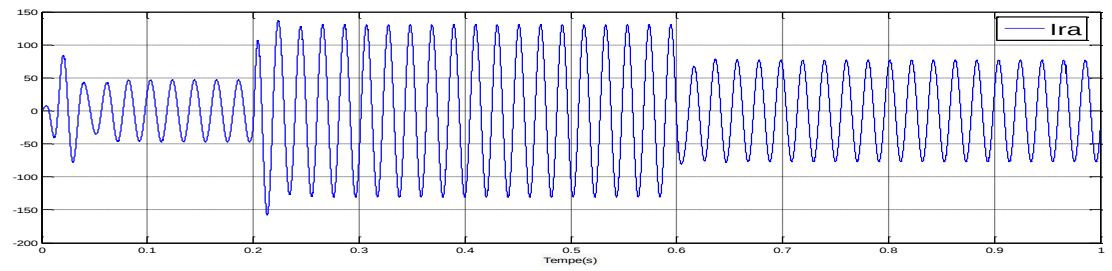


Figure. IV.39. Courant par phase rotorique

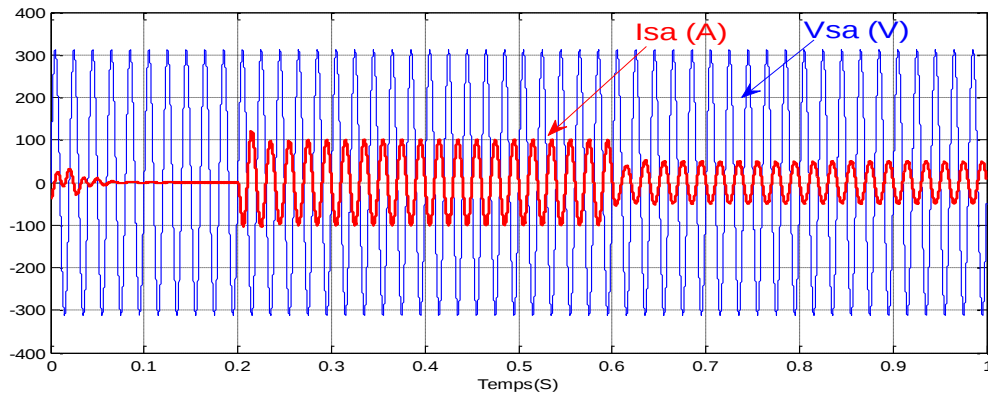


Figure. IV.40. Le courant et la tension statoriques

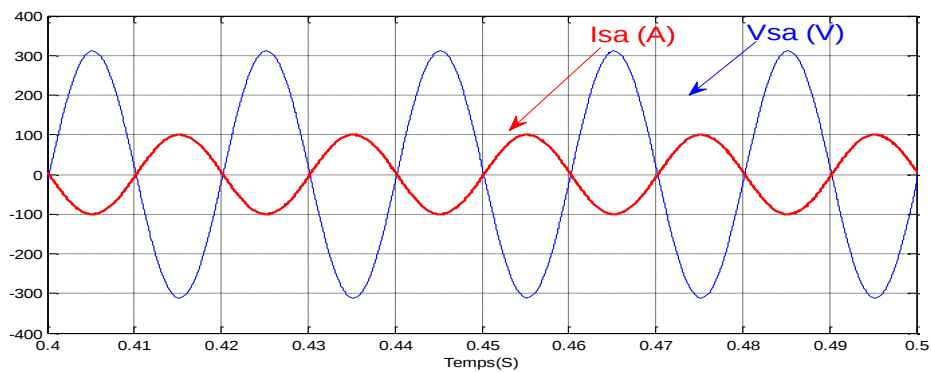


Figure. IV.41. Zoom sur le courant et la tension statoriques

IV.11. Conclusion :

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

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne, et l'étude de différents systèmes de contrôle de la génératrice.

Pour ce faire, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au le rotor, par un convertisseur MLI.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau on a utilisée Une commande vectorielle. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect , le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

Suggestions et perspectives

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

Annexe

Annexes

Annexe « A »

► Paramètres du système éolien

► A.1 - Paramètres de la turbine éolienne [ELA01] :

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Nombre des pales	3
Rayon du rotor R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Moment d'inertie total J	1000 Kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux f_v	0.0024N.m.s ⁻¹
Vitesse du vent de démarrage v_d	4m/s
Vitesse du vent d'arrêt v_m	25m/s

Tab. A.1 - Paramètres de la turbine éolienne de 1.5MW.

