



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar El-oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : commande Electriques

**Commande de génératrice asynchrones pour
l'utilisation de l'énergie éolienne-reliée au
réseau**

Réalisé par :

- ❖ Ben Khelifa Kamel
- ❖ Touil Abdelhamide

Dirigé par :

Dr. Guediri abdelkarim

Promotion 2018

Remerciement

Tout d'abord, je voudrais remercier le Directeur de cette lettre, **Dr. Guederi Abdel Karim**, pour sa confiance, ses conseils, ses encouragements et ses conseils, et j'espère que j'ai terminé. Je suis également reconnaissant pour le temps qu'il m'a donné, ses qualités éducatives et scientifiques, sa franchise et sa sympathie pour moi. J'ai beaucoup appris de lui et je le remercie pour tout cela.

Enfin, Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau .Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse .Merci du fond du cœur.

À mes amis qui m'ont aidé dans ce travail
Et à tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin à finaliser cette thèse et qui m'ont contribué dans ma formation.

Résumé:

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) pour la production de l'énergie éolienne.

Pour ce but, on a fait un état de l'art sur les systèmes éoliens puis un modèle de la génératrice en plus chaque composant de l'éolienne (Turbine, et cascade onduleur). Le rotor alimenté par l'onduleur qui commandé par la modulation de Largeur d'impulsion MLI.

Afin d'atteindre une puissance produite maximale, une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse par régulateurs linéaires PI. Les résultats extraits par la simulation Nnumérique Matlab/SIMULINK.

Mots clés:

System éolien - Modélisation - GADA- Commande Vectorielle - onduleur.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة نمذجة و تحكم للمولد الحثي ثنائي التغذية و تطبيقاته في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء.

من أجل ذلك قمنا بتقديم عموميات حول طاقة الرياح ثم إنشاء نموذج من مولد إضافة لمكونات المولد الهوائي: توربين و السلسلة المتكونة من المموج و المقوم. تغذية العضو الدوار كانت عن طريق المموج المتحكم فيه بتقنية تعديل طول النبضة .

بهدف توليد أكبر قدر ممكن من الطاقة , قمنا بإستعمال تقنية التحكم الشعاعي , و التي تسمح بدورها بتحكم في الطاقة الفعالة و الطاقة الارتكاسية عن طريق إستخدام المنظمات , كما قمنا بعرض و تحليل النتائج المتحصل عنها عن طريق المحاكاة الرقمية .

كلمات مفتاحية:

نظام توليد طاقة الرياح – مولد لا تزامني ثنائي التغذية – التحكم الشعاعي – مموج.

Sommaire

Sommaire

CHAPITRE I: Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques

I.1 Introduction.....	1
I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	1
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.4. principe de conversion de l'énergie éolienne	3
I.5.les différents types des turbines éoliennes.....	3
I.5.1Turbines éoliennes à axe verticale.....	4
I.5.2.Turbines éoliennes à axe horizontal	4
I.5.2.1Turbines éoliennes à axe horizontal lentes	5
I. 5.2.2Turbines éoliennes à axe horizontal rapides	5
I.6.Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans les éoliennes	6
I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	6
I.7.1Avantages.....	6
I.7.2 Inconvénients	7
I.8.Prédiction optimale de l'énergie.....	7
I.8.1Fonctionnant a vitesse fixe	7
I.8.2.Systèmes de génération éolienne à vitesse variable	8
I.9. Machine utilisées dans le systèmes éolienne	9
I.9.1 Machine asynchrone a double alimentation type "rotor bobine"	9
a. Structure a énergie rotorique dissipée	9
b. Structure de KRAMER	10
c. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.....	11
d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI	12
I.9.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil	13
I.9.3 Générateur asynchrone à double stator.....	13
I.9.4 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance:.....	14
I.9.5 Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"	14
I.9.6 Systèmes utilisant la machine synchrone	15
I.10. Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la DFAM. 16	
I.10.1. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur	16
I.10.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	18
I.10.3. Fonctionnement en génératrice	19
I.11 Conclusion	22

Sommaire

CHAPITRE II: Etude et modélisation du système de conversion éolienne	
II.1 Introduction	23
II.2 Description du montage la cascade	23
II.3 Modélisation de redresseur	24
II.4. Modélisation d'onduleur	26
II.4.1. Mise en équations d'onduleur	27
II.4.2. La commande MLI d'onduleur	28
II.4.3. Simulation d'onduleur à deux niveaux commandé par MLI	29
II.5 Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	31
II.5.1 Loi de Betz	31
II.5.2 Production d'énergie mécanique	32
II.6. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	34
II.6.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall"	34
II.6.2 Système d'orientation des pales « Pitch »	34
II.7 Modélisation du système éolien a vitesse variable base sur une MADA	35
II.7.1 Description du système éolien	35
II.7.2 Modélisation de la chaine de conversion éolienne	36
II.7.3 Modélisation de la vitesse du vent	36
II.7.4 Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal	37
II.8. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	37
II.8.1 Modélisation de la turbine	39
II.8.1.1 Modèle du multiplicateur	41
II.8.1.2 Equation dynamique de l'arbre :	41
II.8.2 Stratégie de commande de la turbine:	43
II.8.3 Maximisation de la puissance extraite:	44
II.8.3.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	44
II.9. Simulation la chaine de conversion	45
II.10 conculision	47
CHAPITRE III: Modélisation de la GADA	
III.1. Introduction	48
III.2. Hypothèses simplificatrices	48
III.3. Description de la Génératrice asynchrone à double alimentation	49
III.3.1. Constitution de la machine	49
III.3.2. Principe de fonctionnement de la MADA	50
III.3.3. Description des composants de la MADA	51
III.4. La double alimentation :	51
III.5. Modes de fonctionnement de la MADA	52

Sommaire

III.6 Avantages et inconvénients de la MADA.....	55
III.6.1 Avantages de la MADA	55
III.6.2 Inconvénients de la MADA.....	56
III.7 Application des machines asynchrones à double alimentation	56
III.7.1 Application moteur	56
III.7.2 Application génératrice	56
III.8.Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.....	57
III.8.1.Représentation du modèle	57
III.8.2. Equations générales de la GADA	57
III.8.2.1. Equations électriques :.....	58
III.8.2.2. Equations magnétique	59
III.8.2.3. Equations mécaniques	60
III.8.3. La transformation de Park	60
III.8.4 Choix du référentiel	61
III.8.4.1 Référentiel lié au stator.....	61
III.8.4.2 Référentiel lié au rotor.....	62
III.8.4.3 Référentiel lié au champ tournant	62
III.8.5 Application de la transformation de Park à la MADA.....	62
III.8.6 Expression du couple électromagnétique.....	65
III.8.7 Expression de la puissance active et réactive	65
III.9 Résultats de la Simulation.....	66
III.10 .Interprétation des résultats	69
II.11 conculision.....	70
CHAPITRE IV: Commande des puissance active et reactive de la GADA	
IV.1 Introduction.....	71
IV.2. LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA :.....	71
IV.2.1. Principe de la commande vectorielle	71
IV.2.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :.....	72
IV.2.3 Expressions des puissances active et réactive statoriques :	74
IV.2.4 Expressions des tensions rotoriques	75
IV.3.Contrôle indépendant des puissance active et réactive.....	76
IV.3.1 Commande directe :.....	76
IV.3.2 Commande indirecte	77
IV.3.2.1Commande en boucle ouvert [10].....	77
IV.3.2.2 Commande en boucle fermé :.....	78
IV.3.3 Dimensionnement Du Régulateur PI :	79
IV.4.Simulation de la commande	80

Sommaire

IV.4.1. Modèle de commande d'une GADA	80
IV.4.2. Résultats de la simulation	81
IV.4.3. Interprétation des résultats	82
IV.1 conclusion	83



Liste de figure

Liste de figure

Chapitre I

Figure I.1: Principaux organes du système de conversion éolienne.....	2
Figure I.2: principe de la conversion de l'énergie éolienne	3
Figure I.3: éolienne à axe verticale.....	4
Figure I.4: Éolienne à axe horizontal.....	4
Figure I.5: Turbine éolienne de pompage - Mauritanie ' lente'.....	5
Figure I.6: Turbine éolienne à horizontal 'rapide'.....	5
Figure I.7: Eolienne a vitesse fixe	7
Figure I.8: Schéma de l'alimentation de la MADA pour	8
une application génératrice.....	8
Figure I.9: Machine asynchrone a rotor bobine	9
Figure I.10: .MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée	10
Figure I.11 .Structure de KRAMER pour la MADA.....	11
Figure I.12 .Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.....	11
Figure I.13: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.....	12
Figure I.14: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau	13
Figure I.15 : Générateur asynchrone à double stator	14
Figure I.16: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire.....	14
d'un ensemble redresseur – onduleur	14
Figure I.17: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone	15
Figure I.18: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	15
Figure 1.19: Système éolien a base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.....	16
Figure I.20: Schéma d'un système utilisant une DFAM en moteur.....	17
alimenté par un seul convertisseur	17
Figure I.21: .Schéma d'un système utilisant une DFAM en moteur	18
alimenté par deux convertisseurs	18
Figure I.22. Schéma d'un système utilisant une DFAM en alternateur alimenté par un seul convertisseur	20

Chapitre II

Figure II.1: Le montage de cascade GADA et les convertisseurs MLI.....	23
Figure II.2: Schéma de pont de redresseur a IGBT.....	24
Figure II.3: Onduleur triphasé à deux niveaux.....	27
Figure II.4: Principe de la commande MLI	29
Figure II.6: Les allure de tension monophasée d'onduleur commandé par MLI	30

Liste de figure

Figure II.7: Les allure de tension triphasée d'onduleur commandé par MLI	30
Figure II.8: Tube de courant autour d'une éolienne	31
Figure II.9: Coefficient de puissance.....	32
Figure II.10: Coefficient de puissance pour différents types éoliennes	32
Figure II.11: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	33
Figure II.12: Flux d'air sur un profil de pale " Stall"	34
Figure II.13: Variation de l'angle de calage d'une pale	35
Figure II.14: Flux d'air sur un profil de pale " Stall "	35
Figure II.15: Système éolien a vitesse variable base sur une MADA	36
connectée au réseau.....	36
Figure II.16 Configuration d'une éolienne	36
Figure II.17: Système mécanique de l'éolienne	38
Figure II.18: Modèle mécanique simplifié de la turbine	39
Figure II.19: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction.....	41
de la vitesse relative λ	41
Figure II.20: Modèle d'une turbine éolienne	42
Figure II.21: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne	42
Figure II.22: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.....	43
Figure II.23: Stratégies de commande de la turbine	44
Figure. II.24: Schéma bloc de la maximisation de la puissance	45
extraite sans asservissement de la vitesse	45
Figure II.25: schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable avec l'estimation	46
Figure II.26: Le profil de vent appliqué.....	46
Figure II. 27: coefficient de puissance	46
Figure II.28: vitesse mécanique.	46
Figure II. 27: puissance et couple électrique produite	46

Chapitre III

Figure III.1: Structure du stator et du rotor à bagues.	48
Figure III.2 : Machine à induction à rotor bobiné.....	50
Figure III.3: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	52
Figure III.4: Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	53
Figure III.5: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.	53
Figure III.6: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	54
Figure III.7: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	56
Figure III.8 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	60

Liste de figure

Figure. III.9 Schéma bloqué de la modèle de GADA	66
Figure. III.10 Courbe du courant statorique	66
Figure. III.11 Courbe du courant rotorique.....	67
Figure. III.12 Courbe de la tension statorique	67
Figure. III.13 zoom de Courbe de la tension statorique	68
Figure. III.14 Courbe de la tension rotorique	68
Figure. III.15 zoom de Courbe de la tension rotorique	68
Figure. III.16 Courbe de la puissance active statorique	68
Figure. III.17 Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom.....	69
Figure. III.18 Courbe de la couple.....	69.

Chapitre IV

Figure. IV.1: Principe de la commande vectorielle	72
Figure IV.2 : Orientation du flux statorique.....	73
Figure IV.3 : Schéma bloc du système à réguler.....	76
Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande directe.....	77
Figure IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.	78
Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.	79
Figure IV.7 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	79
Figure.IV.8: Schéma de simulation de la commande d'une GADA	81
Figure. IV.9: La puissance active et réactive statorique avec ses références.....	82
Figure.IV.10: Les deux composantes du courant rotorique.	83
Figure.IV.11: Couple électromagnétique C_e (N.m)	83

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

GADA: Générateur Asynchrone à Double Alimentation

MADA: Machine asynchrone à double alimentation.

MAS : Machine Asynchrone

SCE : Système de conversion éolien

MCC : Machine à courant continue.

MLI :Modulation de largeur d'impulsions.

MPPT: Max power point tracking

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

$P_{a\grave{e}r}$: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

β :Angle de calage des pales de la turbine

Ω_S :La vitesse de synchronisme

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine

$\Omega_{turbine\ estim\acute{e}}$: Vitesse mécanique estimée de la turbine

Ω_{mec} : Vitesse mécanique

V : Vitesse du vent

$v_{estim\acute{e}}$: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

LISTE DES SYMBOLES

C_{are} [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

$C_{are-estimée}$ [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_{coord} :Angle coordonné

ω : Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)

ω_s, ω_r :Pulsation électrique statorique et rotorique

ω_m : La pulsation mécanique de la machine

S_s, S_r :La puissance apparente au stator et rotor

Q_s, Q_r :La puissance ractive au stator et rotor

g :glissement

V [V] :Tension

I [A]:Courant

ϕ [Wb]:Flux

M [H]:Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)

I_s , [H]:Inductance propre de chaque enroulement du stator

I_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

LISTE DES SYMBOLES

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

R_f : Résistance du filtre

L_f : Inductance du filtre

$\varphi_{ds}\varphi_{qs}$: Flux statorique selon l'axe d, q

$\varphi_{dr}\varphi_{qr}$: Flux rotorique selon l'axe d, q

$\varphi_{s\alpha}\varphi_{s\beta}$: Flux statorique sur l'axe $\alpha \beta$

$\varphi_{r\alpha}\varphi_{r\beta}$: flux rotorique sur l'axe $\alpha \beta$

$V_{ds}V_{qs}$: Tension statorique selon l'axe d, q

$V_{dr}V_{qr}$: Tension rotorique selon l'axe d, q

$I_{ds}I_{qs}$: Courant statorique selon l'axe d, q

$I_{dr}I_{qr}$: Courant rotorique selon l'axe d, q

$I_{s\alpha}I_{s\beta}$: courant statorique sur l'axe $\alpha \beta$

P_m : Puissance mécanique

S : Opérateur dérivé de Laplace

P : Nombre de paire de pole de la MADA

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

$Réf$: Indice indiquant la référence (la consigne)

INTRODUCTION GENERALE

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifie suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air. Par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement ou de transport.

Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité.

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une génératrice asynchrones à double alimentation (GADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT (maximum power point tracking)

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une GADA qui peut être introduite dans un système éolien. On a choisi un type de commande, l'une classique (commande vectorielle), La structure de notre mémoire est donnée comme suit

Dans le **premier chapitre** nous Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques.

Introduction générale

Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, Ensuite, les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation seront étudiées.

Le second chapitre est dédié à l'étude des éléments essentielle de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (voilure) et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible sont développés modélisation et commande un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Dans **Le troisième chapitre** nous présentons en premier lieu la topologie et les configurations de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur (hypo et hyper-synchrone). Ensuite une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Sa mise en équation permettra de simuler son modèle, en l'alimentant par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites niveau du stator et l'autre au niveau du rotor qui est entraînée à une vitesse fixe.

Le quatrième chapitre, sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe (vitesse mécanique constante) et variable (avec turbine). Nous présentons le stator de la GADA et alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans le seconde lieu nous présentons le système complet constitué de : la turbine et la génératrice asynchrone double alimentation et convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

I.1 Introduction

La recherche dans le domaine des énergies renouvelables est en plein développement depuis quelques années partout à travers le monde, que ce soit l'énergie marémotrice, ou l'énergie éolienne. De par son caractère pseudo aléatoire, l'énergie éolienne pose beaucoup de défis afin d'avoir une production de puissance électrique constante, et un facteur de puissance aussi proche de l'unité que possible. Deux approches sont possibles : un entraînement à vitesse constante et un entraînement à vitesse variable. La production d'énergie électrique à vitesse fixe est peu souhaitable, car le comportement dynamique en cas de défaut est potentiellement dangereux.

Le raccordement des générateurs éoliens au réseau existant pose plusieurs problèmes. Car la modélisation des phénomènes mécaniques entrant en jeu dans la puissance transmise au rotor du moteur d'une éolienne a permis de conclure que le couple électromagnétique du moteur n'était pas constant mais périodique à cause de l'effet d'ombre de la tour. La conséquence du raccordement au réseau électrique, les oscillations sont plus importantes dans le cas d'un réseau faible. De plus l'utilisation de machines asynchrones (MAS) comme générateur entraîne une dégradation du facteur de puissance, à cause de la nécessité de fournir de la puissance réactive à la machine.

I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J. C environ [1].

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe,

les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000.

L'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [2].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde .

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energy Council (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [3].

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Le SCE (Système de Conversion Eolien), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. I.1.).

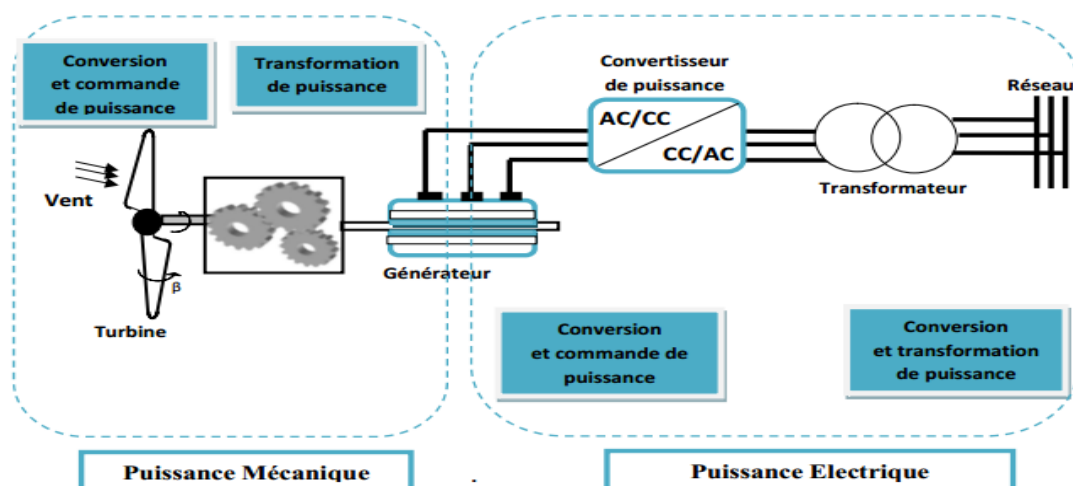


Figure 1.1.: Principaux organes du système de conversion éolienne

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

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 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

I.4. principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent .

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

I.5.les différents types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale

I.5.1 Turbines éoliennes à axe verticale

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue.

Elles présentent les avantages et les inconvénients suivants :

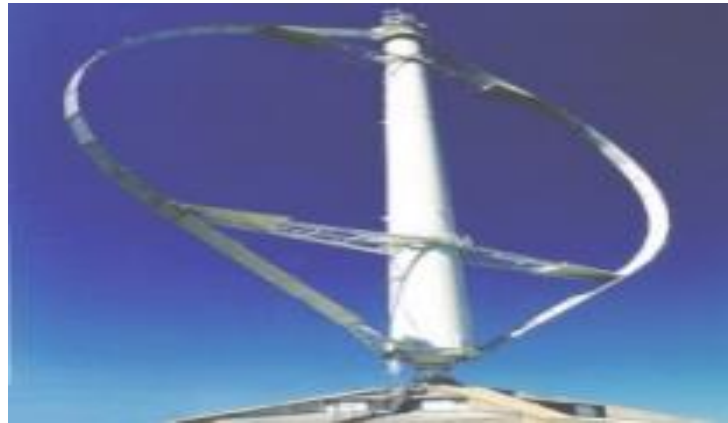


Figure 1.3: éolienne à axe verticale

I.5.2. Turbines éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation [4].



Figure 1.4: Éolienne à axe horizontal

I.5.2.1 Turbines éoliennes à axe horizontal lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [5].



Figure 1.5.: Turbine éolienne de pompage - Mauritanie 'lente'

I. 5.2.2 Turbines éoliennes à axe horizontal rapides

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



Figure 1.6.: Turbine éolienne à axe horizontal 'rapide'

Notre étude se focalise sur les éoliennes rapides ou nous essayerons de donner une description du modèle global.

I.6. Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans les éoliennes

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. 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 le générateur asynchrone est plus courant et économique

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir a condition d'éviter l'impact crée par ses inconvénients cites ci-après.

I.7.1 Avantages [8-7]

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- Energie non polluante ;
- – L'énergie éolienne n'est pas une énergie a risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et se démontent très facilement ;
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond a la période de l'année ou la demande en électricité est plus forte ;

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.

Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ;

- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà .

I.7.2 Inconvénients [9-10].

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées;
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés .

I.8. Prédiction optimale de l'énergie

On peut classer les éoliennes en deux catégories suivant le mode de fonctionnement : des éoliennes fonctionnant à vitesse fixe et celles fonctionnant à vitesse variable.

I.8.1 Fonctionnant à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice utilisée (Figure 1.7) [11].

