



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie



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

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : commande électriques

Thème

**Modélisation et commande d'une
générateur asynchrone à double
alimentation pour production éolienne**

Réalisé par

- **Benati Abdelhak**
- **Sila Abderrahim**
- **Taabli Okba**

Encadré par :

Dr. Guediri Abdelkarim

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Remerciements Je remercie avant tous ALLAH pour son aide, ses innombrables dons, ALLAH qui m'a donné la force, la volonté et le moral pour accomplir mes études en master en électrotechnique.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreuse **Dr. Guediri Abdelkarim** pour avoir d'abord proposer ce thème, pour son suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qu'elle n'a pas cessée de me donner ses conseils.

Mes vifs remerciements vont également à **Mr. Hetiri** chef de département de Génie Electrique pour ses qualités humaines. Je remercie très vivement tous mes Enseignants au département de Génie Electrique.

Mes remerciements vont au président du jury et aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

Je remercie évidemment mes parents, mes frères et sœurs, qui depuis de si longues années, m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

DEDICACE

A mes très chers parents;

A mes frères et mes sœurs;

A toute ma famille ;

A tous mes amis ;

A tous mes collègues;

A tous ceux que j'ai connus durant toute la période
d'études;

A tous ceux qui je compte sur eux et qui comptent sur
moi;

Je dédie ce travail

Abdelhak berati

DEDICACE

Nous dédions ce modeste travail a :

En premier lieux ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour notre éducation et notre bien-être à nos parents qui se sont sacrifiés pour nous prendre en charge tout au long de notre formation et qui sont l'origine de notre réussite que dieu les garde et les protèges.

A notre famille et nos chers amis qui nous accorde leur soutien dans les instants les plus difficiles.

Tous nos formateurs et toute l'équipe pédagogique et administrative de univ el oued pour l'aide qu'ils ont toujours porte aux étudiants.

Toute personne qui de près ou de loin a participé à notre formation.

Abderrhim sila

DEDICACE

Tout d'abord, à mes chers parents qui m'ont soutenu tout au long de ces longues études, « Que Dieu les sauve », à mes chers frères et sœurs. Pour tous les membres de la famille TAABLI.

A mes collègues du département de génie électrique.

Tous mes amis.

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser cette thèse.

Aux gens que j'aime, aux gens qui m'aiment et me respectent. A tous les professeurs qui ont contribué à ma formation durant mes études jusqu'à ce jour.

Je dédie cet humble travail.

Okba taabli

Résumé

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude d'une commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui peut être introduite dans un système éolien. Le premier chapitre présente généralités sur les éoliennes, les différents type des turbines éolienne et les machines utilisées dans systèmes éolienne , nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne est détaillée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre nous avons présenté la modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA). Le quatrième chapitre présenter la commande de puissance active et réactive.

Mots des clés: Génératrice, asynchrone à double alimentation "GADA", Modulation de largeur d'impulsion "MLI", Turbine eolienne, Modélisation "MADA" Commande Vectorielle.

Abstract :

In this thesis, we expose the study of a doubly fed induction generator control (DFIG) which maybe integrated in wind system. The first chapter presented a state of the art on the wind mills, the various structures of feeding and the type of generator used, we chose the asynchronous generator with double power. The modeling of mechanical part of the wind system and the asynchronous generator with double power is detailed in the second chapter. In the third chapter, we presented the modeling of adoubly fed induction generator control (DFIG).The fourth chapter presents active and reactive power control.

key words: Generator, asynchronous with dual power supply " GADA ", Pulse width modulation " PWM ", Wind turbine, Modeling " MADA " Vector control.

ملخص:

في هذه المذكرة ،نعرض دراسة للتحكم في المولد اللاتزامني مزدوج التغذية و الذي يمكن توصيله بنظام توليد طاقة الرياح. الفصل الأول يعرض الحالة الفنية للناعورة الهوائية، مختلف بنيات التغذية و نوع المولدات المستعملة، حيث وقع اختيارنا على المولد اللاتزامني مزدوج التغذية و التحكم فيه من خلال متغيرات الدوار. في الفصل الثاني قمنا بنموذجة الجزء الميكانيكي لنظام توليد طاقة الرياح ام الفصل الثالث قمنا بنموذجة المولد اللاتزامني مزدوج التغذية . الفصل الرابع يعرض التحكم في المولد اللاتزامني مزدوج التغذية موصول بنظام توليد طاقة الرياح الكلمات المفتاحية: مولد ، غير متزامن مع مصدر طاقة مزدوج " GADA " ، تعديل عرض النبض " PWM " ، توربينات الرياح ، نموذجة " MADA " التحكم في المتجهات.