► A.2-Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation [ELA01]:

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique
Puissance nominale P_n	1.5MW
Courant nominal I_n	1900A
Tension nominale statorique V_s	398/690V
Fréquence nominale statorique f	50Hz
Tension nominale rotorique V_r	225/389V
Résistance statorique R_s	0.012Ω
Résistance rotorique R_r	0.021Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136H
Inductance mutuelle L_m	0.0135H
Tension du bus continu U_{DC}	1200V
Inertie totale J	1000kg.m ²
Nombre de paires de pôles p	2

Tab. A.2 - Paramètres de la MADA de 1.5MW.

Annexe « B »

► Synthèse du régulateur PI pour le contrôle MPPT :

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système un correcteur proportionnel intégral est utilisé. Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur la figure B.1.

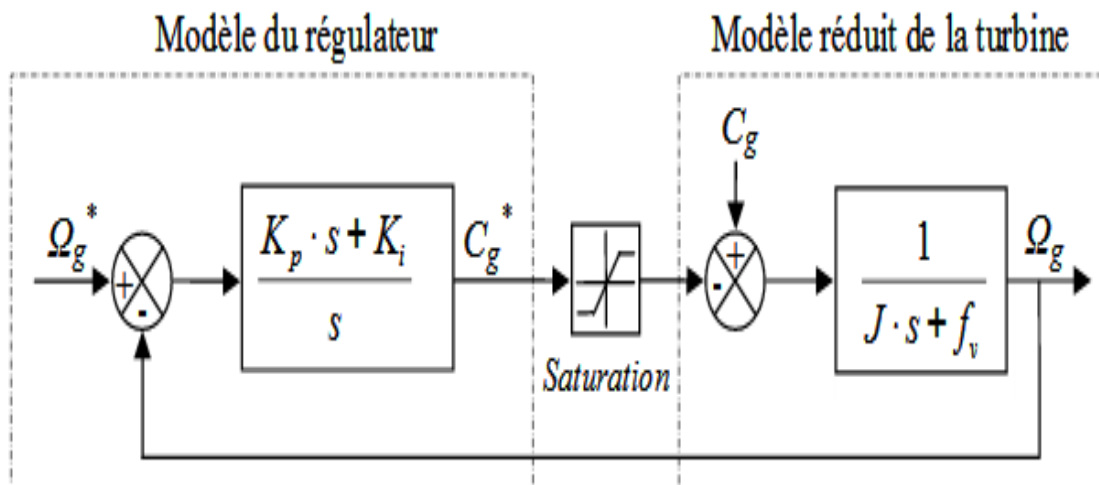


Fig. B.1 - Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

Nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_g = F(s). \Omega_g^* + G(s). C_g \quad (B.1)$$

Où $F(s)$ est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{K_{p\Omega} \cdot s + K_{i\Omega}}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (B.2)$$

Et $G(s)$ est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (B.3)$$

Pour baisser l'effet de la perturbation (Cg), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain $K_{p\Omega}$. L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2^{ème} ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \\ \xi = \frac{f_s + K_p}{J \cdot 2\omega_n} \end{cases} \quad (B.4)$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_i = \omega_n^2 \cdot J \\ K_p = 2\xi J \omega_n - f_v \end{cases} \quad (B.5)$$

Annexe « C »

► La transformation de Concordia et de Clarke:

Transformation directe de Concordia	Transformation directe de Clarke
Passage du système triphasé (a, b, c) vers le système biphasé (α, β)	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad c-a-d \quad \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32} [x_{abc}]^T$	
$\text{Avec } C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\text{Avec } C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Tab. C.1 - La transformation de Concordia et de Clarke.

References Bibliographiques

[ELA01] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension »; Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Poitiers. F, “Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de l’Energie Eolienne”, Thèse de l’Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [2] Drid. S, “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 & Expérimentation”, thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2005.
- [3] Panda. D, Benedict. E. L. Venkataramanan. G and Lipo. T. A, “A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine”, Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, pp. 1695-1702, Oct 2001.
- [4] Heller. M and W. Schumacher, “Stability analysis of doubly-fed induction machines in stator flux reference frame”, Proc. EPE (Trondheim), vol. 2, p. 707-710, 1997.
- [5] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, “Application and Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Generator and Motor Operating”, Cigre, Moscou, Russia, 1995.
- [6] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, “Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Motor Operating”, ICEM Proceedings, Spain, 1996.
- [7] Morel. L, Godfroid. M, Mirzaian. A, Kauffmann. J.M, “Double-Fed Induction Machine : Converter Optimization and Field Oriented Control Without Position Sensor”, IEEE Proc. Electr Power Appl. 145, No. 4, pp. 360-368, July 1998.
- [8] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, “Stator Flux Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder”, IEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 147, No 4, p. 241-250, July 2000.
- [9] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, “Combined Magnetizing Flux Oriented Control of the Cascaded Doubly Fed Induction Machine”, IEEE Proc. Electr Power Appl. Vol. 148, No. 4, p. 354-362, 2001.
- [10] Lecocq. D, Lataire. P.H, Wymeersch. W, “Application of the Double Fed Asynchronous Motor (DFAM) in Variable Speed Drives”, EPE Conference, Brighton, Vol. 5, pp. 419-423, 13-16 September. 1993.