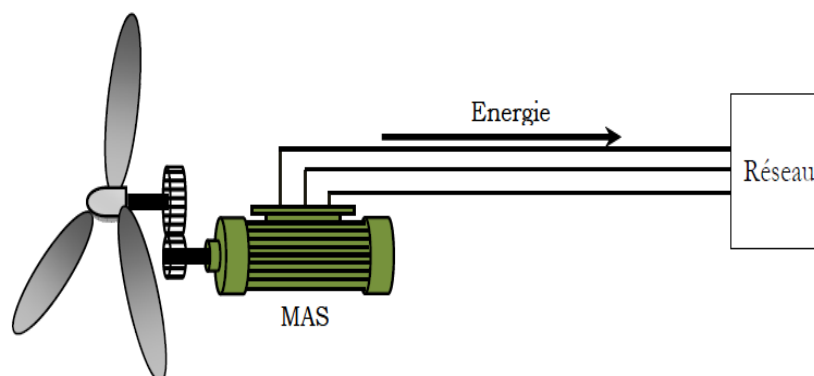


Figure 1.7: Eolienne à vitesse fixe

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et fournit la puissance électrique au réseau. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables [12].

I.8.2. Systèmes de génération éolienne à vitesse variable

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Dans les systèmes éoliens de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme dont l'objectif d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20-30 % de toute la puissance du système, et qui permet de minimiser les pertes et réduire le coût de celui-ci [13].

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA, est représentée par la figure (1.8.) Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [14].

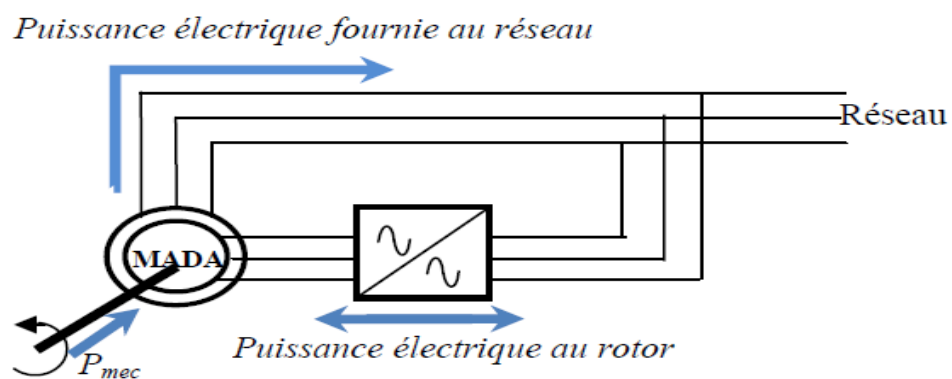


Figure 1.8: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance ;

- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité [15].

I.9. Machine utilisées dans le systèmes éolienne

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors il doit tourner à vitesse fixe [15].

Si la vitesse est très variable, le générateur est lié indirectement au réseau à travers un convertisseur de puissance. Ce type de chaîne permet d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

I.9.1 Machine asynchrone a double alimentation type "rotor bobine"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [16].

Le stator est directement relié au réseau et les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure 1.3).

La MADA a rotor bobine présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. 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 utilisent ce type de machines.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage [17].

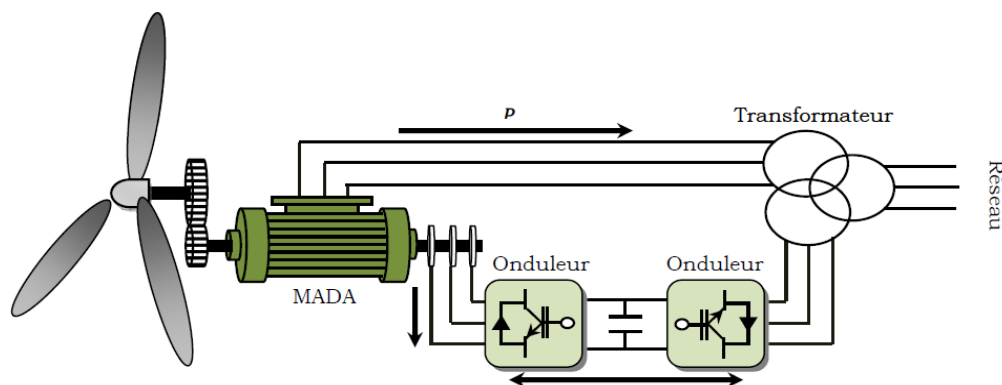


Figure 1.9: Machine asynchrone a rotor bobine

a. Structure à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (1.10). 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 [8].

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 de la machine.

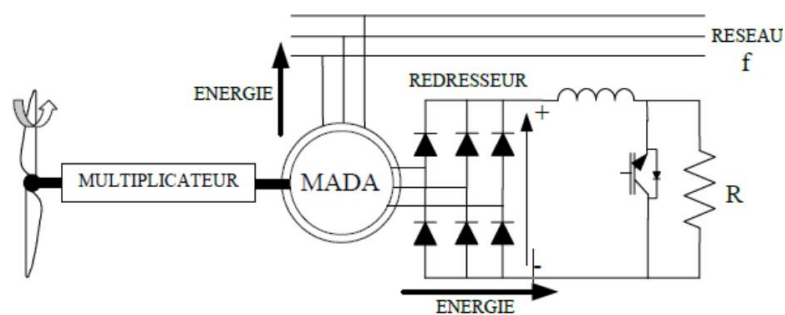


Figure 1.10: MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée

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

De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [9].

b. Structure de KRAMER

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (voir la figure (1.11)). 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].

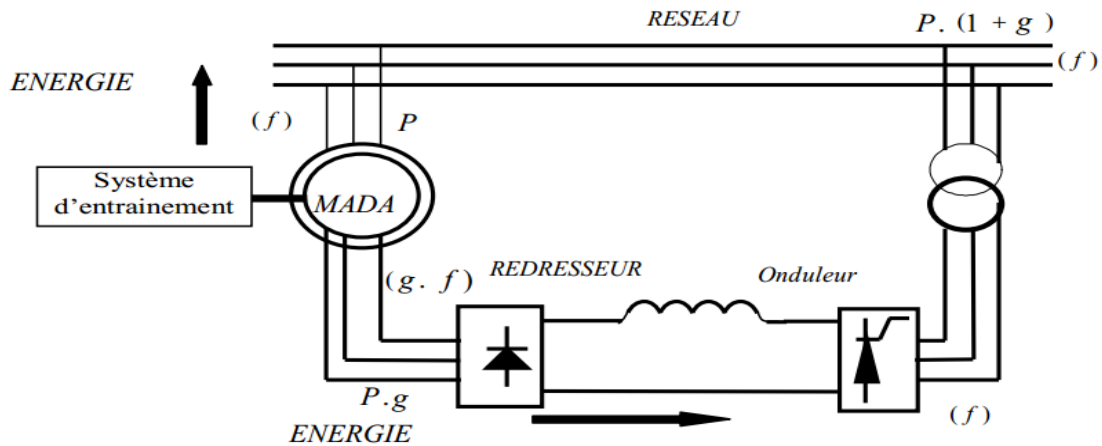


Figure 1-11 .Structure de KRAMER pour la MADA

c. 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 (voir la figure (1.12)), 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 [19].

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.

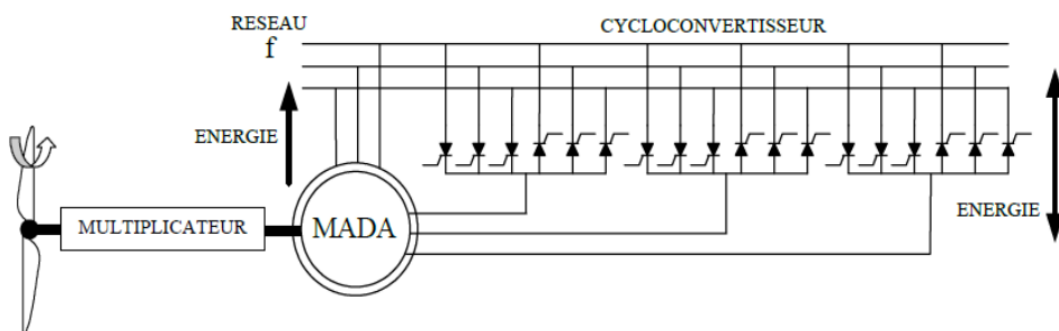


Figure 1-12 .Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur.

Dans cette configuration, le principe de SCHERBIUS est reproduit à l'aide d'un cyclo convertisseur. 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 [4].

d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante (Figure 1.13) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [5].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [5].

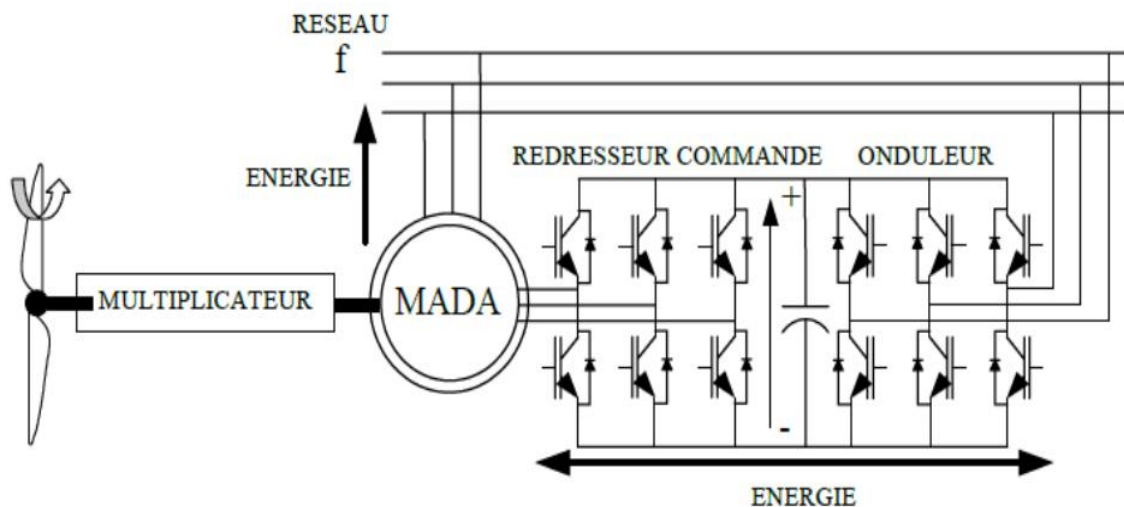


Figure 1.13: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.

C'est pour cette raison que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable ;
- Le convertisseur de puissance de petite dimension ;
- Le niveau bas de fluctuations mécaniques ;
- La possibilité de fonctionnement en hypo et hypersynchronisme, ce qui permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau ;

- Le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

I.9.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machines est plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. La simplicité de la configuration de ce système permet de limiter la maintenance de la machine. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [7].

L'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques (Figure 1.14), permet de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie.

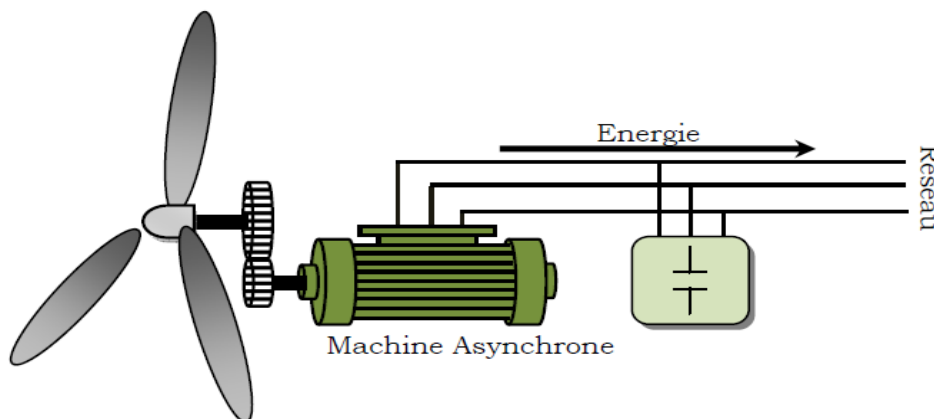


Figure 1.14: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

I.9.3 Générateur asynchrone à double stator

cas deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important. [10]

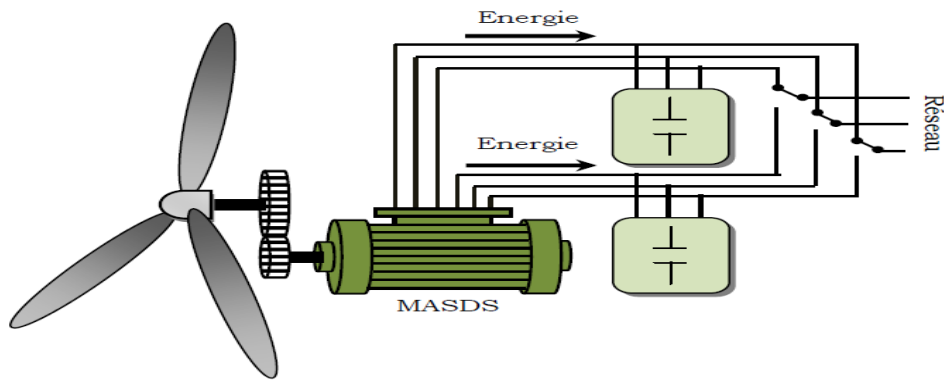


Figure I.15 : Générateur asynchrone à double stator

I.9.4 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure. (I.16). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [20].

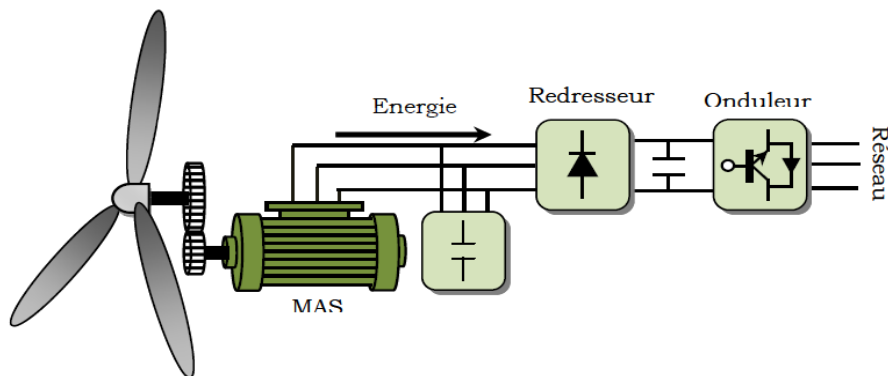


Figure I.16: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.9.5 Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance.

Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure. I.17) .

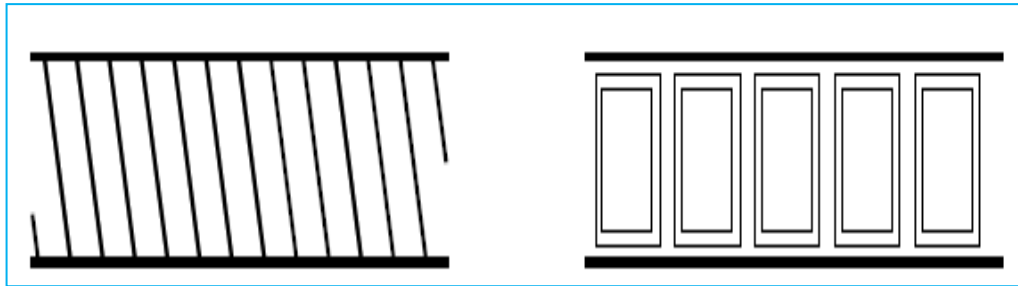


Figure I.17: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure. I.18)[21].

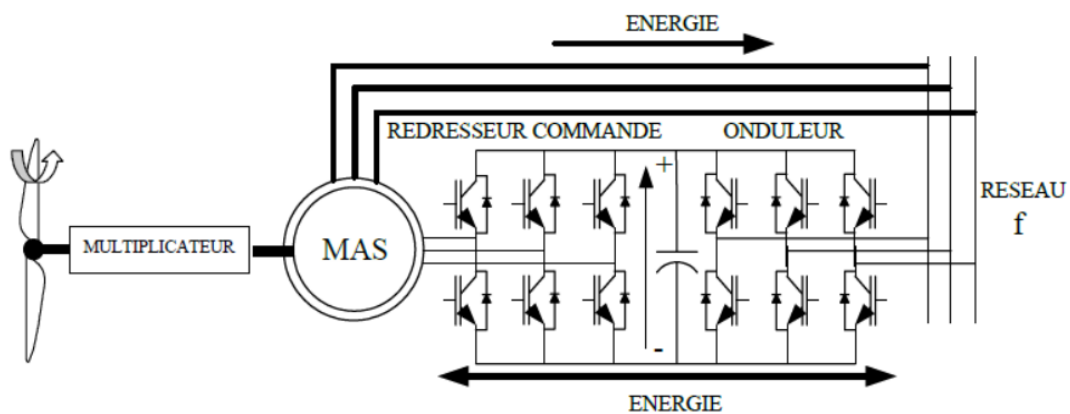


Figure I.18: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I.9.6 Systèmes utilisant la machine synchrone

Ces systèmes sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple-capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi, les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau.

Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (Figure 1.19).

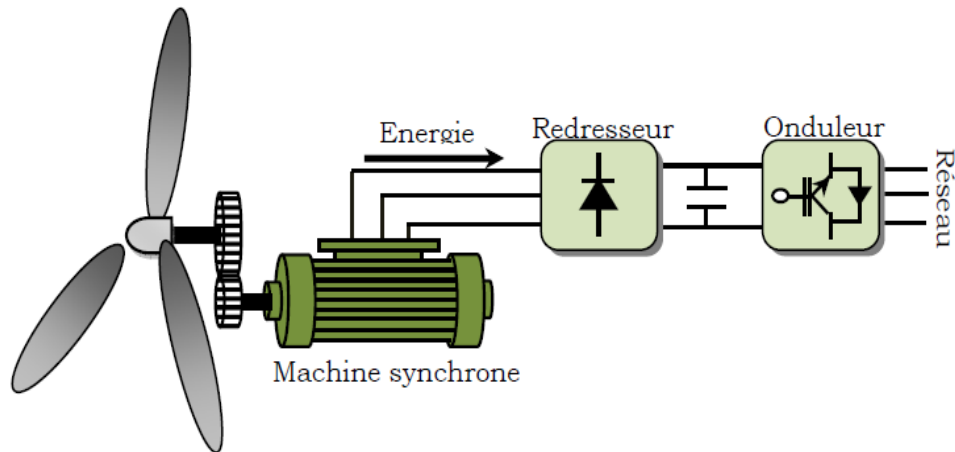


Figure 1.19: Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées.

Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'apéro-turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance[22].

I.10. Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la DFIM

Dans cette partie, nous allons présenter trois configurations du mode de fonctionnement de la DFAM. Pour chaque configuration nous allons exposer les travaux de recherches des auteurs concentrés sur le type d'alimentation et la stratégie de commande utilisée.

I.10.1. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cycle convertisseur ou un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure (I.20) présente le schéma de principe de cette catégorie de DFIM.

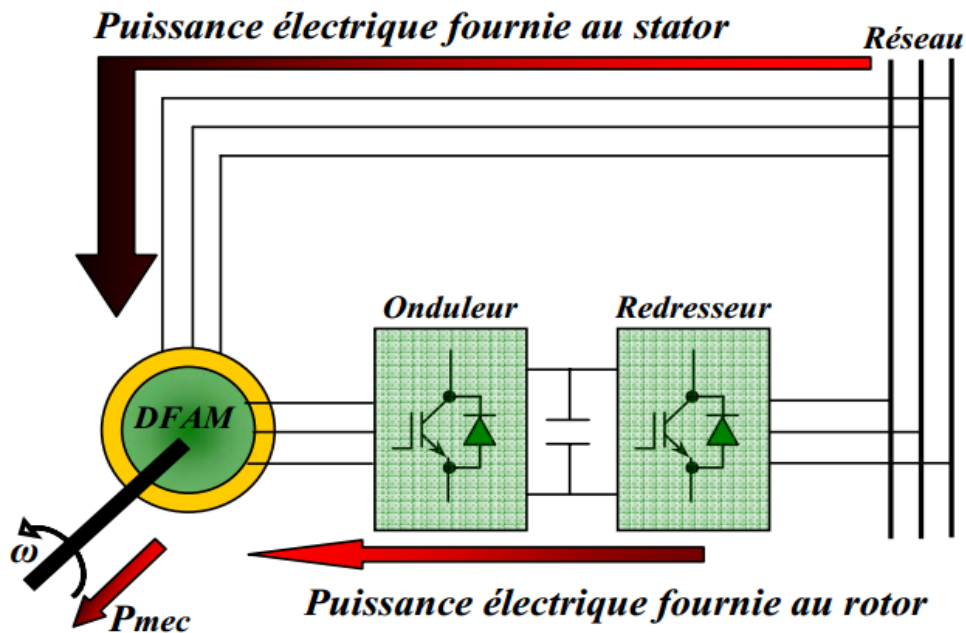


Figure I.20: Schéma d'un système utilisant une DFAM en moteur alimenté par un seul convertisseur

HELLER présente la DFIM comme étant la solution du futur pour les industries de pompage. Il évalue la stabilité de la DFIM à l'aide de la méthode des petites variations autour d'un point de fonctionnement. Cette approche lui permet de tracer le lieu des pôles du système. [23].

Le mode de fonctionnement retenu est un fonctionnement moteur (figure I.14) dont le stator est connecté au réseau et le rotor relié à un onduleur dont le contrôle est assuré par l'orientation du flux statorique. Il présente ensuite des résultats expérimentaux réalisés avec une machine de 33 kW.