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE.....	II
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VI
TABLE DE FIGURES	IX
NOTATIONS ET SYMBOLES	XI
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	XV

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I	INTRODUCTION	1
I.1	DÉFINITION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	1
I.2	LES DIFFÉRENTS TYPES DES TURBINES ÉOLIENNE	2
I.2.1	Les éoliennes à axes horizontal	2
I.2.2	Les éoliennes à axes vertical.....	3
I.3	LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS D'ÉOLIEN	4
I.3.1	Avantages de l'éolien	4
I.3.2	Inconvénients de l'éolien.....	4
I.4	LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE ÉOLIENNE.....	4
I.5	L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN ALGÉRIE	6
I.6	SYSTÈMES DE RÉGULATION DE LA VITESSE DE ROTATION DE L'ÉOLIENNE PRINCIPE	8
I.6.1	Système à décrochage aérodynamique "Stall".....	8
I.6.2	Système d'orientation des pales « <i>Pitch</i> »	8
I.7	ÉTAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE	9
I.8	CONVERSION D'ÉNERGIE MÉCANIQUE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	9
I.8.1	Fonctionnement à vitesse fixe	10
I.9	MACHINE UTILISEES DANS LE SYSTEM EOLIENNE	10
I.9.1	Machine asynchrone à cage d'écureuil	10
I.9.2	Machine asynchrone à double stator.....	12
I.9.3	Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	12
I.9.4	Machine asynchrone à double alimentation type "brushless".....	13
I.9.5	Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".....	14
I.9.5.1	Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	14
I.9.5.2	Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	15
I.9.5.3	Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	15

I.9.5.4 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	16
I.9.6 Systèmes utilisant la machine synchrone	17
I.9.6.1 Machines synchrones à rotor bobiné	17
I.9.6.2 Machines synchrones à aimants permanents	17
CONCLUSION.....	18

CHAPITRE II: MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

II INTRODUCTION	18
II.1 MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE DE L'EOLIENNE.....	18
II.1.1 Loi de BETZ.....	18
II.1.2 Production d'énergie mécanique	21
II.2 MODÈLE DE LA TURBINE.....	22
II.2.1 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	24
II.2.2 Equation dynamique de l'arbre	24
II.2.3 Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK.....	25
II.3 STRATÉGIE DE COMMANDE D'UNE ÉOLIENNE	26
II.4 MÉTHODES DE RECHERCHE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE	27
II.4.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	29
II.5 RÉSULTATS OBTENUS.....	32
II.6 INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS	35
CONCLUSION.....	35

CHAPITRE III: MODELISATION DE LA GENERATEUR ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (GADA)

III INTRODUCTION.....	35
III.1 DESCRIPTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION.....	35
III.1.1 Mode de fonctionnement de MADA :.....	36
III 1.1.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone:.....	36
III 1.1.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone:.....	37
III.1.1.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :	37
III.1.1.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:	38
III.2 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA GADA :.....	39
III.3 APPLICATION DES MACHINES ASYNCHRONES À DOUBLE ALIMENTATION :	41
III.3.1 . Application moteur :	41
III.3.2 Application génératrice :.....	41
III.4 -HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES.....	42
III.5 MODÉLISATION DE LA GÉNÉRATEUR ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION (GADA) 42	
III.5.1 Représentation de la GADA dans repère triphasé (<i>abc</i>) :.....	42
III.5.1.1 Équations électriques.....	43
III.5.1.2 Equations magnétiques :.....	43
III.5.2 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park).....	43
III.5.3 Choix du référentiel	44
III.5.3.1 Référentiel lié au stator.....	45
III.5.3.2 Référentiel lié au rotor.....	45
III.5.3.3 Référentiel lié au champ tournant.....	45
III.5.4 Application de la transformation de Park à la GADA	45
III.5.5 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq).....	46
III.5.6 Expression de la puissance active et réactive	47
III.5.7 Expression du couple électromagnétique :	48
III.5.8 Résultats de la Simulation	48
CONCLUSION.....	53