Bibliographie

- [11] Lecocq. D, “Contribution à l’Etude des Moteurs Alternatifs à Double Alimentation par Convertisseurs Statiques pour Entraînements de Forte Puissance”, Thèse de Doctorat, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit, Brussel, 1994.
- [12] Lecocq. D, Lataire. P.H, “The Indirect Controlled Double Fed Asynchronous Motor for Variable Speed Drives”, EPE Conference, Vol. 3, pp. 405-410, Sevilla, 19-21 September. 1995.
- [13] Lecocq. D, Lataire. P.H, “Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages”, Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.
- [14] Vidal. P. E, “Commande non Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [15] Masmoudi. A, Toumi. A, Kamoun. M, “Power on Analysis and Efficiency Optimization of a Doubly Fed Synchronous Machine”, Proceedings Electric Machines and Power Systems 21, pp. 473-491, 1993.
- [16] Drid. S, Nait-Said. M.S, Tadjine. M, “Double Flux Oriented Control for the Doubly Fed Induction Motor Electric Power Components and Systems”, Taylor & Francis Inc., 33:1081-1095, 2005.
- [17] Hansen. L. H, L. Heller, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1205(EN), ISBN 87- 550-2743-8, 2001.
- [18] L. Xu and C. Wei, “Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensor less scheme”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, no. 3, pp. 636-642, May/June. 1995.
- [19] Petersson .A and S. Lundberg, “Energy efficiency comparison of electrical systems for wind turbines”, in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NOR pie/2002), Stockholm, Sweden, 12-14 Aug. 2002.

- [20] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, “Robust output feedback control of a doubly fed induction machine”, Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [21] Pena. R.S, Clare. J.C, Asher. G.M, “Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Applications to Variable Speed Wind-Energy Generation”, IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 3, pp. 231-241, May 1996.
- [22] Pena. R.S, Clare. J. C, Asher. G. M, “A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine”, IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, pp. 380-387, September. 1996.
- [23] Pena. R.S, Clare. J.C, Asher. G. M, “Vector Control of a Variable Speed Doubly-Fed Induction Machine for Wind Generation Systems”, EPE Journal, Vol. 6, N° 3-4, pp. 60-67, December. 1996.
- [24] Hofmann. W and F. Okafor, “ Doubly fed full controlled induction wind generator for optimal power utilization”, Proc. PEDS'01, International conference on Power Electronics and Drives Systems (Bali Indonesia), oct. 2001.
- [25] Kelber. C, Schumacher. W “ Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machine”, Proc. VSSH y European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [26] Kelber. C, Schumacher. W, “Control of Doubly-Fed Induction Machines as an Adjustable Speed Motor/Generator”, Proc. VSSH y European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [27] Khelfa. S, “Commande vectorielle d’une machine à induction ; impacts de la saturation de la machine et la modulation du convertisseur”, thèse de magister, Batna 2001.
- [28] Poitiers. F, Machoum. M, Le Doeuff. R, zaim. M. E, “control of doubly fed induction generator for wind energy conversion systems”, international journal of renewable energy engeneering, Vol. 3, N° 3, pp. 373-378, December 2001.

Bibliographie

- [29] Chaiba. A, R. Abdessemed, M. L. Bendaas and A. Dendouga, "Control of Torque and Unity stator Side Power Factor of the Doubly-Fed Induction Generator", Conférence sur le Génie Electrique "CGE'04", l'Ecole militaires polytechnique, proc, 12-13 avril, 2005.
- [30] Ramuz. D, "Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs", Thèse, Institut de Génie Energétique de Belfort, UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie de l'Université de Franche Comté 90000 Belfort (France), mai 2000.
- [31] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, "Robust output feedback control of a doubly fed induction machine", Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [32] Pena. R.S, Clare. J.C, Asher. G.M, "Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Applications to Variable Speed Wind-Energy Generation", IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 3, pp. 231-241, May 1996.
- [33] Pena. R.S, Clare. J. C, Asher. G. M, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, pp. 380-387, September. 1996.