MOREL assure que le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner la puissance du convertisseur utilisé au rotor à 20% de la puissance mécanique maximale. Il effectue un contrôle du type champ orienté. Afin d'obtenir un moteur ou un générateur à vitesse variable, il propose de passer par trois étapes : mode 1, démarrer le moteur avec les enroulements statoriques en court-circuit ; mode 2, connecter le stator au réseau ; mode 3, alimenter la DFIM à tension et fréquence fixes au stator et par un convertisseur au rotor. Le fonctionnement du système durant les différents modes est démontré avec validation par les résultats expérimentaux. [24].

HOPFENSBERGER propose l'étude d'une DFIM dans un fonctionnement en mode moteur et vise des applications nécessitant une variation de la vitesse de rotation. Dans le

cas de l'absence du capteur de position, il propose deux façons pour déterminer l'angle de rotation du repère tournant (orienté suivant le flux au stator) : une première basée sur la mesure et l'expression des courants statoriques dans le repère tournant, la seconde nécessite la mesure des puissances active et réactive statoriques [19].

Son étude est validée par des résultats expérimentaux.

l'auteur reprend la même étude mais en appliquant, cette fois-ci, la théorie du champ orienté au flux rotorique commun. Des nouveaux résultats expérimentaux sont présentés [25].

I.10.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure (I. 12);
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun;
- Deux cycloconvertisseurs.

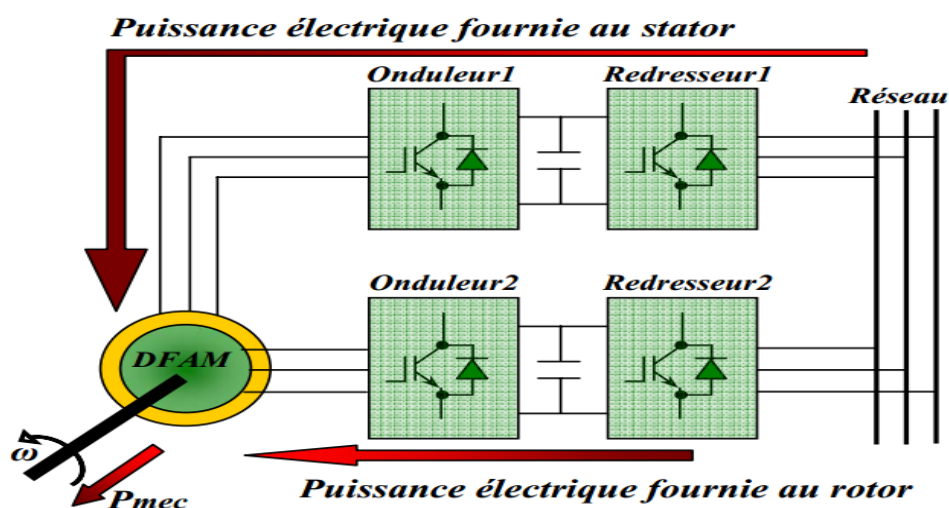


Figure I.21.: Schéma d'un système utilisant une DFAM en moteur alimenté par deux convertisseurs

l'étude que présente concerne le cas où le rotor et le stator sont connectés à deux onduleurs indépendants (Figure I.21). Il préfère la théorie du champ orienté appliqué au flux statorique et impose la vitesse, le flux, le facteur de puissance et le glissement [26].

l'auteur part du principe que la DFIM offre quatre degrés de liberté : le flux, le couple, la fréquence et le facteur de puissance et procède à un contrôle indirect du flux d'entrefer en introduisant un courant magnétisant. La régulation des courants est effectuée par la suite. Il présente par la suite les résultats expérimentaux de cette étude [27].

Il essaie d'élaborer de nouvelles lois de commande linéaire et non linéaire à partir d'un modèle d'état basé tout d'abord sur les courants puis sur les flux [20].

L'alimentation de la DFIM est assurée par un onduleur à MLI. En analysant le comportement de la DFIM en régime permanent, il parvient à déterminer les couplages mis en jeu dans la modélisation choisie. Il adopte une loi de répartition de puissance et impose une fréquence minimale de fonctionnement. Pour la commande linéaire, il conclue que la modélisation par flux présente de meilleurs résultats. Quant au cas non linéaire, il opte pour la commande par modes glissants. En conclusion, il affirme que cette stratégie donne de très bons résultats vis-à-vis de la commande linéaire.

MASMOUDI dans son article, considère une DFIM avec deux alimentations variables et indépendantes : l'une au stator, l'autre au rotor. Il centre son intérêt aux échanges énergétiques entre les enroulements rotoriques et statoriques dans l'entrefer. Il en fait un bilan pour les fonctionnements en moteur, en générateur ou en frein. L'auteur propose enfin une étude de la stabilité en analysant les valeurs propres de la matrice dynamique en fonction des variations des paramètres électriques [28].

DRID présente une nouvelle approche pour contrôler une DFIM alimentée par deux onduleurs de tension au stator comme au rotor. Son approche est basée sur un contrôle à double orientation du flux statorique et rotorique. L'orthogonalité entre les deux flux, qui doit être impérativement observée, conduit à une commande linéaire et découplée de la machine avec une optimisation du couple. Par la suite l'auteur présente les résultats de simulations de son étude [29].

propose d'utiliser une configuration de la DFIM pour un fonctionnement moteur dans des applications telles que la traction où la "première transformation de l'acier". Les enroulements statoriques et rotoriques de la DFIM sont alimentés par deux onduleurs indépendants. Il utilise un contrôle vectoriel à orientation de flux. Dans un premier temps, il présente des résultats expérimentaux avec un contrôle basé sur un repère tournant lié au flux statorique; dans un deuxième temps, le contrôle est basé sur une orientation du repère suivant le flux d'entrefer[30].

I.10.3. Fonctionnement en génératrice

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la figure (I.22). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixes même lors d'une fluctuation de la vitesse. Dans ce cas la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et

moins de 30% de la puissance totale passe par le convertisseur de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux, [20-22].

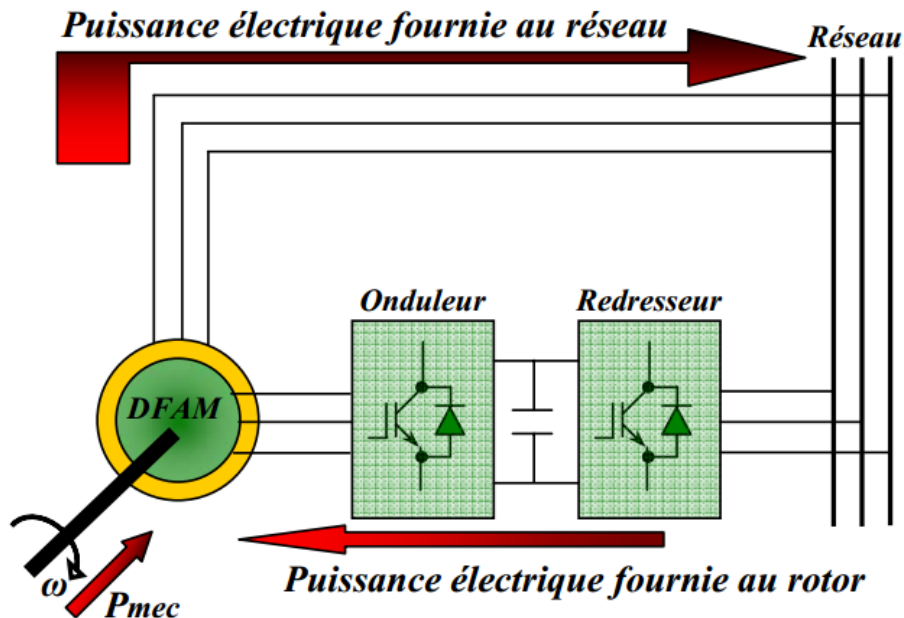


Figure I.22. Schéma d'un système utilisant une DFAM en alternateur alimenté par un seul convertisseur

PERESADA place son étude dans le contexte d'un fonctionnement en mode générateur de la DFAM. Les enroulements statoriques sont reliés au réseau, le rotor est connecté à un onduleur de tension. Il propose de faire une régulation "asymptotique" des puissances active et réactive statoriques par le biais d'une régulation des courants actif et magnétisant statoriques. Il se place dans un repère tournant lié à la tension statorique. Pour rester dans le cas le plus général possible, il précise qu'il ne négligera pas les termes résistifs. Il démontre à travers des tests expérimentaux et des simulations que le système est robuste face à des variations paramétriques et face à une erreur de la mesure de la position mécanique du rotor. [2],

présente l'étude de la DFIM en fonctionnant génératrice associée à une éolienne. Les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé, une association redresseur MLI-onduleur MLI au rotor. L'avantage d'une telle structure est qu'elle permet le réglage indépendant des puissances fournies par l'alimentation et le fonctionnement dans une grande plage de vitesse [21-22-23].

HOFMANN propose une application éolienne de la DFIM en fonctionnement générateur dont les enroulements statoriques sont connectés au réseau tandis que les enroulements rotoriques sont reliés à un onduleur. Il présente une courbe de couple

mécanique en fonction de la vitesse. Il part de l'hypothèse que sa machine est pilotée par un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. Il analyse par les simulations des variations des courants, des pertes et des flux. Il démontre que son contrôle, qui doit minimiser les pertes, est performant [19].

étudie le fonctionnement de la DFIM en génératrice entraînée par une turbine hydraulique et en moteur, entraînant une pompe. Il présente une étude de la stabilité de la machine ainsi que le principe de commande en courant des deux onduleurs. L'auteur conclut que la DFIM en génératrice possède des pôles à faible amortissement avec une pulsation propre proche de la fréquence du réseau, toutefois le choix d'une faible bande passante pour les boucles de courant élimine ce problème. Il montre qu'avec la DFIM en génératrice, il est possible de travailler dans les quatre quadrants avec une commande découplée de la vitesse et des puissances. Des résultats expérimentaux sont présentés [26],

l'auteur présente les différentes structures adoptées pour la génération de l'énergie électrique avec un entraînement éolien ou hydraulique. Cette comparaison l'amène à opter pour la DFIM comme solution optimale [27].

étudie une DFIM où le stator est connecté au réseau et le rotor relié à un onduleur. Il établit une commande du type vectorielle avec un référentiel tournant lié au flux statorique. L'étude porte sur la comparaison entre un correcteur PI classique. Ces correcteurs visent les régulations du flux statorique et du couple. Les réponses temporelles données par les deux types de correcteurs sont ensuite comparées. Les critères sont la recherche de la puissance active optimale, l'adaptation face à une variation de vitesse brutale et la robustesse face aux variations des paramètres [28].

Le travail effectué le long de cette thèse est consacré à la commande de la DFIM en fonctionnement génératrice non autonome alimentée par un onduleur de tension au rotor, alors que le stator est directement connecté au réseau. Le facteur de puissance est contrôlé de sorte qu'il soit unitaire en régime permanent du côté statorique. En premier lieu la stratégie de commande par orientation du flux statorique sera appliquée à la DFIM.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la DFIM sous toutes ses configurations et les performances qui lui permettent d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), ou dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Au cours de notre recherche bibliographique nous avons balayé un grand nombre d'études et de travaux effectués sur la DFIM. Ces études portent principalement sur son fonctionnement en génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, ou sur son fonctionnement en moteur avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle.

II.1 Introduction

Avant la naissance de l'électronique de puissance, la variation de la vitesse de la machine asynchrone se faisait alors par action sur le glissement, au moyen d'un rhéostat mais cette utilisation pose de pertes joule considérables qui affectent le rendement. De nos jours, pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie. Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation mais notre intérêt est la structure de "Scherbius" avec des convertisseurs à IGBT commandés par la modulation de largeur d'impulsions MLI.

D'autre part, on va se consacrer à la modélisation de la turbine éolienne, on présentera le modèle dynamique rassemblant tous ses paramètres et nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine et sa simulation associée à la génératrice.

II.2 Description du montage la cascade

Cette structure s'appelle structure de Scherbius comme elle comporte deux convertisseurs à transistors IGBT qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture par MLI.

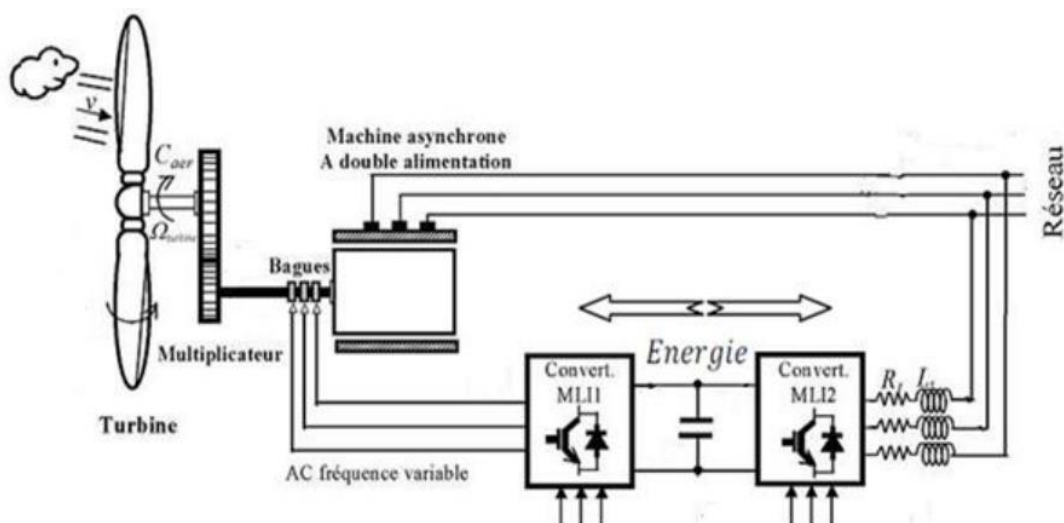


Figure II.1: Le montage de cascade GADA et les convertisseurs MLI.

Plusieurs études montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien fonctionnant à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo-synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme [31].

De plus, le fonctionnement hyper-synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. On trouve ainsi la puissance totale produite alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

II.3 Modélisation de redresseur

Les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Cette possibilité de commande nous permet un contrôle total du convertisseur. Les redresseurs à deux niveaux sont, de par la structure, réversibles, ils peuvent fonctionner en onduleur et transférer ainsi l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternative ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse [32].

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors antiparallèles avec des diodes ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée V_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs. La figure ci-dessous illustre le schéma d'un redresseur triphasé à IGBT.

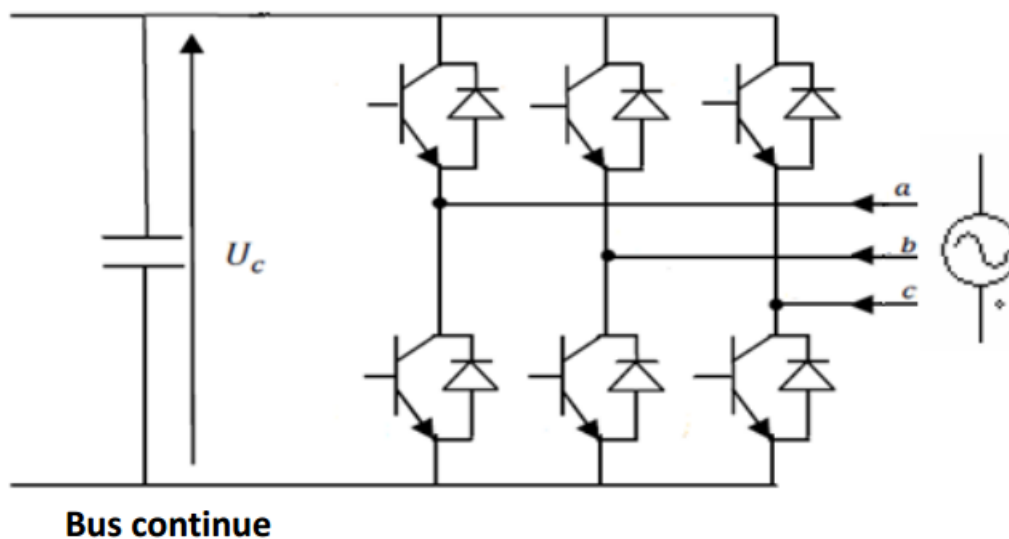


Figure II.2: Schéma de pont de redresseur a IGBT.

On peut faciliter la modélisation en appliquant les hypothèses suivantes :

- Interrupteurs parfaits : la commutation des interrupteurs est instantanée; la résistance nulle à l'état passant et infinie à l'état bloqué.
- Sources parfaites : la tension continue, nous donnent le dipôle, est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

Chapitre 2: Etude et modélisation du système de conversion éolienne

Pour chaque bras il y a deux états indépendants ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0)$; $i = \{a, b, c\}$

Le tableau suivant présente les huit états possibles des interrupteurs d'un pont de redresseur :

S_a	S_b	S_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	0	0	Vdc	0	-Vdc
1	1	0	0	Vdc	-Vdc
0	1	0	-Vdc	0	0
0	1	1	-Vdc	-Vdc	Vdc
0	0	1	0	-Vdc	Vdc
1	0	1	Vdc	0	0
0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0

Tableau .II.1: Les huit états possibles des interrupteurs.

On peut écrire les tensions d'entre du redresseur d'une manière générale dans le référentiel triphasé (abc) comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ V_{ca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Et on a présente la relation entre les tensions simples et composées :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= (S_a - S_b)V_{dc} \\ V_{bc} &= (S_b - S_c)V_{dc} \\ V_{ca} &= (S_c - S_a)V_{dc} \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Où les tensions simples en fonction des interrupteurs :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3}V_{dc} \\ V_b &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3}V_{dc} \\ V_c &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3}V_{dc} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

À la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} Vdc \quad (\text{II. 4})$$

Le courant redressé dans bus continu(I_{dc}) par rapport aux courants alternatifs est définie par l'équation suivant :

$$I_{dc} = [Sa \quad Sb \quad Sc] \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Et on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$I_{dc} = I_c + I_{ch} \quad (\text{II. 6})$$

II.4. Modélisation d'onduleur

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion MLI est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continue en une alimentation de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. La transmise reste déterminée par les caractéristique propres de la machine [33].

Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables. On applique la tension redressé V_{dc} à l'onduleur.

La structure d'onduleur triphasé à deux niveaux reste la même comme le cas de redresseur. Le schéma est illustré par la figure II.3 est constitué comme on a déjà dit de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes(à l'ouverture et à la fermeture). On préfère l'utilisation de ponts a IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions MLI.

Pour simplifier l'étude supposons que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, supposés idéalisés
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

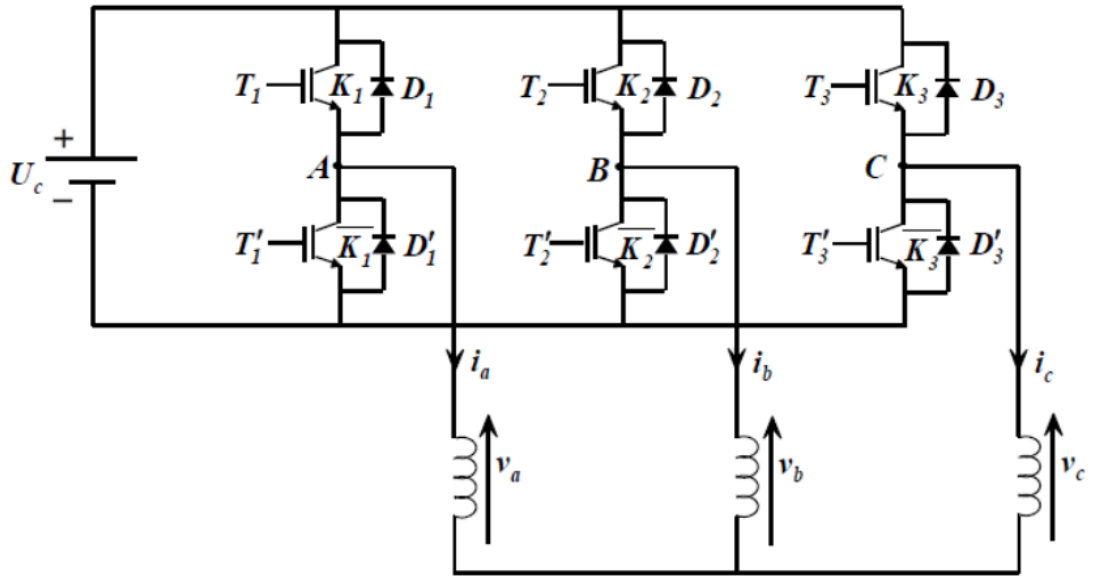


Figure II.3: Onduleur triphasé à deux niveaux.

II.4.1. Mise en équations d'onduleur

On a les tensions composées :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrées de l'onduleur (tensions continues) Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II. 8})$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} Sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives) ;

V_{no} Est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Les V_{an} , V_{bn} et V_{cn} forment un système triphasé équilibre découle la relation :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II. 9})$$

La résolution des équations (II.8) et (II.9) nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II. 10})$$

En remplaçant (II.10) dans (II.8) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif :

$$[VAc] = [T][VDC] \quad (\text{II. 12})$$

Tel que :

$$[VAc] = [Van \ Vbn \ Vcn]^T \quad (\text{II. 13})$$

$$[VDC] = [Vao \ Vbo \ Vco]^T$$

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

II.4.2. La commande MLI d'onduleur

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire à haute fréquence, que s'appelle porteuse à un signal sinusoïdal de référence à basse fréquence.