CHAPITRE IV: COMMANDE DES PUISSANCES ACTIVES ET REACTIVES DE LA GADA

IV	INTRODUCTION.....	51
IV.1	LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA.....	51
IV.1.1	Le principe de la commande vectorielle de la GADA.....	51
IV.1.2	Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique	52
IV.2	SCHÉMA BLOC RÉDUIT DE LA MADA	56
IV.3	TYPES DE COMMANDE DE LA MADA.....	56
IV.3.1	Commande directe.....	57
IV.3.1.1	.Synthèse des régulateurs PI.....	57
IV.3.2	Commande indirecte.....	59
IV.3.2.1	Commande indirecte en boucle ouverte	59
IV.3.2.2	Commande indirecte en boucle fermée	60
IV.4	CONVERTISSEUR MLI.....	61
IV.4.1	Onduleur a deux niveaux	61
IV.4.2	Principe de la MLI.....	63
IV.4.3	Algorithme de commande.....	64
IV.5	SIMULATION DU SYSTÈME AVEC ONDULEUR	65
IV.6	RÉSULTATS DE LA SIMULATION	65
IV.6.1	Modèle de commande d'une GADA :	66
IV.6.2	Résultats.....	67
IV.7	INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS.....	69
	CONCLUSION	70
	CONCLUSION GÉNÉRALE	XVI
	BIBLIOGRAPHIE	XVIII
	ANNEXE A :	XXII
	ANNEXE .B :	XXIII

Table de figures

Figure I-1:Schéma de principe d'une éolienne	1
Figure I-2:éolienne a axe horizontal	3
Figure I-3:Eoliennes à axe Vertical	3
Figure I-4:Les composantes d'une éolienne	4
Figure I-5:Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne	6
Figure I-6: Cartographique des grandes régions de vent en Algérie	7
Figure I-7 Flux d'air sur un profil de pale " Stall"	8
Figure I-8 Variation de l'angle de calage d'une pale	9
Figure I-9 Flux d'air sur un profil de pale " Stall "	9
Figure I-10 Eolienne à base d'une MAS connectée au réseau	10
Figure I-11 Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone	11
Figure I-12 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	11
Figure I-13 Machine asynchrone à double stator	12
Figure I-14 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	13
Figure I-15 Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless	13
Figure I-16 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.	13
Figure I-17 Machine asynchrone à rotor bobiné	14
Figure I-18 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	15
Figure I-19 Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer	15
Figure I-20 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	16
Figure I-21 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	17
Figure II-1 Schéma de la turbine éolienne	18
Figure II-2: Tube de courant autour d'une éolienne	19
Figure II-3:Coefficient de puissance	20
Figure II-4:Coefficient de puissance pour différents types éoliennes	21
Figure II-5 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	22
Figure II-6 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine	23
Figure II-7 Modèle mécanique du multiplicateur	24

Figure II-8 Modèle du couplage mécanique entre l'aéroturbine et le générateur.	25
Figure II-9 Schéma bloc du modèle de la turbine.	25
Figure II-10 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.	25
Figure II-11 Caractéristiques puissance, vitesse de vent	26
Figure II-12 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne .	27
Figure II-13 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	28
Figure II-14 Stratégies de commande de la turbine.	28
Figure II-15 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite	30
Figure II-16 La représentation sous forme de schéma-blocs	31
Figure II-17 profil du vent	32
Figure II-18- Coefficient de puissance	32
Figure II-19 Coefficient de puissance avec zome	33
Figure II-20- Vitesse mécanique (tr/min)	خطأ! الإشارة المرجعية غير معروفة.
Figure II-21- Vitesse mécanique (red/s)	خطأ! الإشارة المرجعية غير معروفة.
Figure II-22- Puissance mécanique produite par turbine.	34
Figure II-23- Couple électromagnétique	35
Figure III-1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA	36
Figure III-2:Le fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	37
Figure III-3-Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	37
Figure III-4:Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	38
Figure III-5:Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	38
Figure III-6:Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA	39
Figure III-7: Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage	40
Figure III-8 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique	42
Figure III-9 Passage du triphasé au biphasé et l'inverse	44
Figure III-10 Schéma bloque de la modèle de GADA	49
Figure III-11- Courbe du courant statorique	50
Figure III-12-Courbe du courant rotorique	50
Figure III-13- Courbe de la tension statorique	51
Figure III-14-Courbe de la tension rotorique	51
Figure III-15-Courbe de la puissance active statorique	52
Figure III-16- Courbe de la puissance réactive statorique	52
Figure III-17- Courbe de la couple	53
Figure IV-1 Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA	52
Figure IV-2 Orientation de la tension et de flux statorique	53
Figure IV-3 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne).	56
Figure IV-4 Schéma de principe de la commande directe	57
Figure IV-5 Schéma bloc d'un système régulé par un PI	58
Figure IV-6 Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte	59
Figure IV-7 Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	60
Figure IV-8 Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI	61
Figure IV-9 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.	62