La commande MLI présente l'avantage d'une fréquence constante de commutation qui est fixée par la fréquence de l'onde porteuse. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- L'indice de modulation « m » est le rapport entre la fréquence de porteuse sur la fréquence de référence : $m = f_p / f_0$ est permet de varier la fréquence de la tension de l'alimentation ;
- Coefficient de réglage en tension « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence $r = V_r / V_p$;

Le schéma de principe est donné par la figure (II.4) :

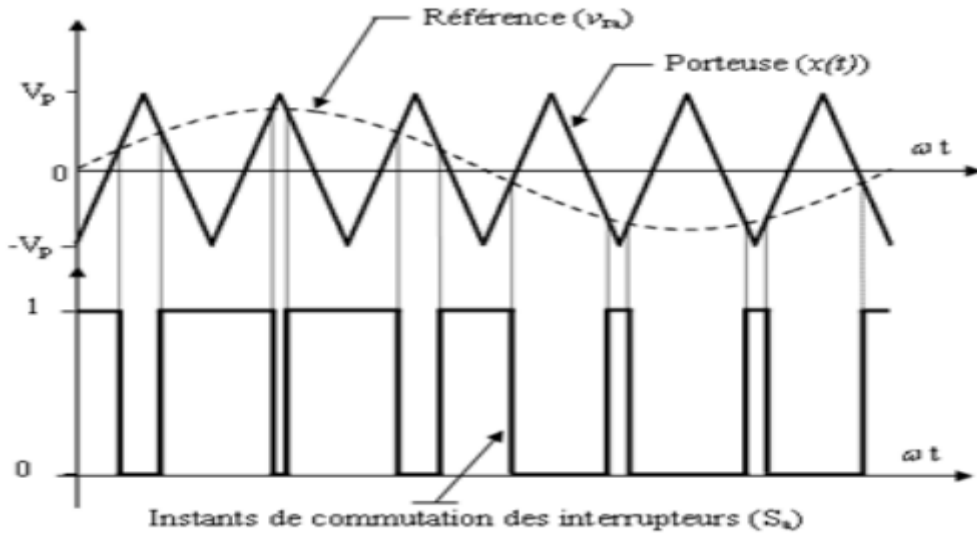


Figure II.4: Principe de la commande MLI.

On définit l'équation de la porteuse :

$$\begin{cases} V_p \left(4 \frac{t}{T_p} - 1 \right) & \text{Si } t \in \left[0 \quad \frac{T_p}{2} \right] \\ V_p \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \text{Si } t \in \left[\frac{T_p}{2} \quad T_p \right] \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

Les tensions de référence de l'onduleur de tension triphasée permettent de générer un système de tensions triphasées équilibrées directes :

$$\begin{cases} V_{ra} = V_r \sin 2\pi f t \\ V_{rb} = V_r \sin \left(2\pi f - \frac{2\pi}{3} \right) t \\ V_{rc} = V_r \sin \left(2\pi f + \frac{2\pi}{3} \right) t \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{Si } V_{rabc} \geq V_p \\ 0 & \text{Si } V_{rabc} < V_p \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

II.4.3. Simulation d'onduleur à deux niveaux commandé par MLI

La figure II.5 représente le schéma fonctionnel de la commande MLI sinus triangle à deux niveaux .

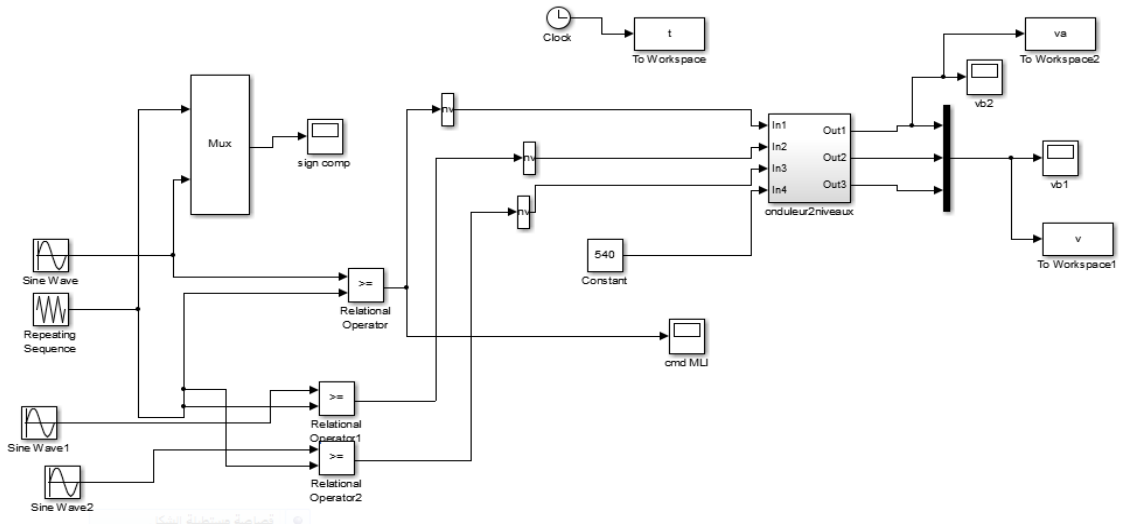


Figure II.5: Modèle de l'onduleur commandé par MLI avec la transformation de Park

La figure II.6 montre le résultat de la simulation pour $r = 1$ et $m = 21$ avec une tension d'entrées triphasées sinusoïdales de fréquence 50 Hz et d'amplitude $12 \cdot \sqrt{2}$ et $V_{dc} = 540$ V.

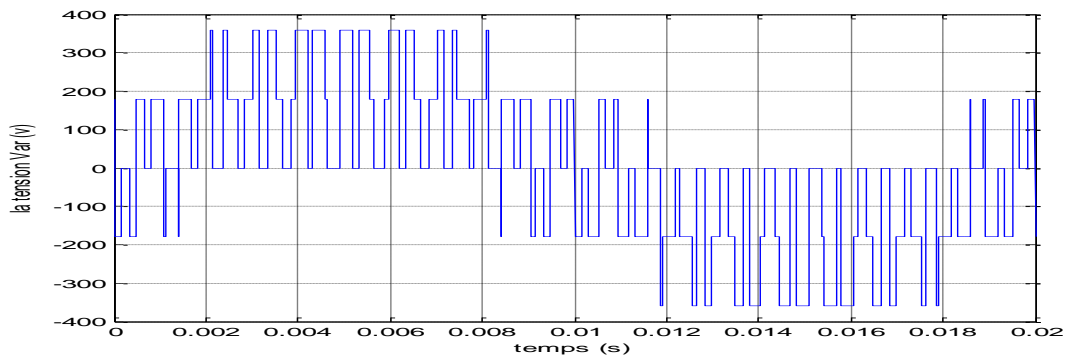


Figure II.6: Les allures de tension monophasée d'onduleur commandé par MLI

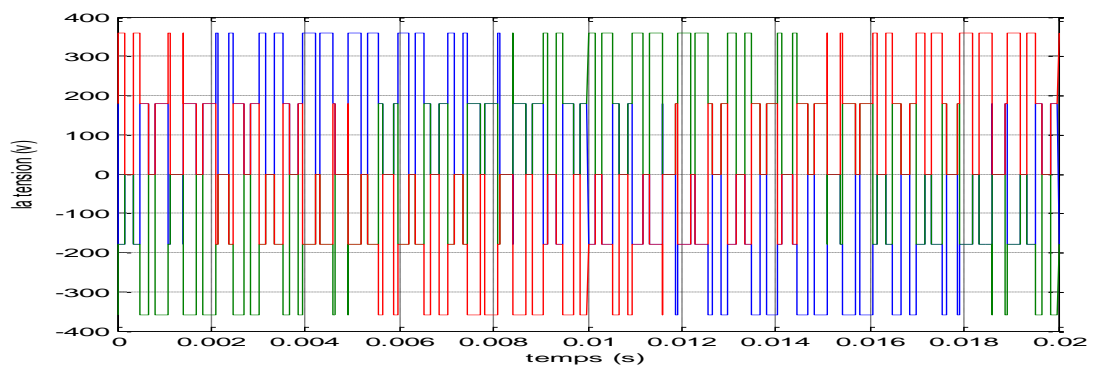


Figure II.7: Les allures de tension triphasée d'onduleur commandé par MLI

II.5 Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

II.5.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.7) 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:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.18})$$

La puissance $P_{a\acute{e}r}$ 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) :

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.19})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.19):

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.20})$$

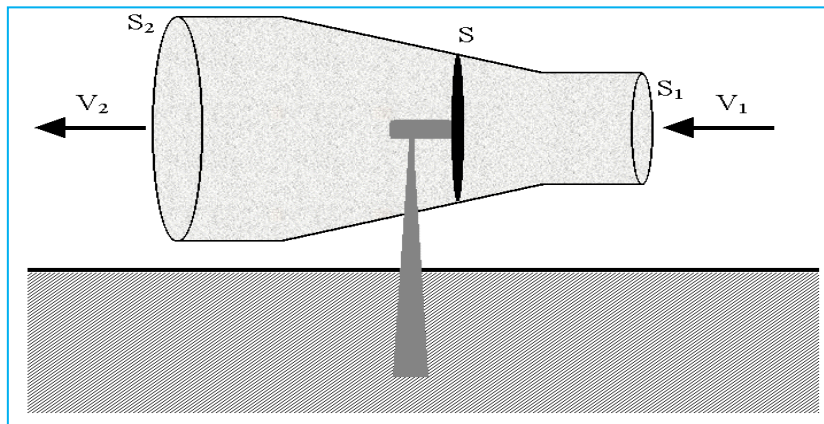


Figure II.8: Tube de courant autour d'une éolienne

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 :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.21})$$

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

$$\frac{P_{a\acute{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (\text{II.22})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. II.10), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\acute{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{16}{27}$ 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 [34].

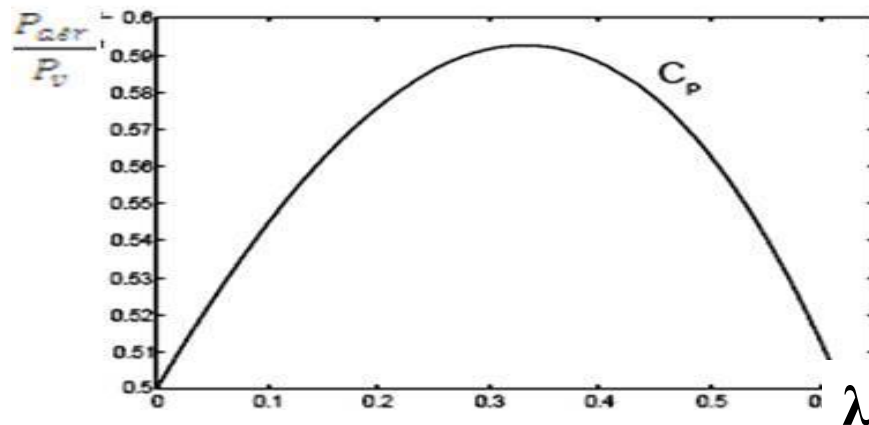


Figure II.9: Coefficient de puissance

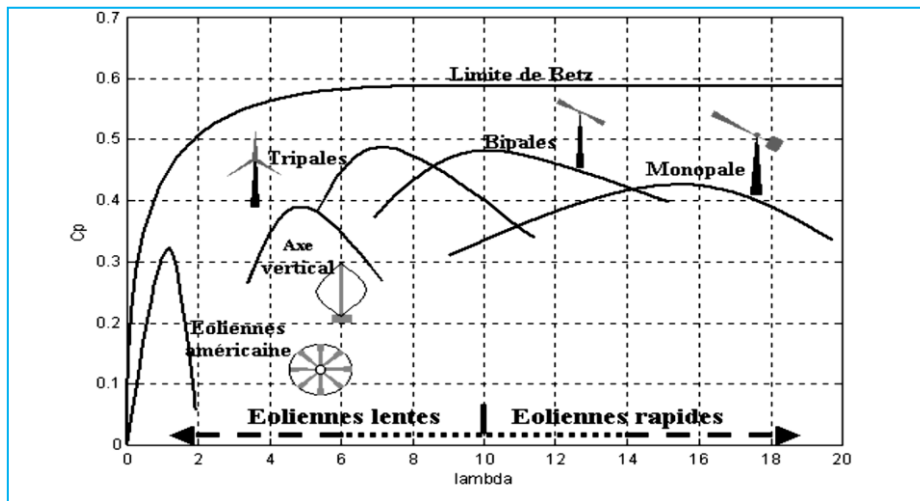


Figure II.10: Coefficient de puissance pour différents types éoliennes

II.5.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (II.20), (II.21) et (II.22), la puissance mécanique $P_{a\acute{e}r}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{a\acute{e}r} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (\text{II.24})$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_2}{K \cdot V_1} \right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure. II.9).

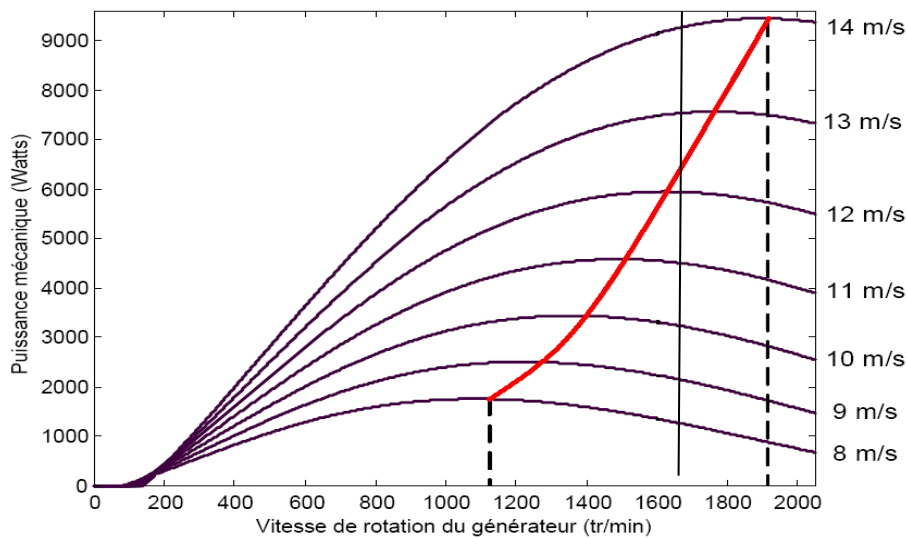


Figure II.11: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure (II.10) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple[35] .

II.6. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse[10] .

II.6.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessite 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_n , 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.10) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation[36].

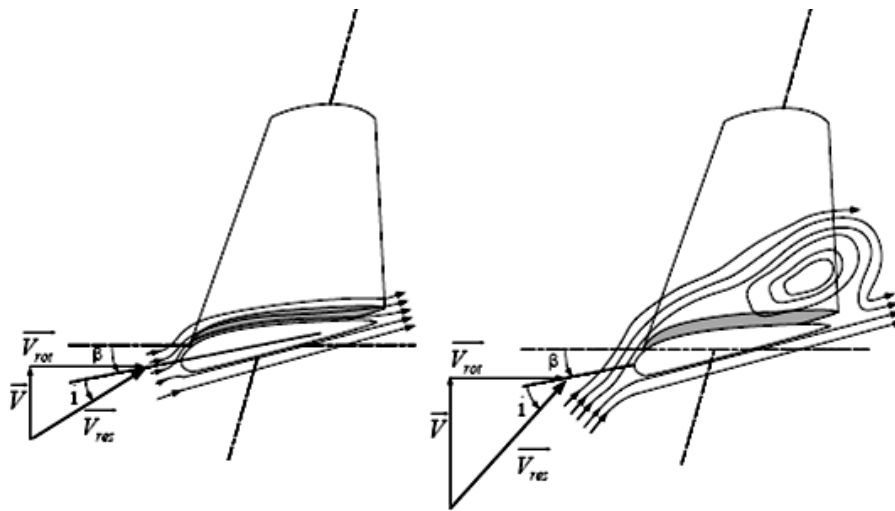


Figure II.12: Flux d'air sur un profil de pale " Stall"

II.6.2 Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure. II.13) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. II.14) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur[37].

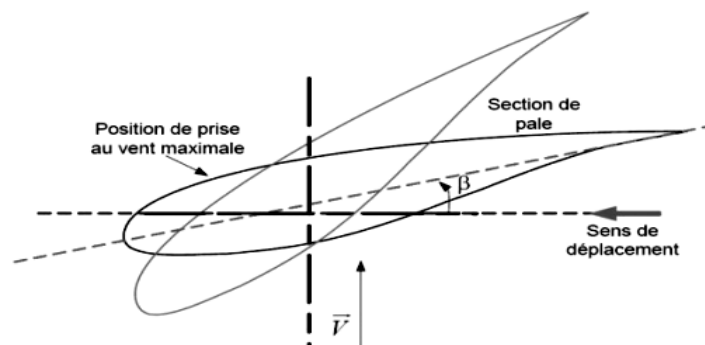


Figure II.13: Variation de l'angle de calage d'une pale

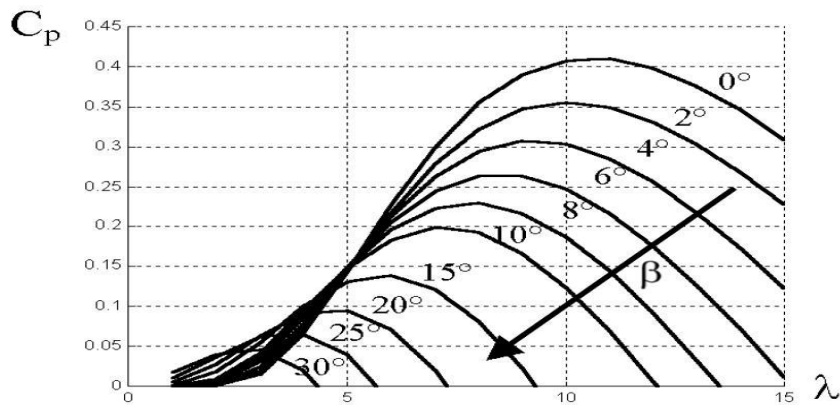


Figure II.14: Flux d'air sur un profil de pale " Stall "

II.7 Modélisation du système éolien a vitesse variable base sur une MADA

II.7.1 Description du système éolien

Le système éolien a vitesse variable étudié dans ce mémoire, base sur une MADA, est illustre a la (Figure. II.15). La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également a travers des convertisseurs statiques triphasés a IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor. Celui-ci est muni de système bague/balais. Ces convertisseurs cotes MADA et réseaux, sont commandes en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [6].

On procède maintenant a étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne.

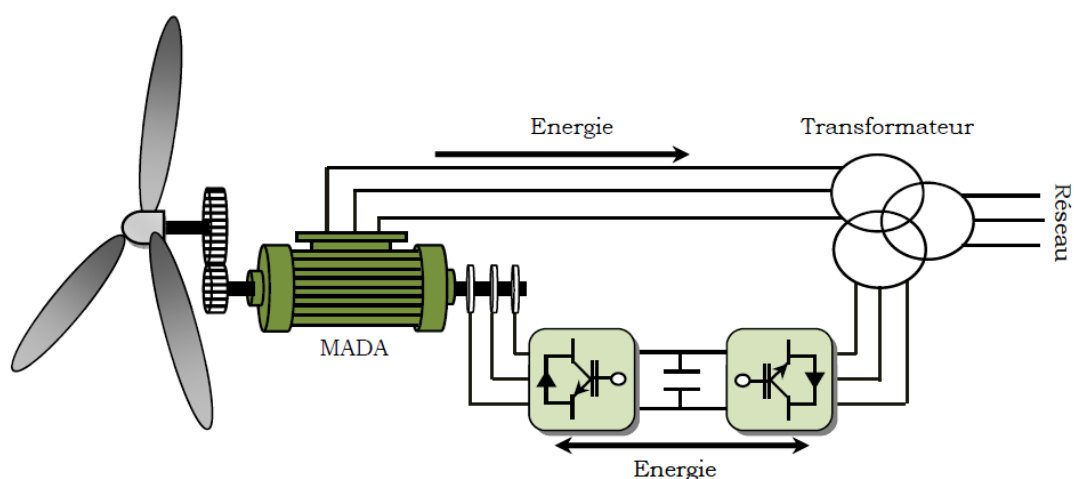


Figure II.15: Système éolien a vitesse variable base sur une MADA connectée au réseau

II.7.2 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La chaîne de conversion éolienne est constituée de la turbine, du multiplicateur et de la GADA. L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Par la suite, la GADA transforme la puissance mécanique en puissance électrique.

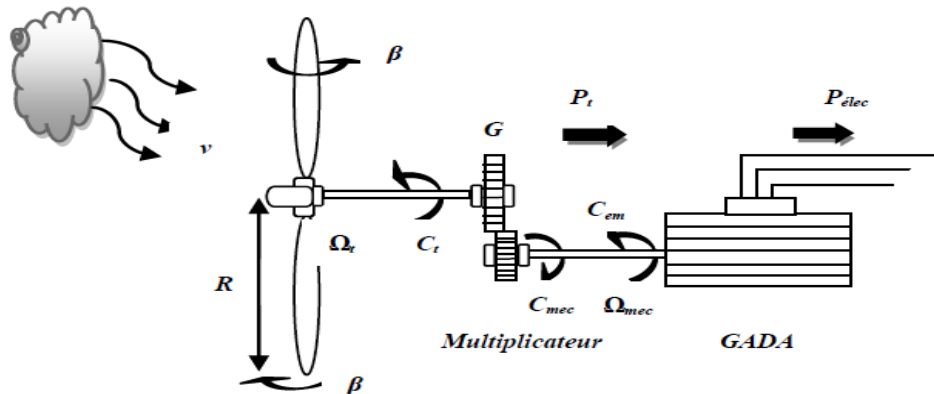


Figure II.16 Configuration d'une éolienne.

II.7.3 Modélisation de la vitesse du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. [7]

La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t)$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (II.26)$$

prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de vent

$$v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (II.27)$$

II.7.4 Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes[8] :

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

II.8. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraine une génératrice électrique (Figure II.17).

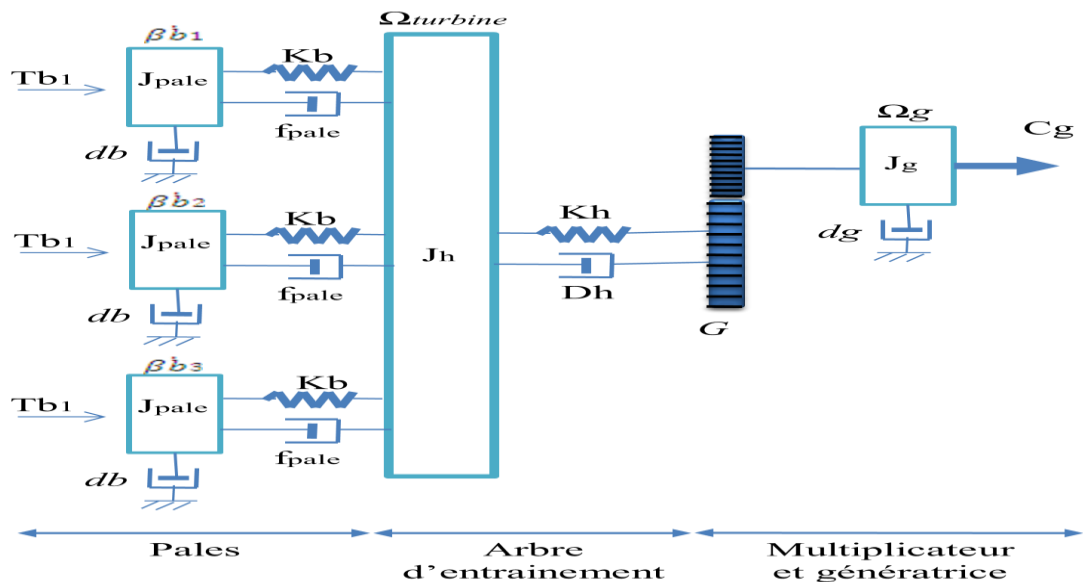


Figure II.17: Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}

- la même élasticité K_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}_{b1}$, $\dot{\beta}_{b2}$, $\dot{\beta}_{b3}$. Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la cote de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.16) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée[31].

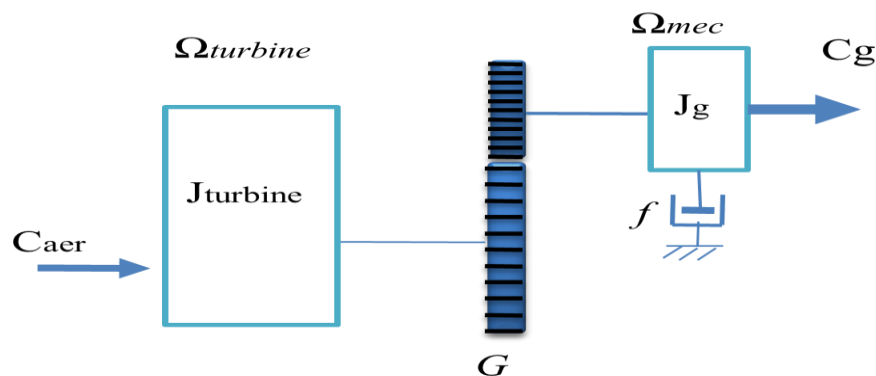


Figure II.18: Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.8.1 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

L'énergie cinétique d'une masse d'air m (ρV) qui se déplace avec la vitesse v , est:

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.28})$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [11]:

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (\text{II.29})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S ($S = \pi.R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v^2 \right] \quad (\text{II.30})$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{II.31})$$

$\frac{dx}{dt}$: La vitesse de vent v

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.32})$$

Où

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg.m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.33})$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine[21].

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ)

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{v} \quad (\text{II.34})$$

Où

Ω_{turbine} : est la vitesse de la turbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, donc le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{II.35})$$

❖ Coefficient de puissance C_p :

Généralement le coefficient C_p présente par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient C_p . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre N:

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{II.36})$$

Dans ce sens. Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne d'où, le coefficient C_p est donné par la formule suivante :

$$C_p = 7.95633\lambda^5 \cdot 10^{-5} - 17.375\lambda^4 \cdot 10^{-4} + 9.86\lambda^3 \cdot 10^{-3} - 9.4\lambda^2 \cdot 10^{-3} + 6.38\lambda \cdot 10^{-2} + 0.001 \quad (\text{II.37})$$

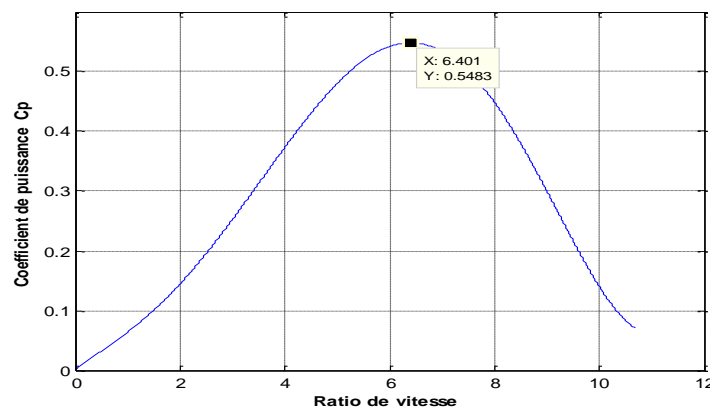


Figure II.19: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

On peut remarquer sur la (Figure. II.19) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour laquelle on a coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. La valeur maximale du coefficient C_p est 0,548 correspond à $\lambda = 6,4$.

II.8.1.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.38)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.39)$$

II.8.1.2 Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.40)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.41)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec}$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la(figure. II.20).

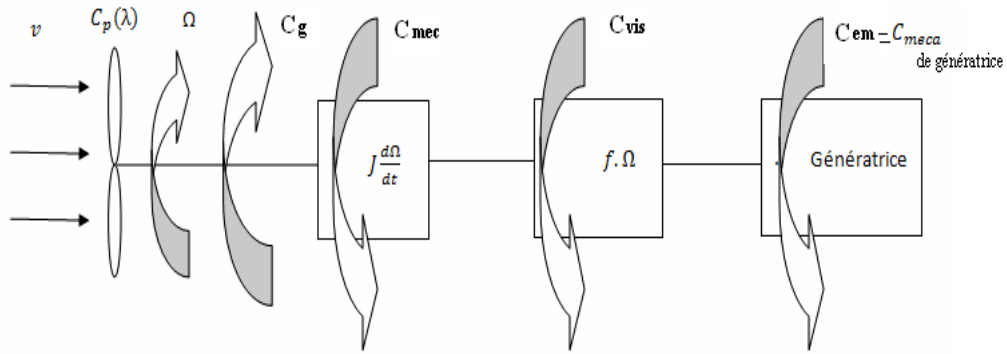


Figure II.20: Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté dans la figure. II.21.

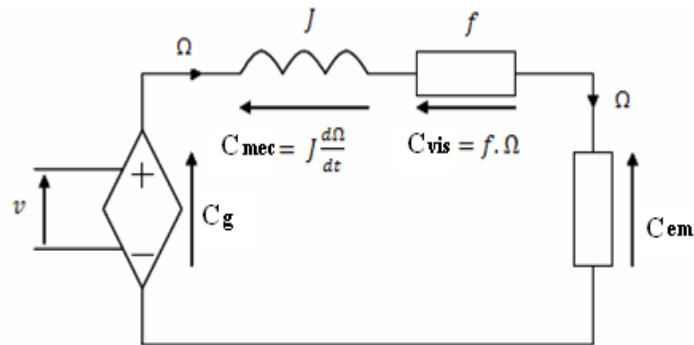


Figure II.21: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.42)$$

D'où en Transfert de LAPLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_g - C_{em}) \quad (II.43)$$

II.8.2 Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure.(II.22), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

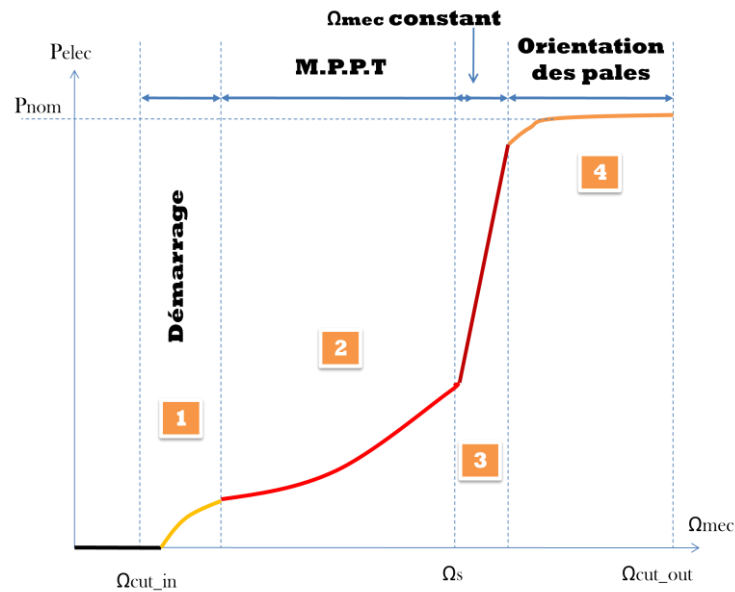


Figure II.22: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-**Zone1** : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-**Zone2** : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-**Zone3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-**Zone4** : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control» [38].

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

II.8.3 Maximisation de la puissance extraite:

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

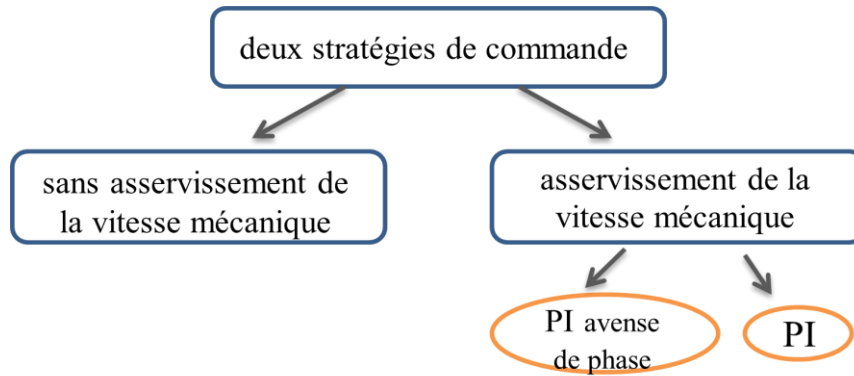


Figure II.23: Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C’est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [23].

II.8.3.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l’hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.44)$$

Si on néglige l’effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (II.45)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d’une estimation de la vitesse du vent, on obtient:

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimée}} v^3_{estimée} \quad (II.46)$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (II.47)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{C_p \max}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p \max}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l’expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p \max}} \Omega_{mec}^2 \quad (II.48)$$

La figure. II.24. représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

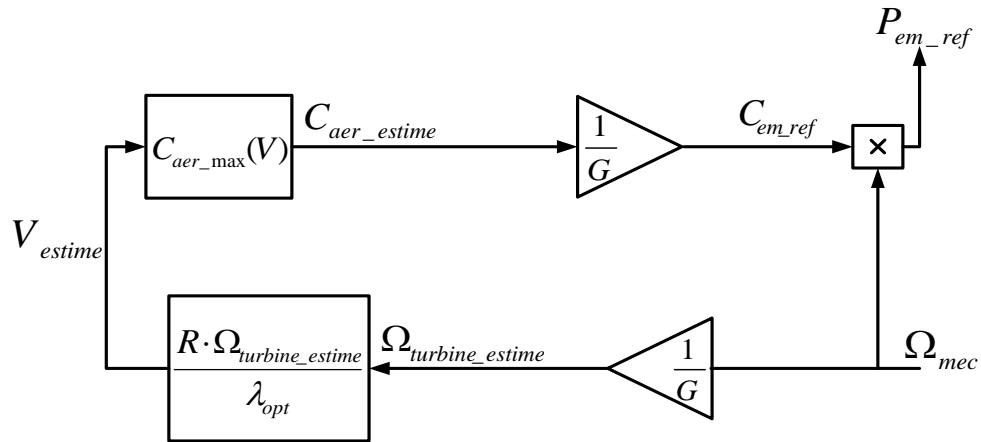


Figure. II.24: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

II.9. Simulation la chaine de conversion

La figure II.26 montre le profil de vent créé par le composant de turbulence avec une vitesse moyenne de 8 (m/s) appliqué sur la turbine.

La figure II.27 représente variations de la vitesse mécanique de la turbine qui fait tourner le rotor de la génératrice

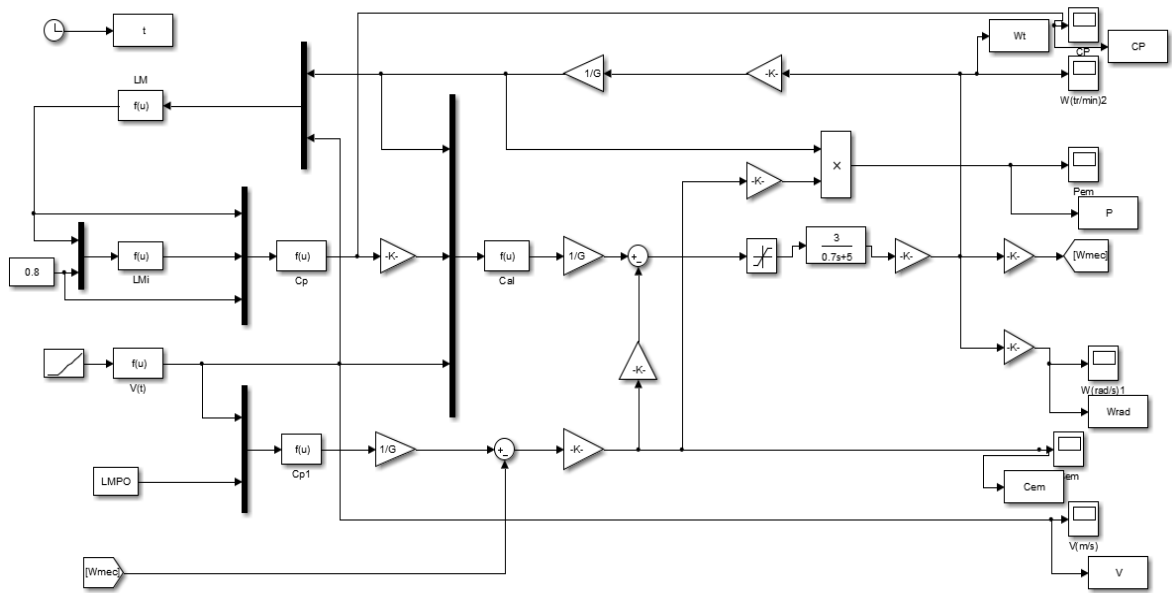


Figure II. 25: schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable

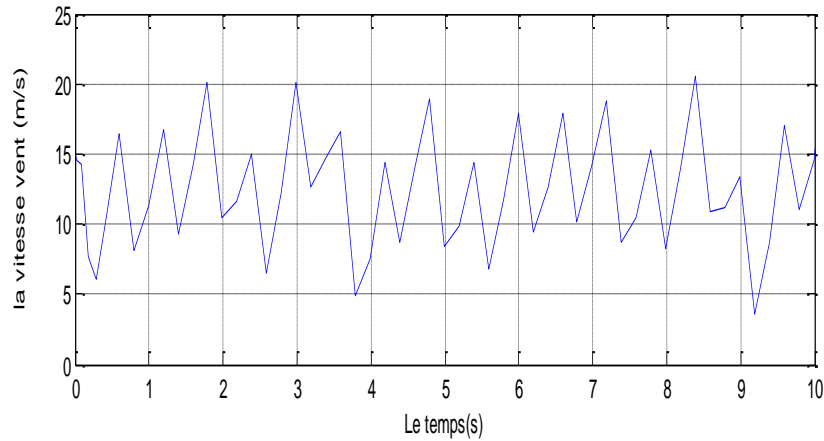


Figure II.26: Le profil de vent appliqué.

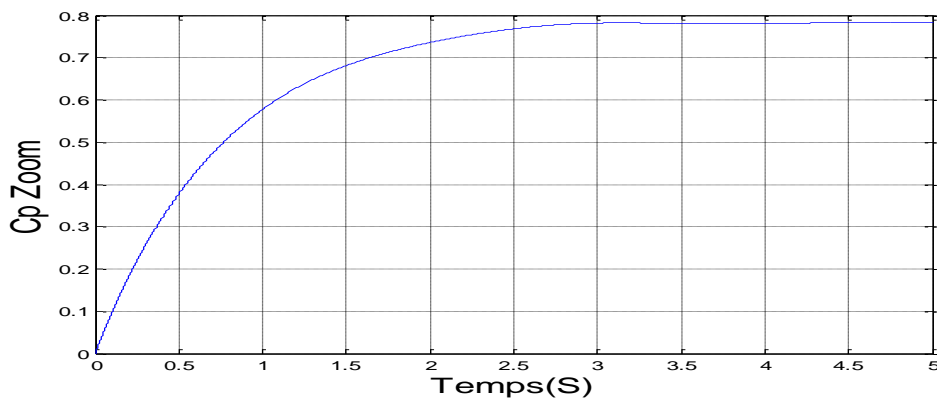


Figure II.27: Coefficient de puissance

- **La puissance électrique et la Vitesse mécanique :**

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par : $(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

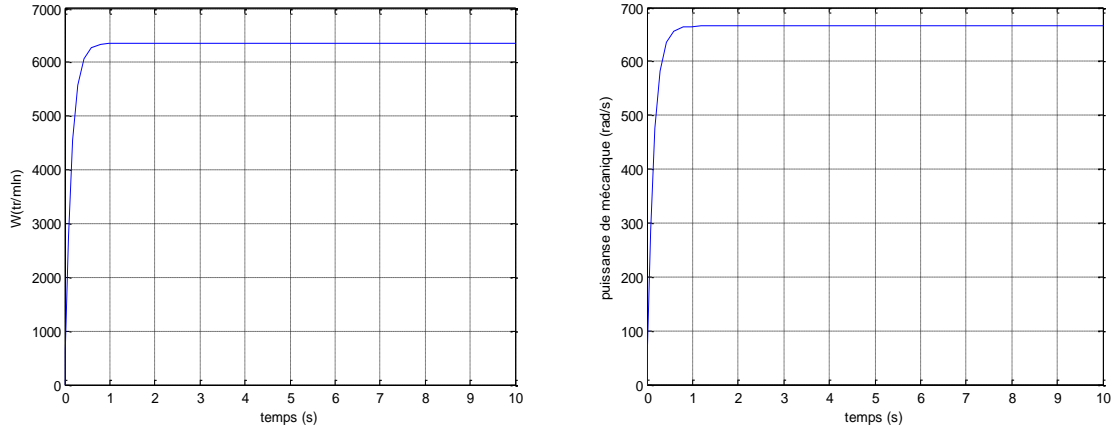


Figure II.28: Vitesse mécanique

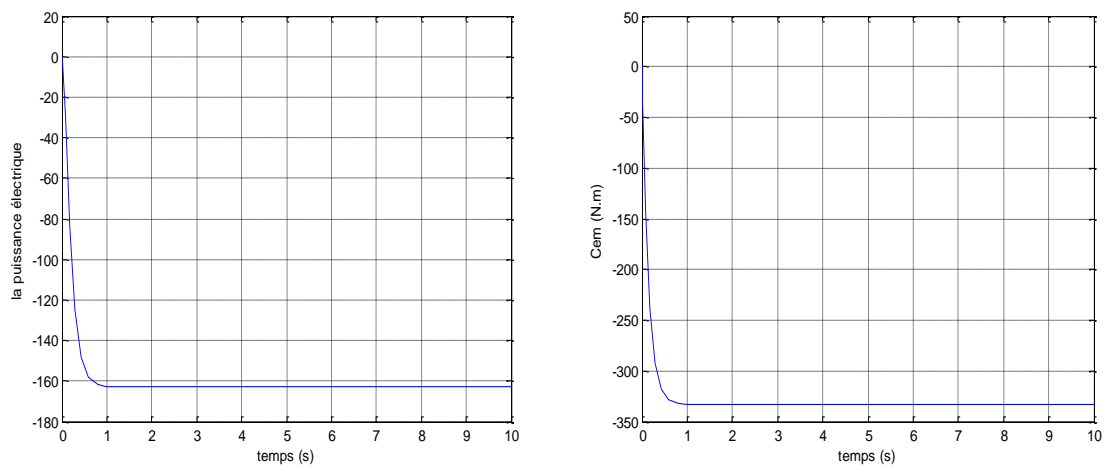


Figure II.29: Puissance et Couple électrique produite

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord modélisé les éléments constituant la chaîne de conversion, tels que, les convertisseurs statiques (onduleur (commandé en MLI) et redresseur) et la turbine éolienne avec ses différents éléments utilisant un multiplicateur et nous avons ainsi présenté la stratégie de la régulation MPPT.

Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité. Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système ce qui fait l'objet du prochain chapitre

III.1.Introduction

La modélisation d'un système physique est une étape indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et développement pour une génératrice électrique cette étape permet de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice.

Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels, permettant de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation de la conception La modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes.

Dans ce chapitre on va présenter une description de la génératrice asynchrone double alimentation, sa constitution et ses modes opérationnels et on s'intéresse essentiellement à la modélisation en fonctionnement génératrice et la simulation dans l'environnement (MATLAB/SIMULINK). Et pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie. Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation mais notre intérêt et la structure de "Scherbius" avec convertisseurs à IGBT commandable par la par la modulation de largeur d'impulsions MLI.

III.2. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont : [39]

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire (absence d'effet pelliculaire)
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On considère que la force magnétique créée par chacune des phases statorique et rotorique est à répartition sinusoïdale.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique.

III.3. Description de la Génératrice asynchrone à double alimentation

III.3.1. Constitution de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements[40].

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.

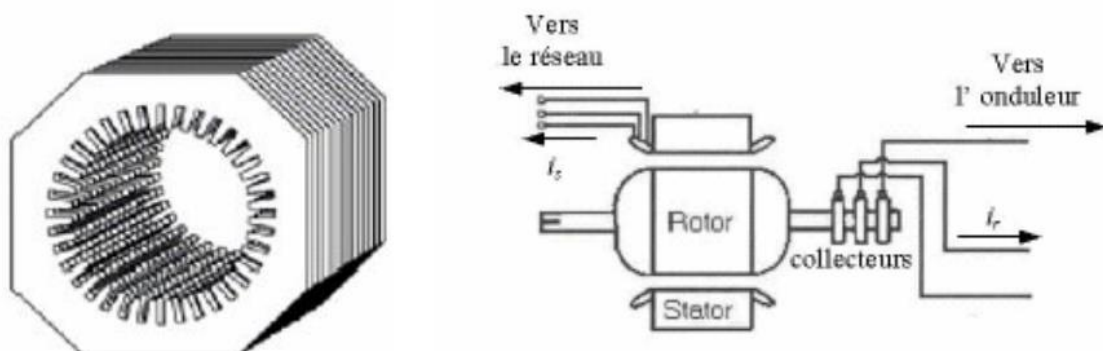


Figure III.1: Structure du stator et du rotor à bagues.

Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la machine asynchrone à double alimentation en générateur à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [41].

III.3.2. Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écuriel et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bague/balais. Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de paires de pôles dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromagnétiques (f.e.m) dans les enroulements rotoriques. Le rapport entre les (f e.m) crée au rotor et au stator est défini par [42]:

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r \omega_s - P\Omega}{N_s \omega_s} = r \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (\text{III-1})$$

Avec:

N_r et N_s respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

P :le nombre de pair de pôle.

r : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotorique et statorique.

ω_s et ω_e : respectivement les pulsations statorique et électrique de la MADA. En définissant le glissement par:

$$g = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (\text{III-2})$$

L'équation (III-1) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot r \quad (\text{III-3})$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait:

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{r} \quad (\text{III-4})$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{E_r}{E_s} \frac{i_r}{i_s} = g \quad (\text{III-5})$$

Chapitre 03: Modélisation de la GADA

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

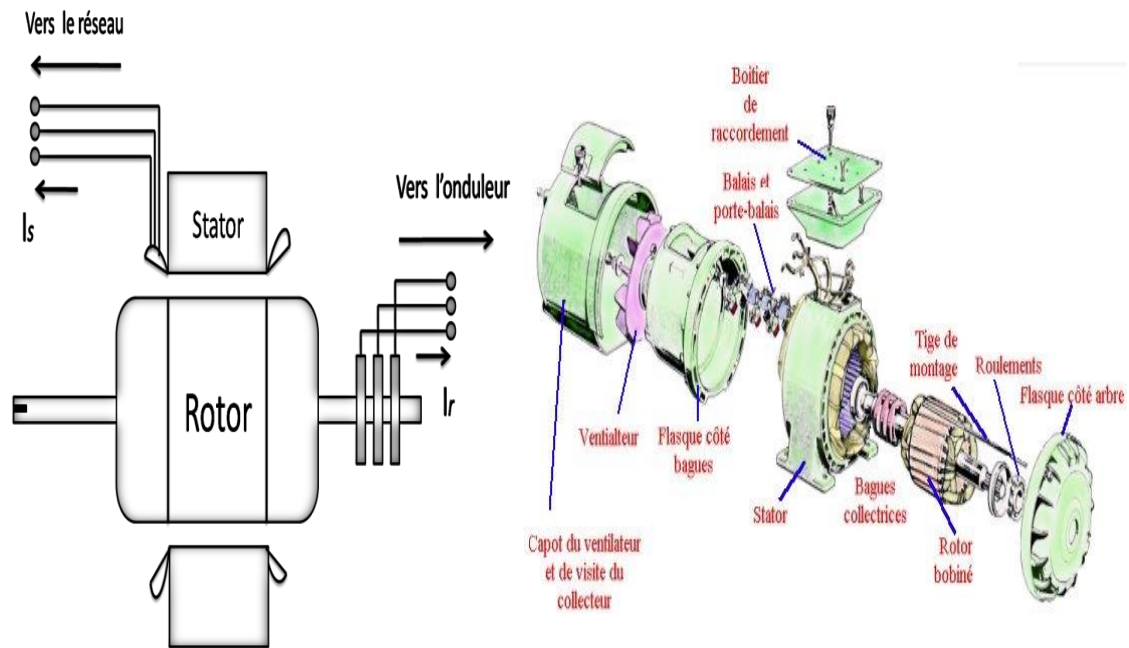


Figure III.2 : Machine à induction à rotor bobiné

III.3.3. 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[43].

III.4. 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

Chapitre 03: Modélisation de la GADA

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 [44].

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 [45].

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 [45].

III.5. Modes de fonctionnement de la MADA :

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Dans cette dernière, P_s , P_r et P_{mec} , P_{res} désignent respectivement les puissances du stator, du rotor, mécanique et récepteur [46].

en négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances comme suit :

$$P_r = g \cdot P_s$$

$$P_{res} = P_{mec} = P_s - P_r = 1 - P_s$$

Moteur ($P_{mec} > 0$)	Générateur ($P_{mec} < 0$)
hypo-synchrone $g > 0$	hypo-synchrone $g > 0$
$P_s > 0$	$P_s < 0$
$P_r > 0$	$P_r < 0$

$P_s > P_{res}$	$ P_s > P_{res} $
hyper-synchrone $g < 0$	hyper-synchrone $g < 0$
$P_s > 0$	$P_s < 0$
$P_r < 0$	$P_r > 0$
$P_s < P_{res}$	$ P_s < P_{res} $

Tableau. III.1 Quadrants de fonctionnement de la MADA

Lorsque la machine fonctionne en **moteur**

- **Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone**

Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, "la puissance de glissement" la puissance électrique du stator (P_s) est transformée en partie en puissance mécanique (P_{mec}) et le reste peut être réinjectée au réseau à travers le rotor (P_r). La Machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous formes de pertes joules [47].

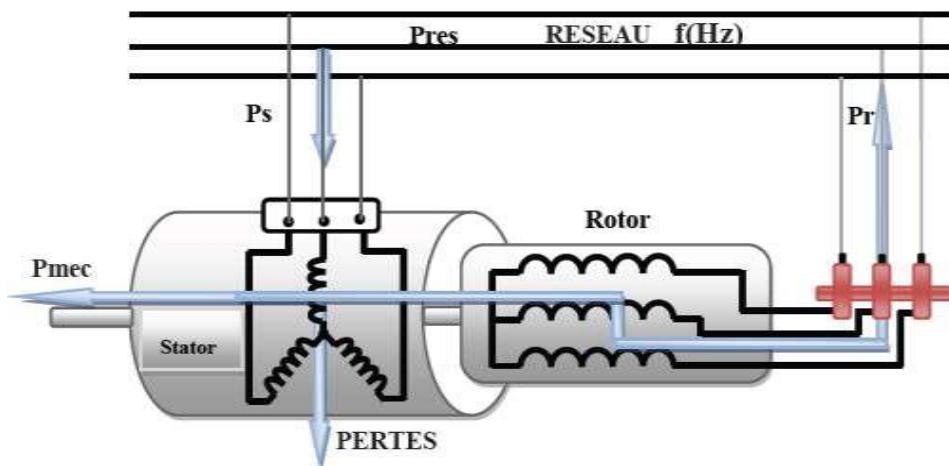


Figure III.3: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

- **Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone**

Le fonctionnement en mode hyper-synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor. La machine asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode [47].

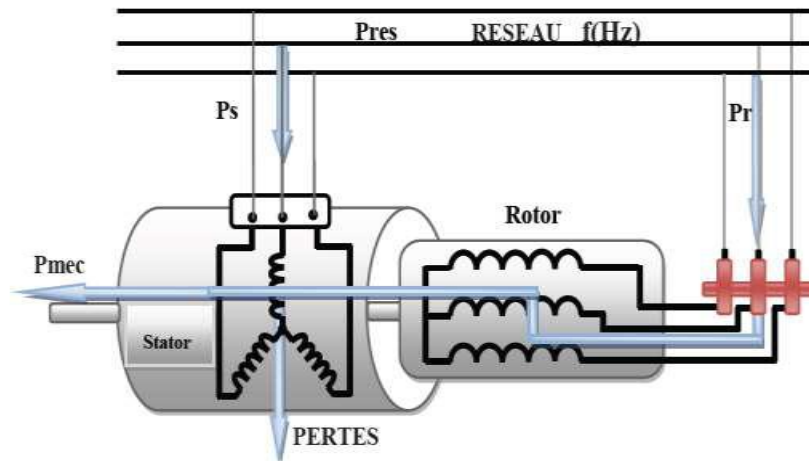


Figure III.4: Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

Lorsque la machine fonctionne en **génératrice** :

- **Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:**

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime[48-13].

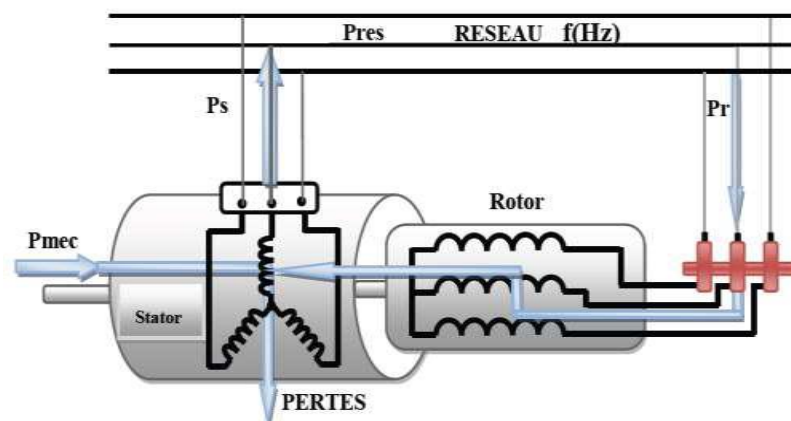


Figure III.5: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

- **Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:**

La puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor, [48-13].

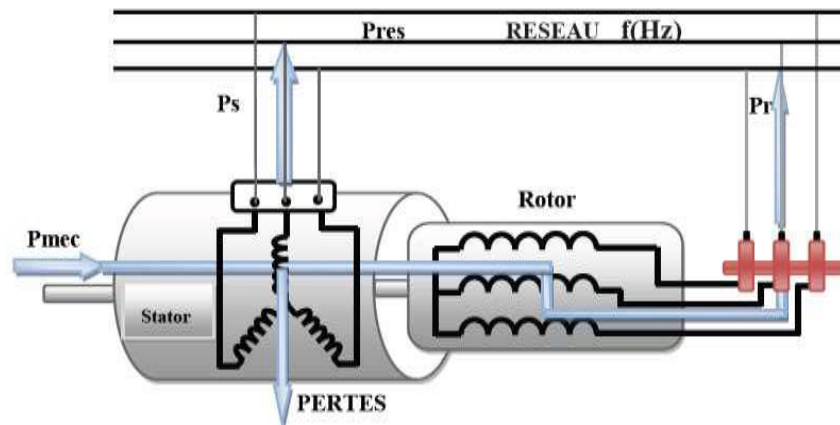


Figure III.6: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone .

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques[49].

III.6 Avantages et inconvénients de la MADA :

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

III.6.1 Avantages de la MADA : [50]

- 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.6.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

III.7 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.7.1 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 [51] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

III.7.2 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[52].

- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;

- ✓ 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.8. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation

III.8.1. Représentation du modèle :

La machine asynchrone à double alimentation constituée de deux parties, un stator fixe et un rotor mobile, le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimenté par un système triphasé de tension, Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paire de pôles que celui du stator couplé.

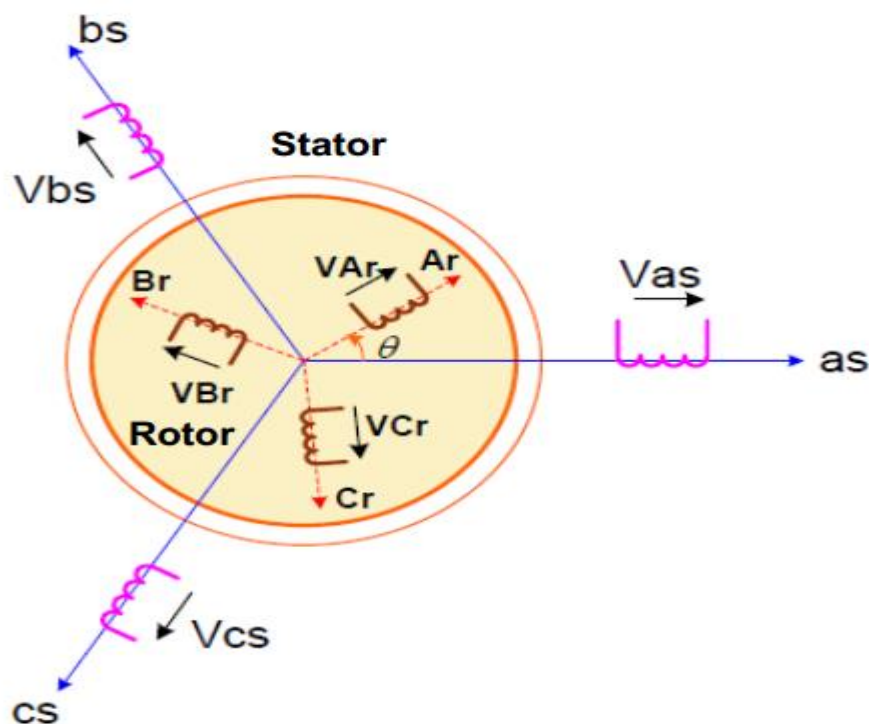


Figure III.7: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.8.2. Equations générales de la GADA :

Le modèle de la GADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone caged'écureuil . A cet effet, lors de la modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un Bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que les enroulements de la

GADA ne sont pas encourt-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle ne sont pas nulles [53].

III.8.2.1. Equations électriques :

Les équations des tensions statorique et rotorique sous forme matricielle s'écrivent :

$$\text{Grandeurs statorique : } \begin{cases} [V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ [I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ [\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^T \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

a. Pour le stator

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

b. Pour le rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

En manière plus raccourcie :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -[R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] - \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Tels que :

V_{sabc} : Les tensions appliquées aux phases statorique ;

I_{sabc} : Les courants qui traversent celle-ci ;

φ_{sabc} : Les flux totaux à travers ces enroulements ;

R_s : Leurs résistances ;

Pour le rotor en adoptant les mêmes notations, en remplaçant l'indice « s » par l'indice « r ».

III.8.2.2. Equations magnétique

Les équations des flux statoriques et rotoriques

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = -[L_{SS}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{SR}] \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [L_{RR}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - [M_{RS}] \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

La manière raccourcie

$$\begin{cases} [\varphi_{sabc}] = -[L_{SS}] \cdot [I_{sabc}] + [M_{SR}] \cdot [I_{rabc}] \\ [\varphi_{rabc}] = [L_{RR}] \cdot [I_{rabc}] - [M_{RS}] [I_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec les matrice des inductances statoriques et rotoriques

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Où :

L_s : l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : l'inductance propre d'une phase rotoriques ;

M_s : l'inductance mutuelle entre phase statorique ;

M_r : l'inductance mutuelle entre phase statorique;

La matrice des inductances mutuelles entre phase statorique et phase rotorique est donné par

$$[M_{SR}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Ou: $[M_{SR}] = [M_{RS}]^T$

III.8.2.3. Equations mécaniques

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par

$$C_e = \frac{1}{2} p [I]^T \frac{d}{dt} [L] \cdot [I] \quad (\text{III.17})$$

Ou :

[I]: Matrice de courant total ;

[L]: Matrice inductance totale ;

p : C'est le nombre des paires des pôles

$$[i] = \begin{Bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{Bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura

$$C_e = p [I_s]^T \left(\frac{d}{dt} [M_{sr}] \right) [i_r] \quad (\text{III.19})$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit

$$\frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega \quad (\text{III.20})$$

La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ , ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé.

III.8.3. La transformation de Park

Les transformations mathématiques comme la transformation de Park peuvent faciliter la résolution d'un tel système en transformant ces équations différentielles à paramètres variables dans le temps en équations différentielles à paramètres constantes écrites dans un repère à axes orthogonaux.

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées est constitué une transformation triphasé-biphasé généralisé d'un système du repère (abc) vers le repère orthogonal (u,v) et donc d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution Pour

Chapitre 03: Modélisation de la GADA

faire le passage d'une représentation en utilisant la matrice de transformation $P(\theta)$ cette transformation peut être appliqué aux courants, tensions, et aux flux

La transformation est donnée sous la forme suivante

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (III.21)$$

La matrice de transformation est définie comme suit

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Pour le passage biphasé-triphasé il faut utiliser la matrice inverse

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix}$$

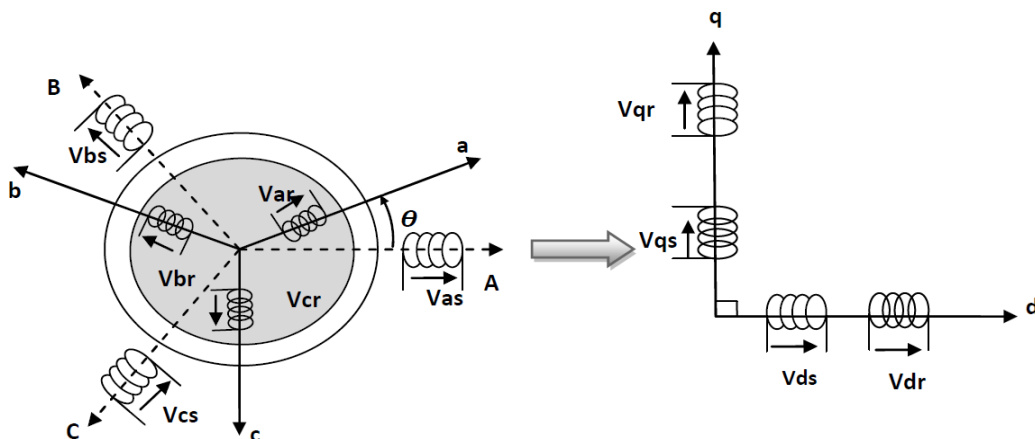


Figure III.8 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

III.8.4 Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique [55]:

III.8.4.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) . Dans ce cas, $(\omega_{coord} = 0)$. Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques[54].

III.8.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse ($\omega_{coord} = \omega = p\Omega$). Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor[54].

III.8.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire ($\omega_{coord} = \omega_s$). Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champs tournant ($\omega_{coord} = \omega_s$) pour la modélisation et commande de la MADA [54].

III.8.5 Application de la transformation de Park à la MADA

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont

$$\omega_{coord} = \omega_s$$

- **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:**

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

❖ **Equations électriques**

En multipliant les systèmes des équations (III.8) et (III.9) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec :

ω_{coor} : pulsation du référentiel d'axe (d, q).

ω : pulsation mécanique du rotor.

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Avec :

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

❖ Equation du flux " Magnétique "

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statorique et rotorique on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

❖ Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega \quad (\text{III.25})$$

Où

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Chapitre 03: Modélisation de la GADA

Ω : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

F : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

P : Nombre de paires de pôles.