Figure IV-10 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse_	64
Figure IV-11 Tension rotorique ondulé _____	65
Figure IV-12 Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA avec onduleur _____	65
Figure IV-13 Shéma de simulatoïn de la commande d'une GADA _____	66
Figure IV14- Courbe de la puissance active statorique avec ses référence _____	67
Figure IV15- Courbe de la puissance réactive statorique avec ses références _____	67
Figure IV16- Courbe de la courant (Ird) _____	68
Figure IV17-Courbe de la courant (Irq) _____	68
Figure IV18- couple électromagnétique cem (N.m) _____	69

Notations et symboles

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La vitesse de synchronisme

$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
v	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$J_{pale}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h(kg.m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre
Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
Dg	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
Db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E[J]$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref}[N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}[N.m]$	Couple aérodynamique estimé
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d

θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{coord}	Angle coordonnée
E_r [V]	f e m au rotor
E_s [V]	f e m au stator
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
S_s [VA]	La puissance apparente au stator
S_r [VA]	La puissance apparente au rotor
P_s [W]	La puissance active au stator
P_r [W]	La puissance active au rotor
Q_s [VAR]	La puissance réactive au stator
Q_r [VAR]	La puissance réactive au rotor
g	Glissement
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)
$[M_{rs}]$	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique
V [V]	Tension
I [A]	Courant
φ [Wb]	Flux
M [H]	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)

l_s [H]	Inductance propre de chaque enroulement du stator
l_r [H]	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
M_s [H]	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
M_r [H]	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d, q
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d, q
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d, q
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d, q
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d, q
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d, q
s	Opérateur dérivé de Laplace
p	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique
F_r	Fréquence de rotor
F_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Ouvert
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée
PI	Proportionnel – Intégrale

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socioéconomique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Il est nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui, résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont: l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon). Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le mémoire que nous vous présentons décrit une étude sur l'utilisation des machines asynchrones dans un système éolien

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens et leur évolution dans le temps, les concepts physiques régissant leur fonctionnement, suivis d'un rappel des différentes configurations possibles des systèmes éoliens et les convertisseurs qui leur sont associés.

I.1 Définition de l'énergie éolienne

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

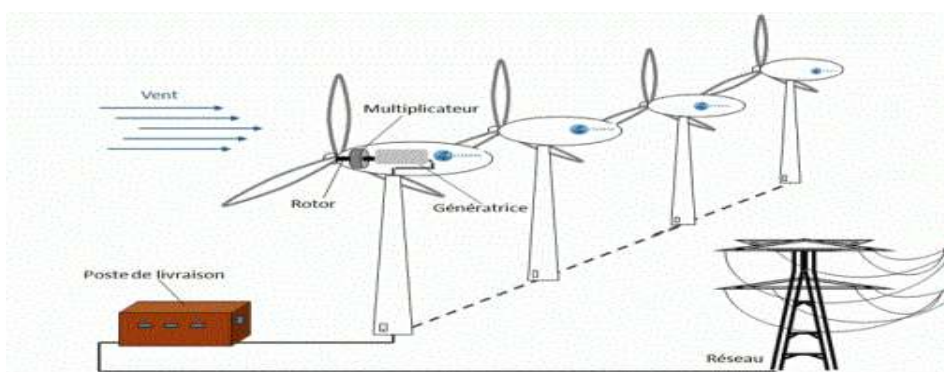


Figure I-1:Schéma de principe d'une éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée, 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 dimension (jusqu'à 60 m pour des éolienne de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées éviter les phénomènes de turbulences. [2]

I.2 Les différents types des turbines éolienne

Est solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal

I.2.1 Les éoliennes à axes horizontal

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



Figure I-2:éolienne a axe horizontal

I.2.2 Les éoliennes à axes vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation. [3]



a- Eolienne de type Savonius



b- Eolienne de type Darrieus

Figure I-3:Eoliennes à axe Vertical

I.3 Les avantages et inconvénients d'éolien

I.3.1 Avantages de l'éolien

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement peu de sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.
- Une énergie renouvelable : Contrairement aux énergies fossiles.
- Une énergie sans risque : Contrairement à l'énergie nucléaire.
- Une énergie qui n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces

I.3.2 Inconvénients de l'éolien

- Impact visuel qui reste un thème subjectif
- Le bruit d'une éolienne a une double source : d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle
- L'impact sur les oiseaux : des collisions au niveau du mât, des pâles, des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

I.4 Les principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux figure (I.4) :