❖ Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (III.15) et (III.17) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_s L_s i_{qs} - \omega_s M i_{qr} \\ V_{sq} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s L_s i_{ds} + \omega_s M i_{dr} \\ V_{rd} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s L_r i_{qr} - \omega_s M i_{qs} + \omega L_r i_{qr} + \omega M i_{qs} \\ V_{rq} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s L_r i_{dr} + \omega_s M i_{ds} - \omega L_r i_{dr} - \omega M i_{ds} \end{cases} \quad (III.26)$$

Ce système d'équation (III.26) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

$$\Rightarrow [V] = [A][i] + [B] \frac{d}{dt} [i] + \omega_s [C][i] + \omega [D][i] \quad (III.28)$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][i] \quad (III.29)$$

$$\text{Dont : } [V] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}$$

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

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

III.8.6 Expression du couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$P_s = V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}$$

$$P_s = \left(R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \right) i_{ds} + \left(R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \right) i_{qs}$$

$$P_s = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} i_{qs} \right) + \omega_s (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} i_{qs}$$

- 3) Puissance mécanique

$$\omega_s (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

Et d'autre part on a :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad ; \quad C_e = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_e = p(\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{qs} i_{sd}) \tag{III.30}$$

III.8.7 Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

On a:
$$\begin{cases} V_s = V_{ds} + j V_{qs} \\ V_r = V_{dr} + j V_{qr} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = \text{Re} ([V_s][i_s]) \\ Q_s = \text{im} ([V_s][i_s]) \end{cases}$$

Avec la multiplication et tout les calculs il en résulte:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs} \\ Q_s = V_{qs}i_{ds} - V_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr} \\ Q_r = V_{qr}i_{dr} - V_{dr}i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont

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

III.9 Résultats de la Simulation

Les théories et les équations citées seront modélisées pour permettre un traitement avec MATLAB/SIMULINK. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

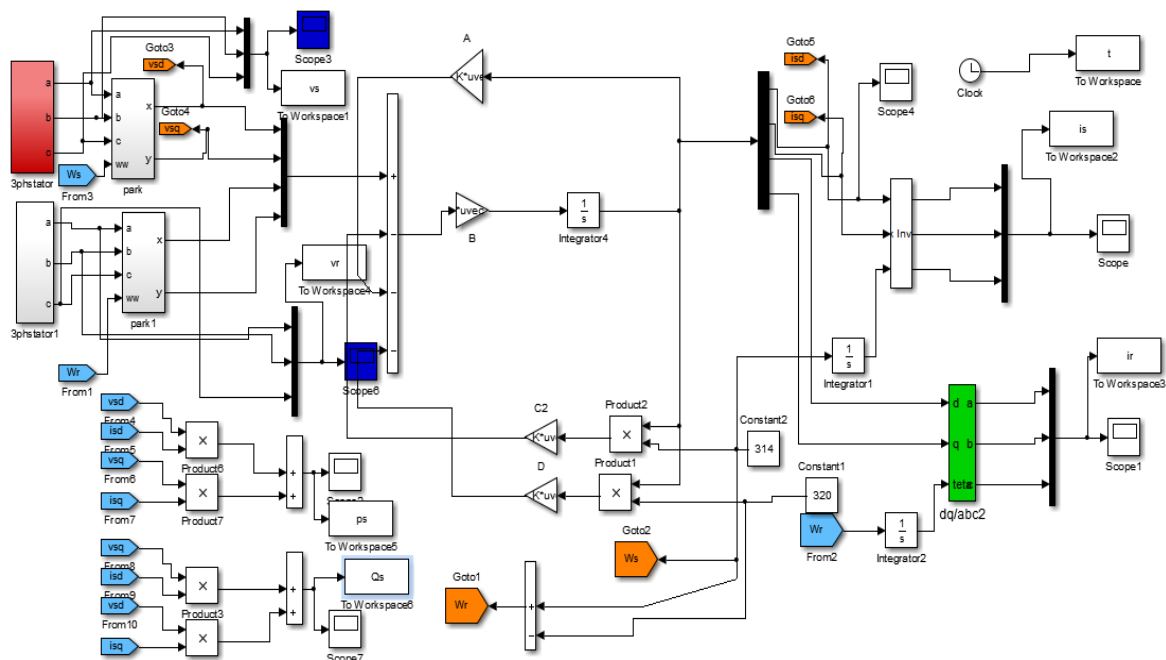


Figure. III.9 Schéma bloque de la modèle de GADA

Chapitre 03: Modélisation de la GADA

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

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min. Les résultats obtenus montrent que :

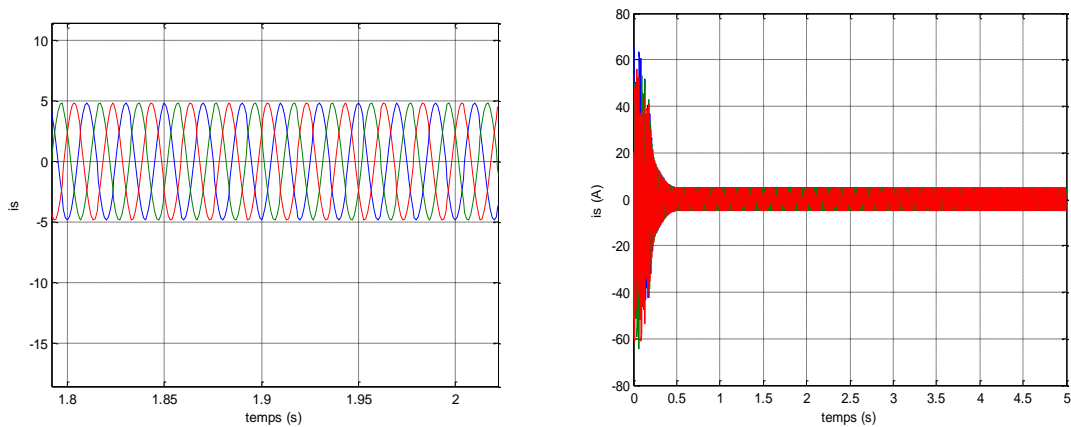


Figure. III.10 Courbe du courant statorique avec zoom

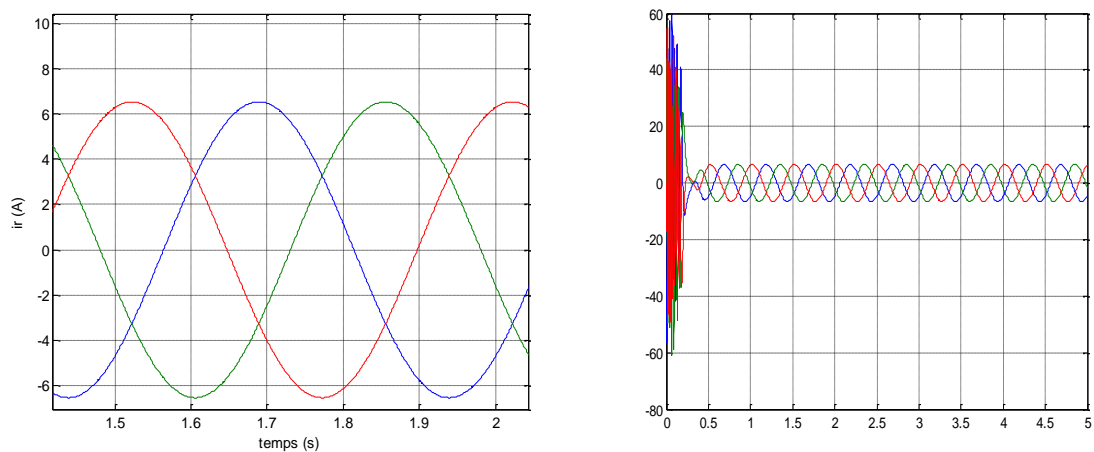


Figure. III.11 Courbe du courant rotorique avec zoom

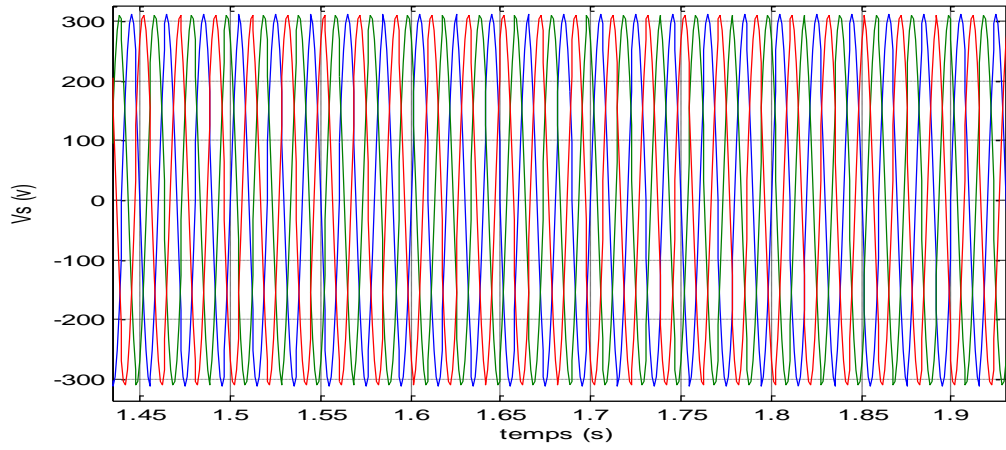


Figure. III.12 Courbe de la tension statorique

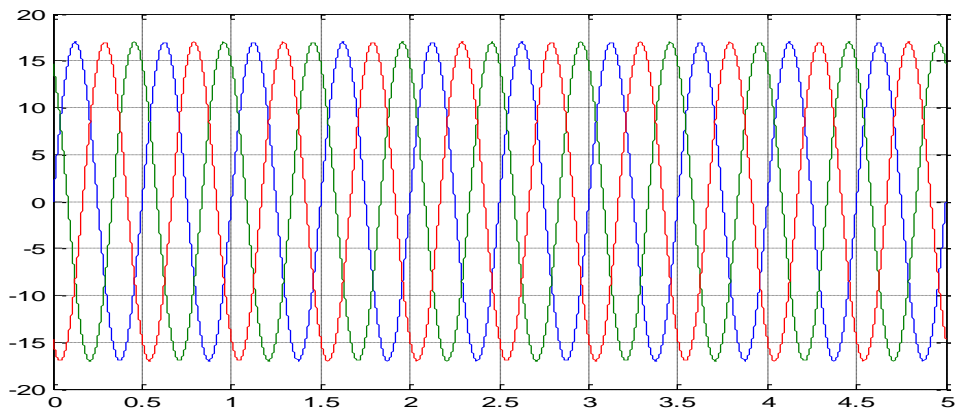


Figure. III.13 Courbe de la tension rotorique

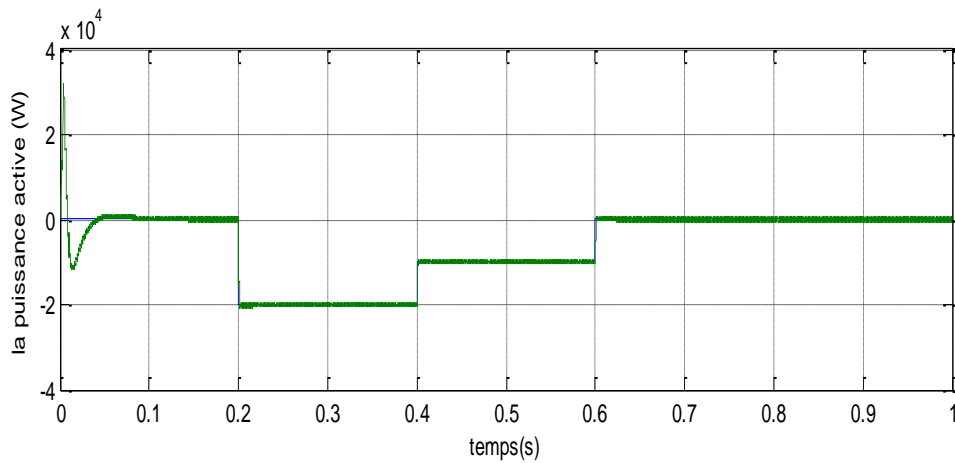


Figure. III.14 Puissance active statorique

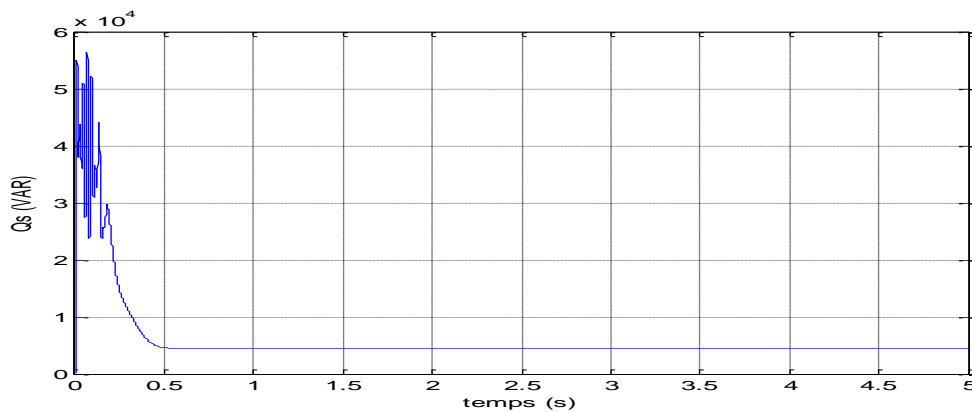


Figure. III.15 Puissance réactive statorique

III.10 .Interprétation des résultats :

Les figures III.10 et III.11 représentent l'évolution du courant statorique et rotorique de la GADA. Au démarrage, le courant générés croient d'une façon exponentielle, puis ils se stabilisent respectivement à 800A en régimes totalement établis à avec des amplitudes constantes sachant que la fréquence est maintenue constante.

Le figure III.12 et Au démarrage, le tension générés croient d'une façon exponentielle, puis ils se stabilisent respectivement à 300v en régimes totalement établis à et La figure

La figure III .13 montre la valeur de la tension dans le rotor, notez qu'elle est constante à environ 20 v et reste constante.

les figures III .13 et III .14 montre la valeur de la puissance active et réactive, Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

- Entre $t=0$ et $t=3s$ échelon négative ($P_{réf} = -5000W$);
- Entre $t=3s$ et $t=5s$ échelon négative ($P_{réf} = -7500W$);
- Entre $t=5s$ et $t=7s$ échelon négative ($P_{réf} = -15000W$);

La puissance réactive :

- Entre $t=0$ s et $t=7s$ ($Q_{réf} = 0$).

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

IV.1 Introduction

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle). La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques.

Le but de cette commande est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante. Pour le cas du contrôle vectoriel de la DFIG, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau.

Dans ce chapitre nous présentons le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la GADA dans le référentiel (d, q), on commence par le principe et aussi l'application de la commande sur la génératrice

IV.2. LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA :

L'objectif principal de la commande vectorielle est d'améliorer leur comportement statique et dynamique. Le nom de cette commande vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence de la commande scalaire ces relations ainsi obtenues sont plus complexes mais par-contre elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Cette technique existe pour les machines à courant alternatif [55].

IV.2.1. Principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle a été découvert par Blaschke en 72 [56]. Il ramène le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu à cause de son caractère spécial lié au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et du couple par le courant d'induit. Cette assimilation présente une qualité intrinsèque car elle permet un contrôle séparé du flux et du couple.

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

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant

producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer.

Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique.

La figure (IV.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée de la machine à courant continu et la commande vectorielle d'une machine asynchrone

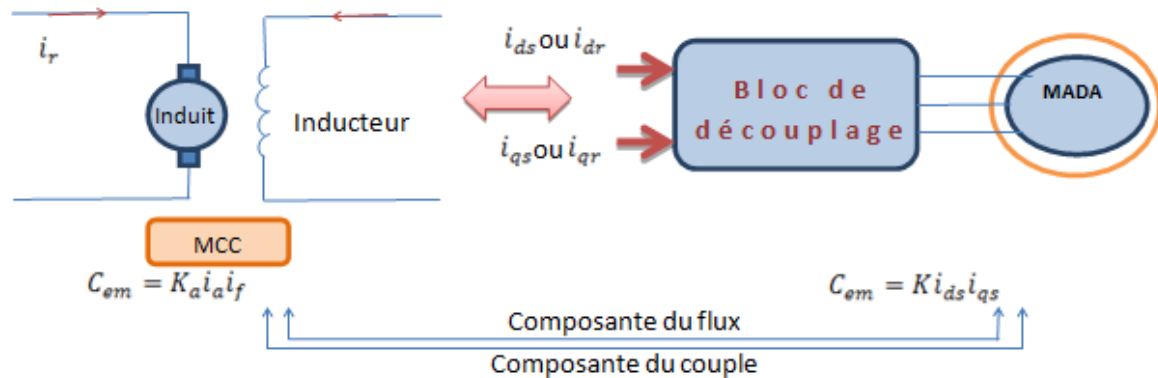


Figure. IV.1: Principe de la commande vectorielle

IV.2.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [57- 58- 59].

Rappelant le système d'équations différentielles (III. 22), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{IV.1}$$

✓ **Choix du référentiel pour le modèle diphasé :**

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul). Nous pouvons écrire : $\varphi_{ds} = \varphi_s$, $\varphi_{qs} = 0$

$$IV.2 \begin{cases} V_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases}$$

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [60] :

$$V_{ns} = \frac{d\varphi_{ns}}{dt} \tag{IV.4}$$

Cette relation montre q' un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi/2)$ sur ce même vecteur. Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (IV.2)

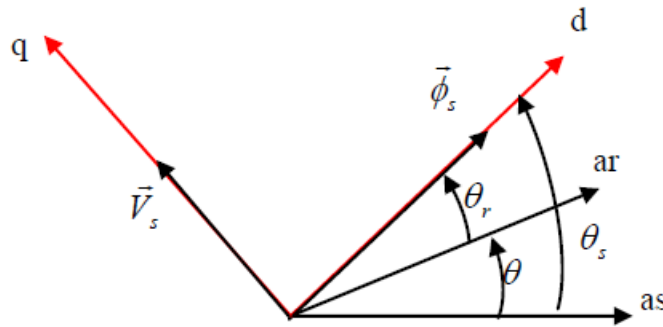


Figure IV.2 : Orientation du flux statorique.

Dans l'hypothèse où le φ_{ds} flux est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q. L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = np \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} \tag{IV.5}$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad \text{IV.6}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = -L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{sq} = 0 = -L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{IV.7}$$

A partir des équations (IV.7), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{IV.8}$$

IV.2.3 Expressions des puissances active et réactive statoriques :

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{IV.9}$$

L'adaptation de ces équations au système d' axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad \text{IV.10}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.8) dans l'équation (IV.10), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{IV.11}$$

$$\begin{cases} P_s = -\frac{M \cdot V_s}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{M \cdot V_s}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{IV.12}$$

Les équations des flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{IV.13}$$

IV.2.4 Expressions des tensions rotoriques :

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions de l'équation (IV.13), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{dr} + \frac{M.V_s}{L_s.\omega_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} \end{cases} \quad \text{IV.14}$$

En remplaçant (IV.13) dans les expressions des tensions rotoriques dans le système d'équations (IV.1) on a:

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g\omega_s \frac{M.V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{IV.15}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = (R_r I_{dr} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr}) \\ V_{qr} = (R_r I_{qr} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \frac{M.V_s}{L_s}) \end{cases} \quad \text{IV.16}$$

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 [61].

✓ Schéma bloc réduit de la MADA

En examinant les équations (IV.11) et (IV.16), on peut établir le schéma bloc de la figure (IV.3) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives réactives statoriques.

Avec :

V_{dr}, V_{qr} : sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$: Est le terme de couplage entre les deux axes.

$(g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}))$: Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

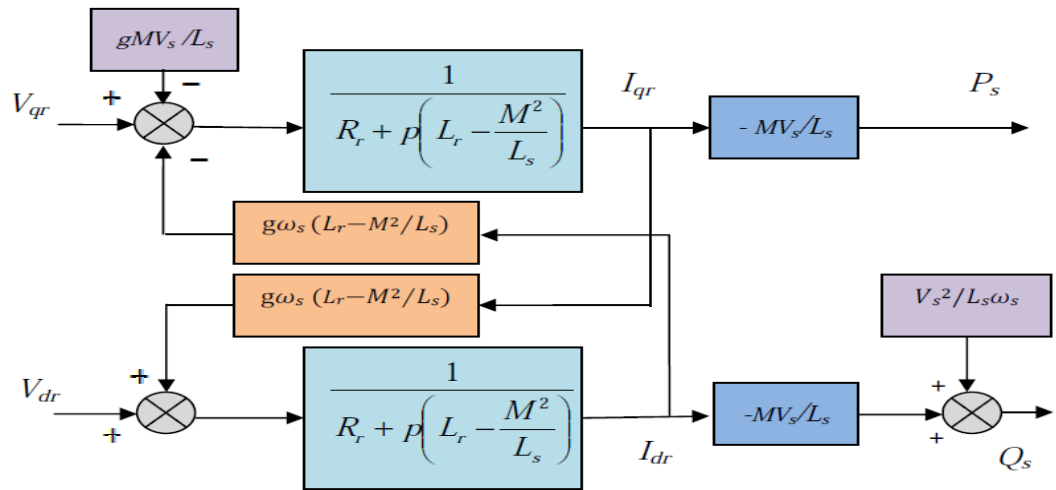


Figure IV.3 : Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [62].

IV.3. Contrôle indépendant des puissance active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA il suffit maintenant d'inverser ses bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

IV.3.1 Commande directe :

la première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande découplée des puissance de la génératrice. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [63] .

Si l'on observe les équations (IV.12), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M.V_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (IV.15) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire : équation (IV.16)

$$\begin{cases} V_{dr} = (R_r I_{dr} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{qr}) \\ V_{qr} = \left(R_r I_{qr} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{dr} + g\frac{M.V_s}{L_s} \right) \end{cases}$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus [64].

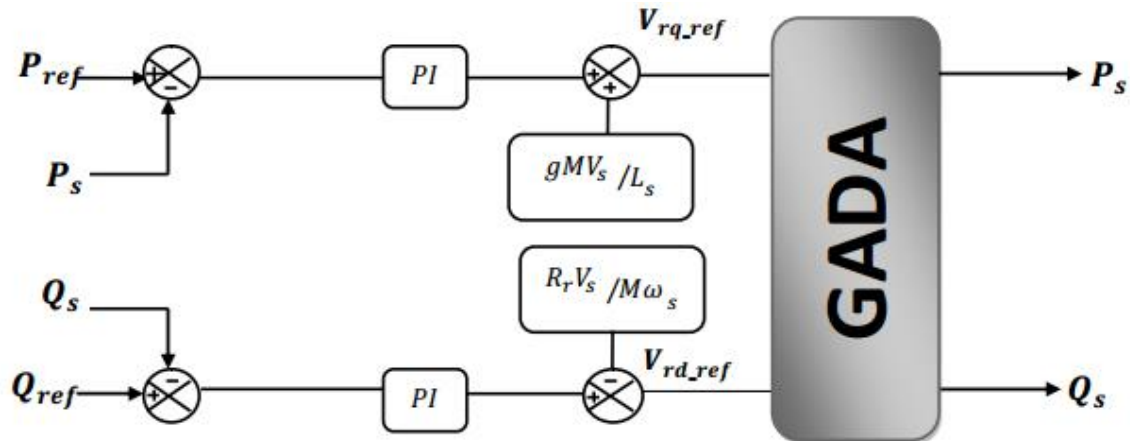


Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande directe

L'effet du terme de couplage $g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g\frac{M.V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul, régulateur sur chaque axe [64].