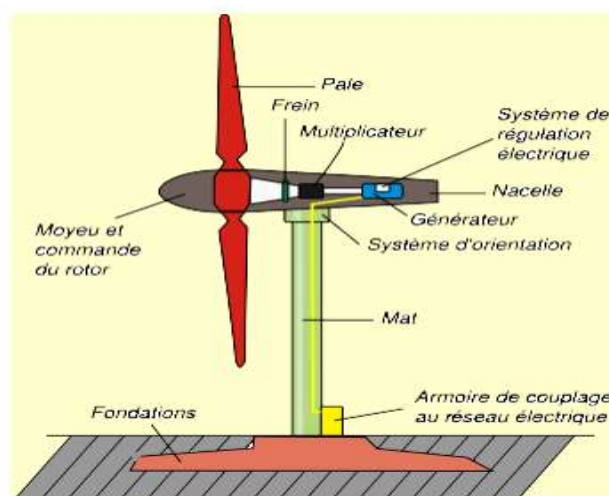


Figure I-4: Les composants d'une éolienne

1) Le mât

Généralement un tube d'acier, ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la qualité de matière mise en œuvre présente un cout non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur. [4]

2) Le rotor (moyeu et pales)

Formé par les pales assemblées avec leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible cout. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins couteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont elles dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [3]

a) Moyeu en générale

C'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. [4]

b) les pales

C'est une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grande.

La nacelle Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydraulique ou électrique d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne Figure (I.5). [4]

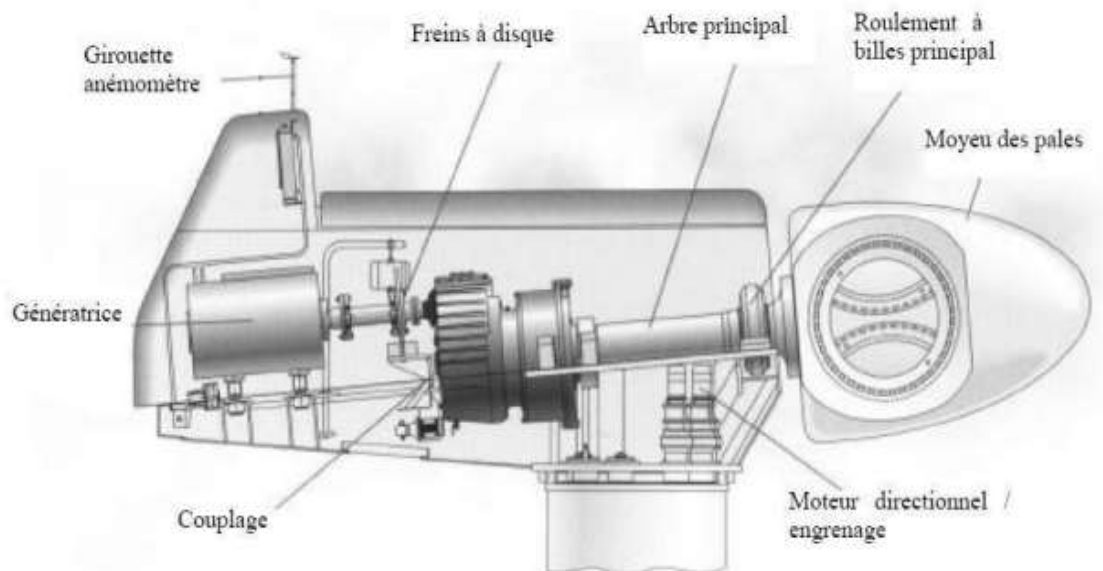


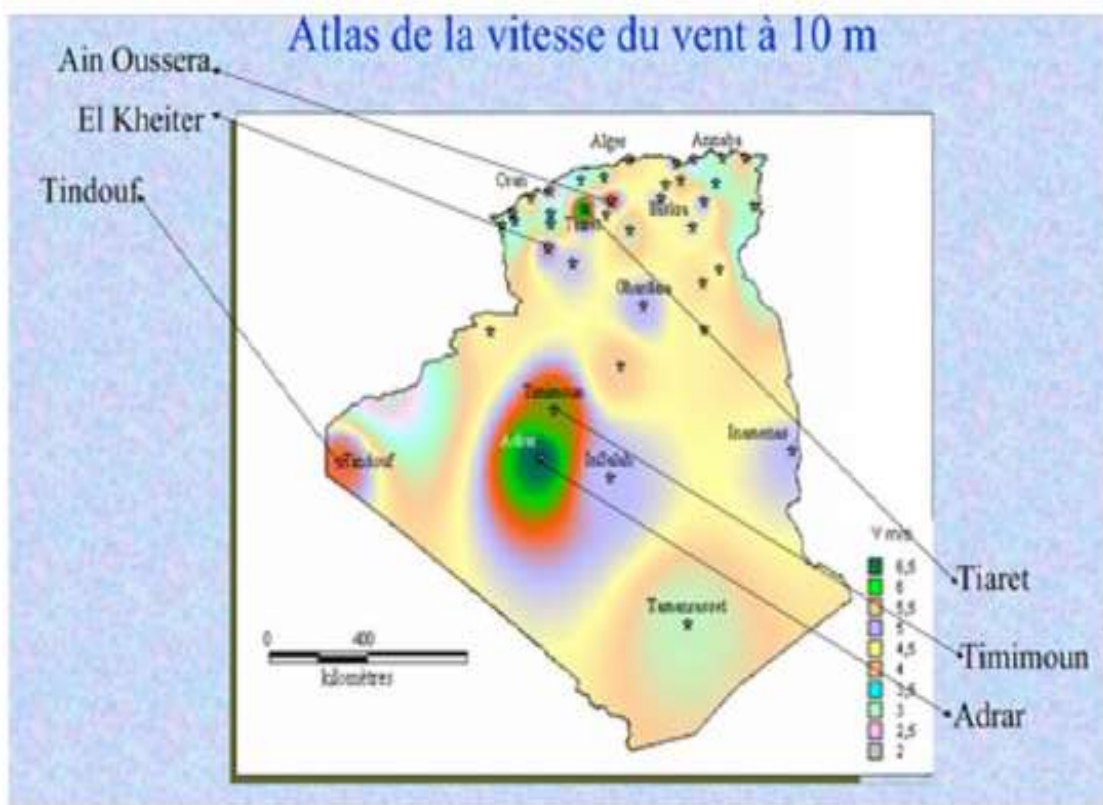
Figure I-5: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

I.5 L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle des vents de l'Algérie. Cette présentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses

d'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers les pays. [2]

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar figure



(I.6)

Figure I-6: Cartographique des grandes régions de vent en Algérie

Cette carte présente les zones les plus ventées pour installer des parcs éoliens qui permet d'alimenter des régions isolées. La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.

I.6 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne Principe

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 [9]

I.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. I.7) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [5].

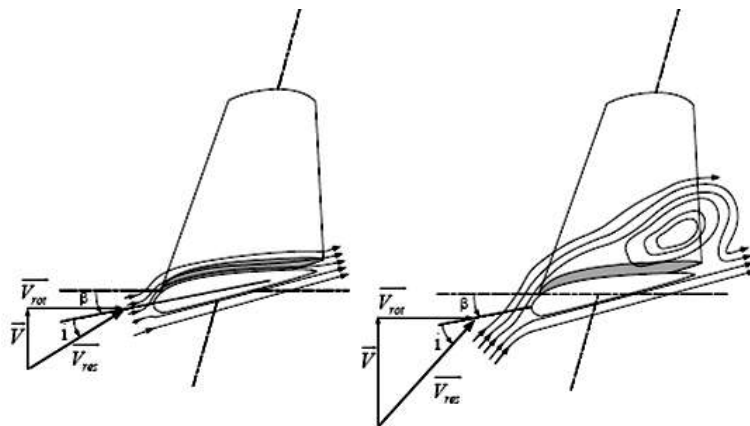


Figure I-7 Flux d'air sur un profil de pale " Stall"

I.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. I.8) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. I.12) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [8]



Figure I-8 Variation de l'angle de calage d'une pale

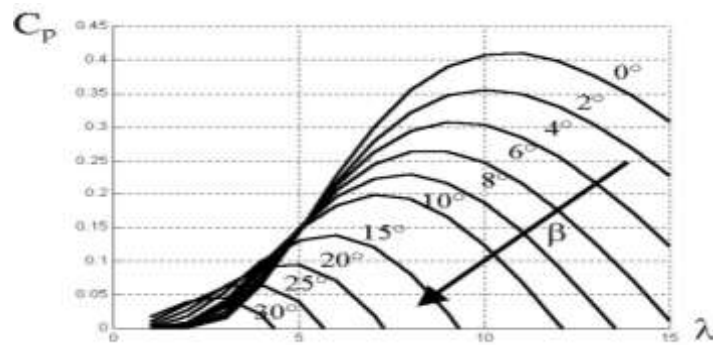


Figure I-9 Flux d'air sur un profil de pale " Stall "

I.7 État de l'art sur la conversion électromécanique

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) 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.

I.8 Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

I.8.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil directement couplée sur le réseau électrique (figure I.9). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales .

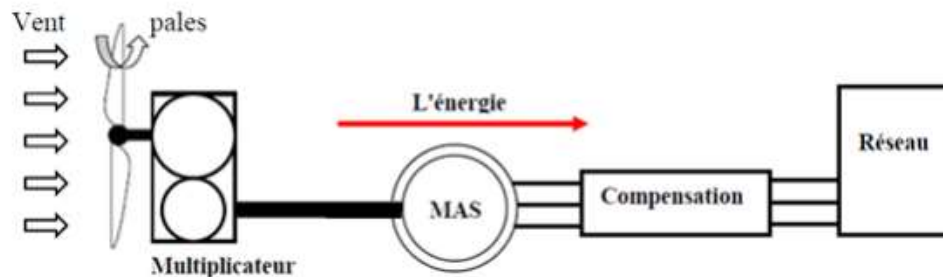


Figure I-10 Eolienne à base d'une MAS connectée au réseau

Parmi ses avantages :

- Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins cher

I.9 Machine utilisées dans le système éolien

I.9.1 Machine asynchrone à cage d'écuréuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écuréuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait

appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [10].

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr/mn$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [11] (figure. I.11).

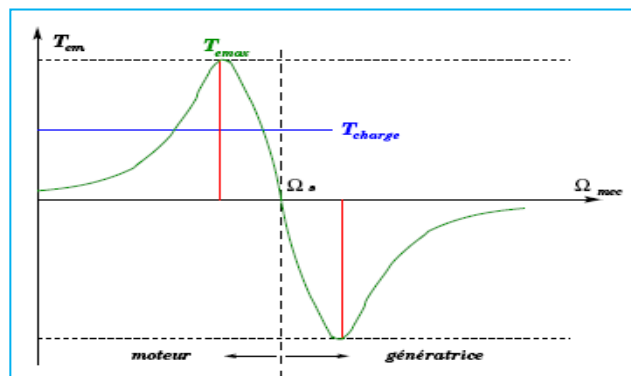


Figure I-11 Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure. I.12 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne

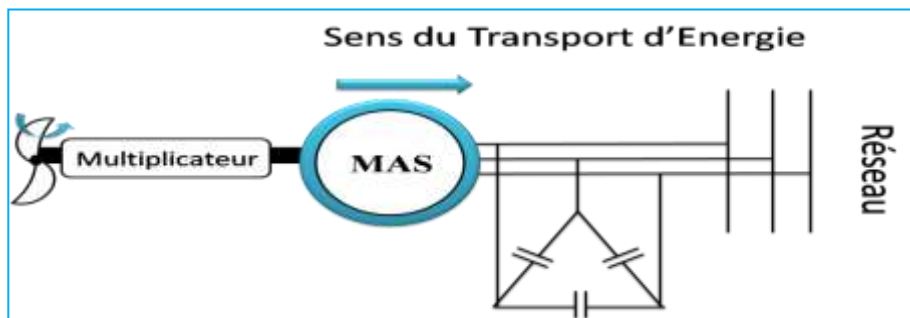


Figure I-12 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et

il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

I.9.2 Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure. 1.13) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble

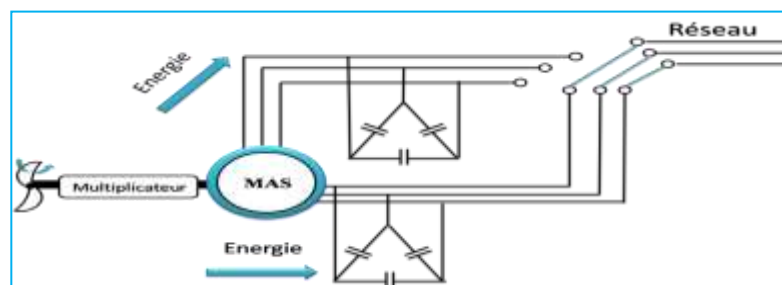


Figure I-13 Machine asynchrone à double stator

I.9.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure. 1.14. 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

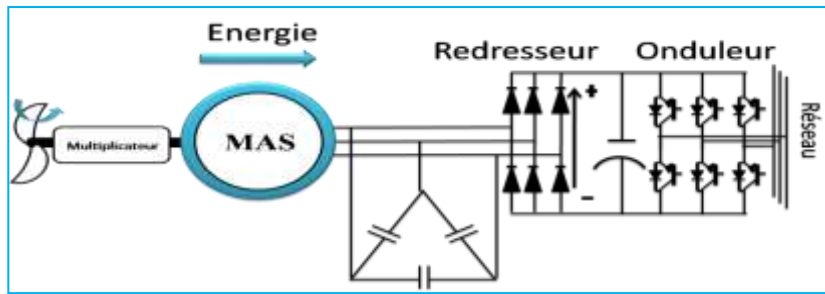


Figure I-14 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.9.4 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