IV.3.2 Commande indirecte :

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte [63].

IV.3.2.1 Commande en boucle ouvert [64] :

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

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(IV.12), on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$IV.17 \begin{cases} I_{qr_ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s_ref} \\ I_{dr_ref} = \frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s_ref} - \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} \end{cases}$$

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

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive. [64]

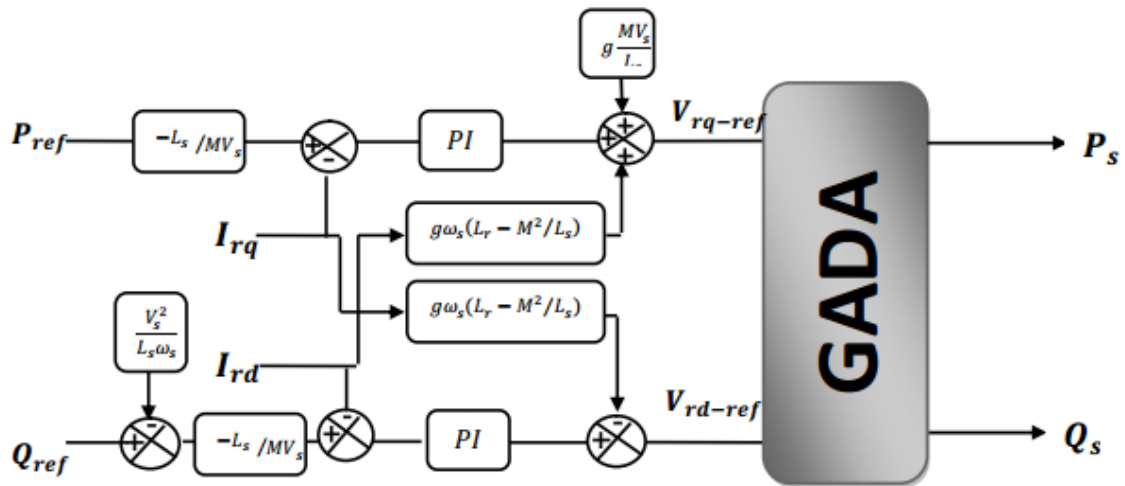


Figure IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

IV.3.2.2 Commande en boucle fermé :

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{dr} et I_{qr} et les puissances P_s et Q_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine est illustré sur la figure (IV.6) [65].

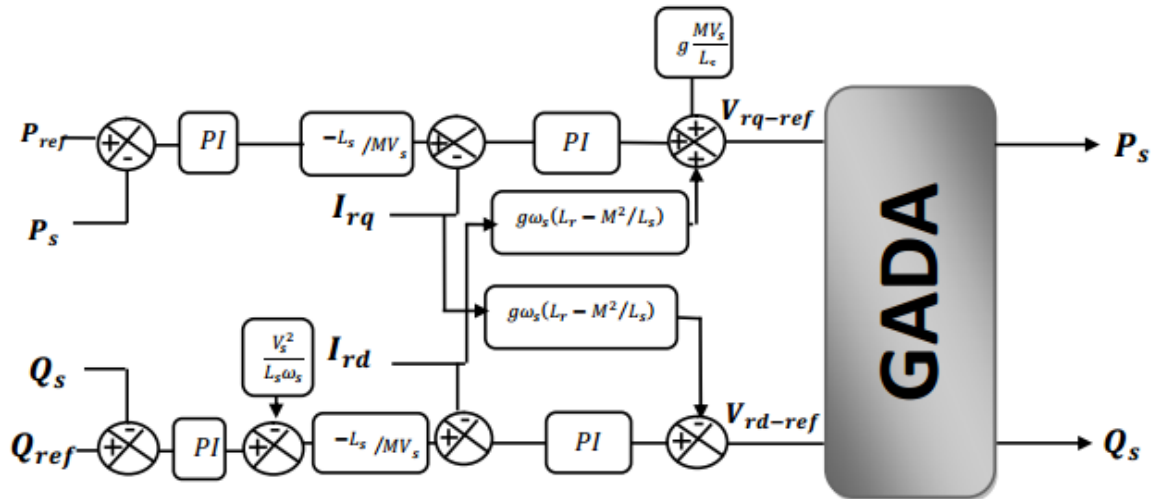


Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

IV.3.3 Dimensionnement Du Régulateur PI :

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants I_{dr} et I_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en ouvre ,ainsi qu'il offre des performance acceptables à la régulation du système considéré [66]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

Les boucles de régulation des puissances active P_s et réactive Q peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure (IV.7):

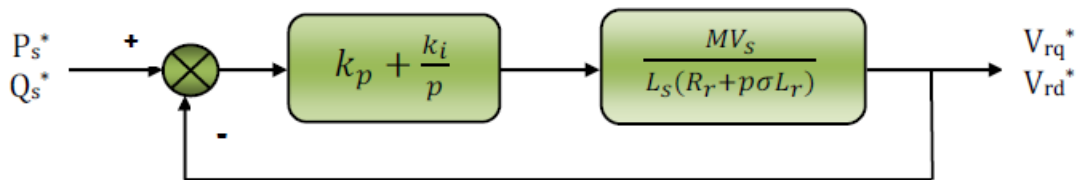


Figure IV.7 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe **d** et l'axe **q**. Soit un régulateur **PI** de fonction de transfert :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}\right) : \text{Coefficient de dispersion}$$

$$PI(P) = k_p + \frac{k_i}{p}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure II-5 sera :

$$FTBO(P) = \frac{k_i}{P} \left(\frac{k_p}{k_i} \cdot P + 1 \right) \frac{\frac{V_s \cdot M}{L_s \cdot R_r}}{1 + P \sigma T_r}$$

IV.18

Par compensation de pole ce qui traduit par la condition :

$$\frac{k_p}{k_i} = \sigma T_r \quad \text{IV.19}$$

Ou:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{IV.20}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(P) = \frac{k_i \cdot V_s \cdot M}{P L_s R_r} \quad \text{IV.21}$$

Afin d'avoir un comportement d'un systeme du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(P) = \frac{1}{1 + \tau P} \quad \text{IV.22}$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure II-5 sera :

$$FTBF(P) = \frac{1}{1 + P \frac{L_s R_r}{V_s M k_i}} \quad \text{IV.23}$$

Par analogie l'expression (IV.24) par l'expression (IV.25), on trouve :

$$\begin{cases} k_p = k_i \sigma T_r = \frac{1}{\tau} \frac{\sigma L_s L_r}{V_s M} \\ k_i = \frac{1}{\tau} \frac{R_r L_s}{V_s M} \end{cases} \quad \text{IV.24}$$

IV.4. Simulation de la commande :

IV.4.1. Modèle de commande d'une GADA :

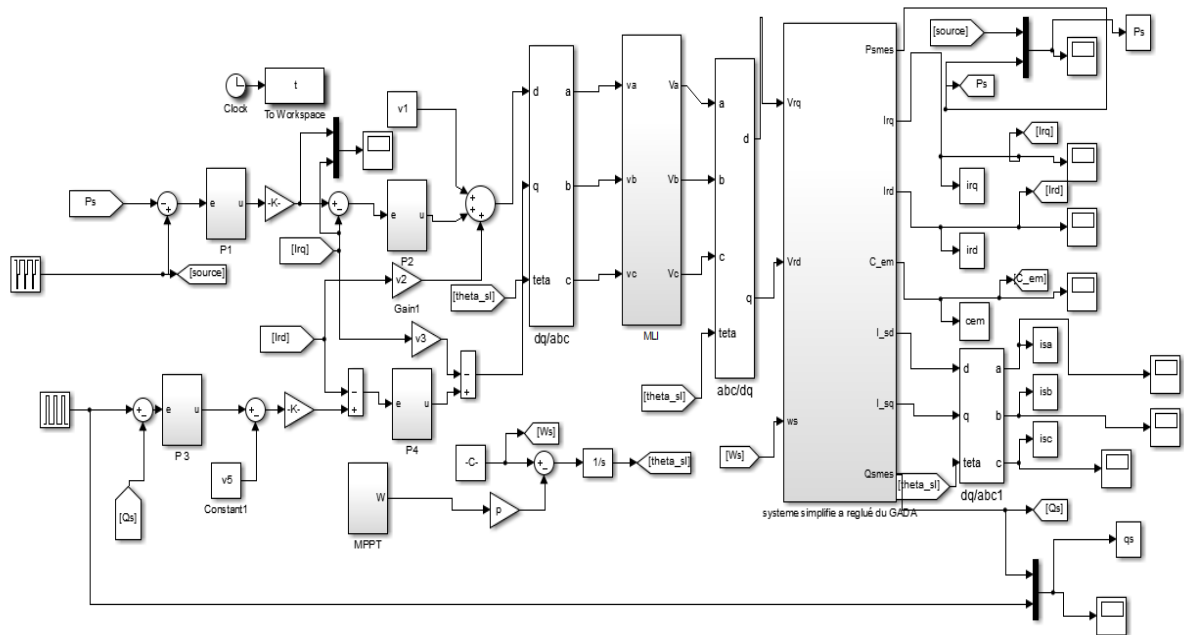


Figure.IV.8: Schéma de simulation de la commande d'une GADA

IV.4.2. Résultats de la simulation

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 obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple.

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

- Entre $t=0.2s$ et $t=0.4s$ échelon négative ($P_{réf} = -10000W$);
- Entre $t=0.4s$ et $t=0.6s$ échelon négative ($P_{réf} = -5000W$);
- Entre $t=0.6s$ et $t=1s$ ($P = 0$);

La puissance réactive :

- Entre $t=0.2s$ et $t=0.6s$ échelon positif ($Q_{réf} = 10000W$);
- Entre $t=0.6s$ et $t=1s$ ($Q_{réf} = 0$).

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

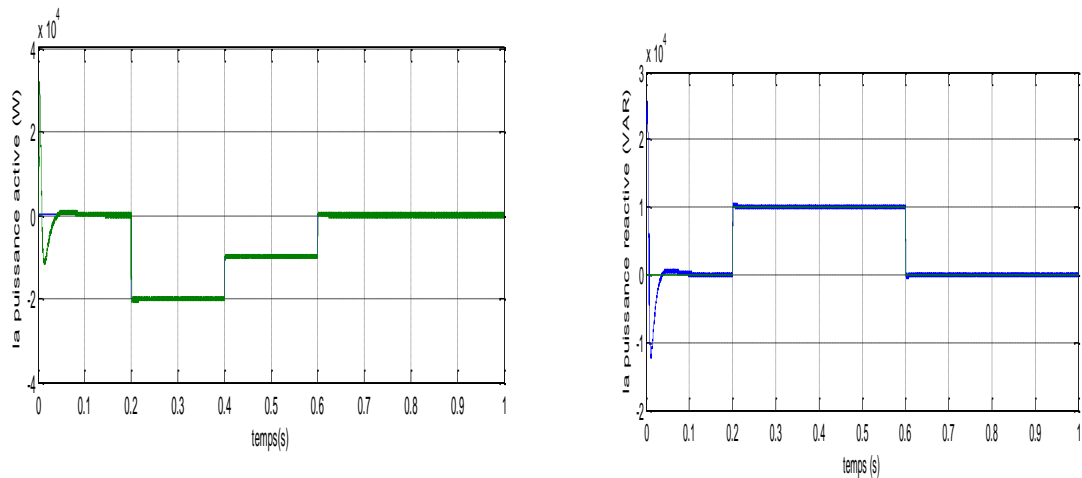


Figure. IV.9: La puissance active et réactive statorique avec ses références.

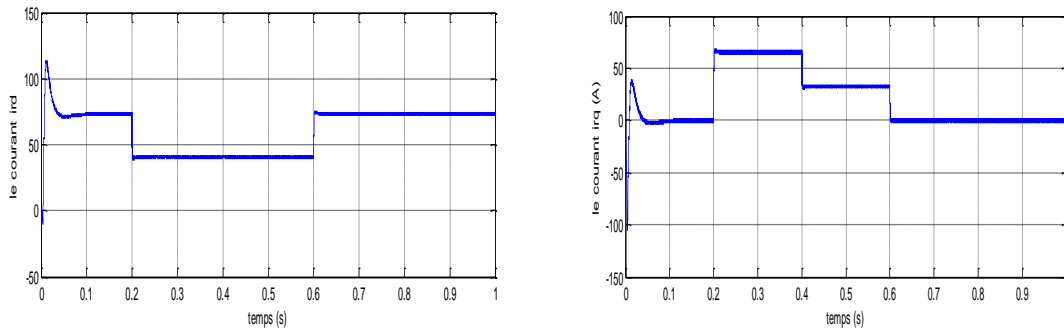


Figure.IV.10: Les deux composantes du courant rotorique.

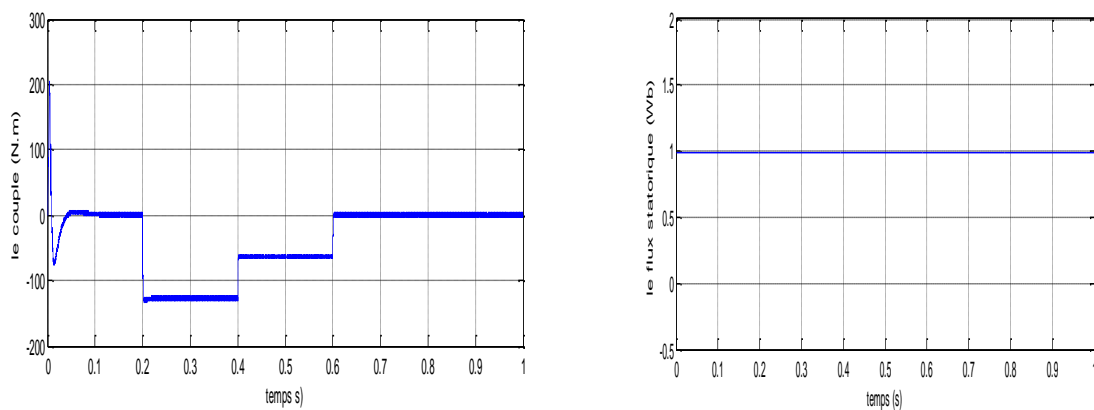


Figure.IV.11: Couple électromagnétique C_e (N.m)

Figure.IV.12: Le flux statorique(Wb).

IV.4.3. Interprétation des résultats

Les échelons de références de puissances imposées à la GADA sont bien suivis et sans dépassement avec faibles oscillations en régime transitoire qui sont dues à l'effet des variations de Ω sur P_s et sur Q_s , ainsi que de P_s sur Q_s , de plus le couplage entre les deux puissances est très faible

Donc :

- Les deux puissances présentent une robustesse acceptable malgré la simplicité des régulateurs applique qui sont de type PI.
- La puissance active du côté statorique est négative entre les instant $t=0.2s$ et $t=0.6s$ ce quisignifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA.

- La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.
- Les oscillations des différentes grandeurs sont dues à la présence de l'onduleur.

IV.5. Conclusion:

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation puissance active et réactive.

A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet 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. A la fin de ce chapitre on a présente les résultats de simulation de la commande.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail est d'étudier par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrone double alimentation qui peut être utilisée dans la production de l'énergie éolienne.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Ensuite on a présenté les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne.

Dans le deuxième chapitre, on a établi le modèle mathématique des éléments principaux constituant la chaîne de conversion électromécanique dans l'éolienne. Nous sommes intéressés à l'étude de la partie mécanique de l'éolienne et à sa commande. Nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite. Les résultats de simulation d'un algorithme ont montré l'efficacité du contrôle pour la poursuite du point de fonctionnement optimal. Ensuite, les aspects théoriques, les différentes applications et la modélisation de la machine électrique double alimentation sont été décrites. On a proposé ensuite l'asservissement d'un redresseur MLI à deux niveaux comme dispositif pour générer la source de tension pour l'alimentation de l'onduleur à deux niveaux. La deuxième série de simulations est effectuée avec onduleur, La troisième est effectuée avec convertisseur.

La génératrice asynchrone est destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le troisième chapitre est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Dans le dernier chapitre, la commande vectorielle élaborée est en puissance active et réactive statoriques puisque le terme de puissance est très utilisé dans le domaine la production d'énergie par éolien. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue.

Références bibliographiques :

- [1] : M. T LATRECHE, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012.
- [2] : A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy . 11/12/2006
- [3] : F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014
- [4] 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.
- [5] Vidal. P. E, "Commande non Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, "Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Motor Operating'', ICEM Proceedings, Spain,1996.

[16] 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.

[17] 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.

[18]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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Kelber. C, Schumacher. W “ Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machine”, Proc. VSSH European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [27] Kelber. C, Schumacher. W, “Control of Doubly-Fed Induction Machines as an Adjustable Speed Motor/Generator”, Proc. VSSH European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [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 engineering, Vol. 3, N° 3, pp. 373-378, December 2001.
- [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] : Farid MERRAHI, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) » Thèse de Magister Ecole Nationale polytechnique Soutenu publiquement le 30/06/2007.
- [32] : BELMOUMENE Imad, « Etude des générateurs éoliens bases sur les machines asynchrones et synchrones » Thèse de Master en maitrise des énergies Université de Batna 2012.
- [33] : DOUADI Tarek, « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone » Thèse de Magister en Electrotechnique Option : Maîtrise d'énergie université de Batna 2010.

- [34]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.
- [35]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.
- [36]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.
- [37]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.
- [38]Pettersson.A and S. Lundberg, “Energy efficiency comparison of electrical systems for wind turbines”, in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie/2002), Stockholm, Sweden, 12-14 Aug. 2002.
- [39]Armand BOYETTE ,« Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » ‘Thèse de doctorat l’Université Henri Poincaré, Nancy 2009.
- [40] Milutin G. Jovanovic* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016,
- [48]Armand BOYETTE ,« Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » ‘Thèse de doctorat l’Université Henri Poincaré, Nancy 2009.
- [41] : SAKI ALI, BELAIDI MOURAD « Étude d’un Générateur Asynchrone dans La Production d’Energie Electrique par Eolienne », PFE d’Ingénieur d’Etat Ecole Nationale Polytechnique 2006.
- [42] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, « Introduction à l’électrotechnique approfondie», Technique et documentation, Paris, ISBN 2-85206-089-2, 1981.

- [43] B. BELTRAN «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre Supérieur» Thèse Doctorat de Université De Bretagne Occidentale ; soutenue le 6 juillet 2010.
- [44] A. Chaiba, “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.
- [45] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques,” Presses de l’Université de Batna, 1997.
- [46] Y. Djeriri , " Commande Par Réseaux de Neurones d’une MADA Intégrée à un Système Eolien " , Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés ,2009.
- [47] C. BELFEDAL, " Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue de son application dans le domaine de l’énergie éolienne ", thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, Décembre 2007.
- [48] 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
- [49]: F. MERRAHI, "Alimentation et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l’énergie éolienne)", mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique. 30/06/2007.
- [50] Global Wind Energy Council, « *Global Wind 2008 Report.* », disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [51] Sejr KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d’une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) ». Thèse doctorat, L’institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [52] F. KHATOUNIAN', E. MONMASSON, F. BERTHEREAU, E. DELALEAU, J.P. LOUIS, « Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application ». Univenité de Cergy, France.
- [53] : KENDOULI Fairouz, « Centrale éolienne et qualité de l’énergie électrique », Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2012.

- [54] Y. Djeriri , " Commande Par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégrée à un Système Eolien " , Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbès ,2009.
- [55] : KHETTACHE LAID, « Étude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée » Thèse de Magister Université de Batna 2007.
- [56] : Dr A. Meroufel, « Contrôle de la machine asynchrone » Université Djillali Liabès Sidi Bel-Abbès 2008/2009.
- [57] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [58] Omar BOUHALI, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [59]. N. P. QUANG, J.-A. DITTRICH. « Vector control of three-phase ac machines » Springer, 2008.
- [60] E. Mamdani, "An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller," International Journal on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 311-323, 1975.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] F.Akel , "Etude et Realisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2009.
- [64] S. Metatla," Optimisation et Régulation des Puissances d'une Eolienne à Base d'une MADA " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique.2009.
- [65] N.Mekkaoui , " Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ". Mémoire de Magister Université de Batna ,2004 .
- [66] A.Dendouga , "Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG) ". Mémoire de Magister Université de Batna , 2010 .

Annexe: Paramètres utilisés:

Paramètre de la machine :

- Valeurs nominales : 1MW ; 690V/15KV ; 50Hz ;
- R_s (Résistance du stator) = 0.012 Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 0.021 Ω
- L_s (Inductance stator) = 0.0137 H
- L_r (Inductance du rotor) = 0.0137 H
- M (Inductance Mutuelle) = 0.135 H
- $P = 2$;

Paramètres de la turbine:

- Nombre de pales : $P = 3$
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 35$ m
- Gain du multiplicateur : $G = 70$
- Moment d'inertie de la turbine : $J_{\text{turbine}} = 256$ kg. m²
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.0024$ N.m.s/rd
- Densité de l'air : 1.23 Kg/ m