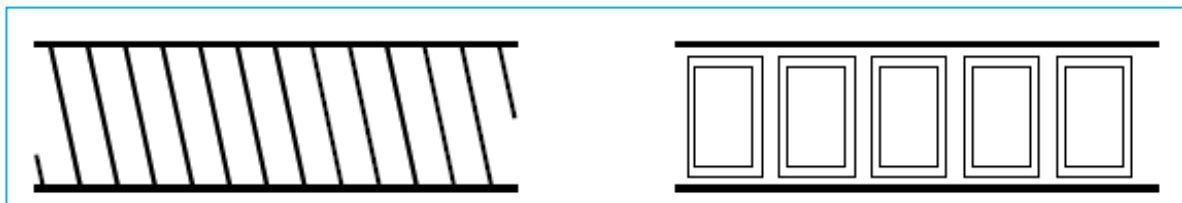


Figure I-15 Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la (Figure. I.16). 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

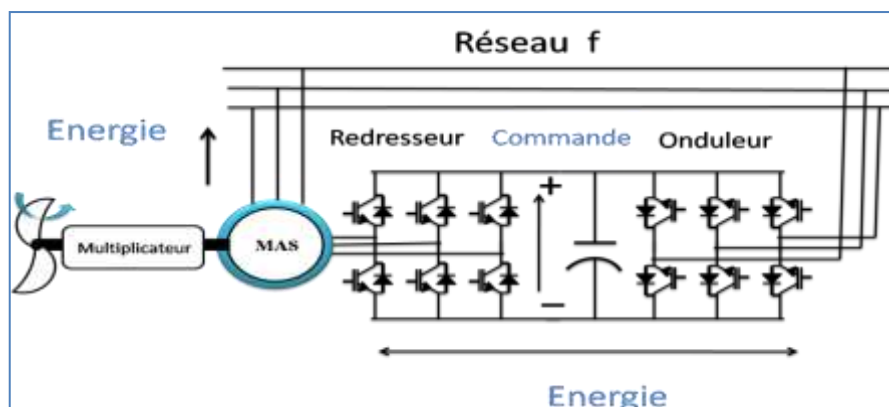


Figure I-16 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I.9.5 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné 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.

Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre 'III' de ce mémoire.



Figure I-17 Machine asynchrone à rotor bobiné

I.9.5.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure. I.18, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [10].

La variation de la vitesse limitée à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor.

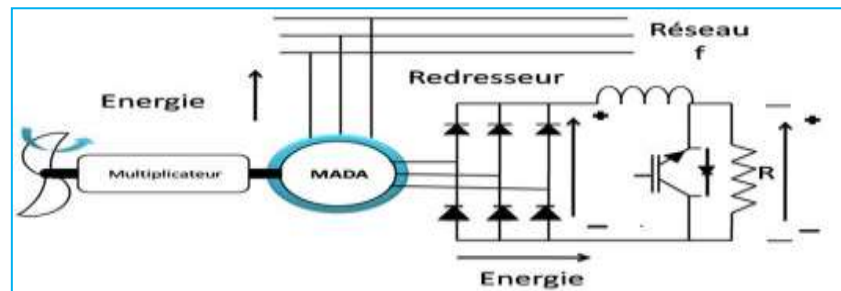


Figure I-18 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

I.9.5.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure. I.20) [10].

L'inconvénient de cette structure est que l'asservissement de la vitesse de la machine n'est pas possible. En plus, l'onduleur triphasé utilisé injecte des courants harmoniques qui sont préjudiciables pour la durée de vie des appareillages électriques raccordés sur le réseau.

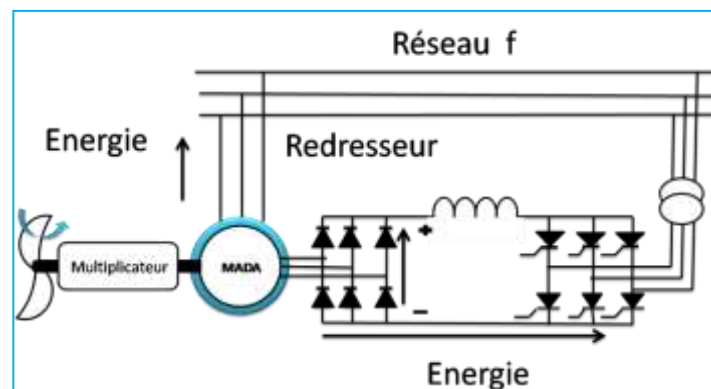


Figure I-19 Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer

I.9.5.3 Machine asynchrone à double alimentation – 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 remplacé par un cycloconvertisseur (Figure. I.21), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure. I.20. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir

l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone)

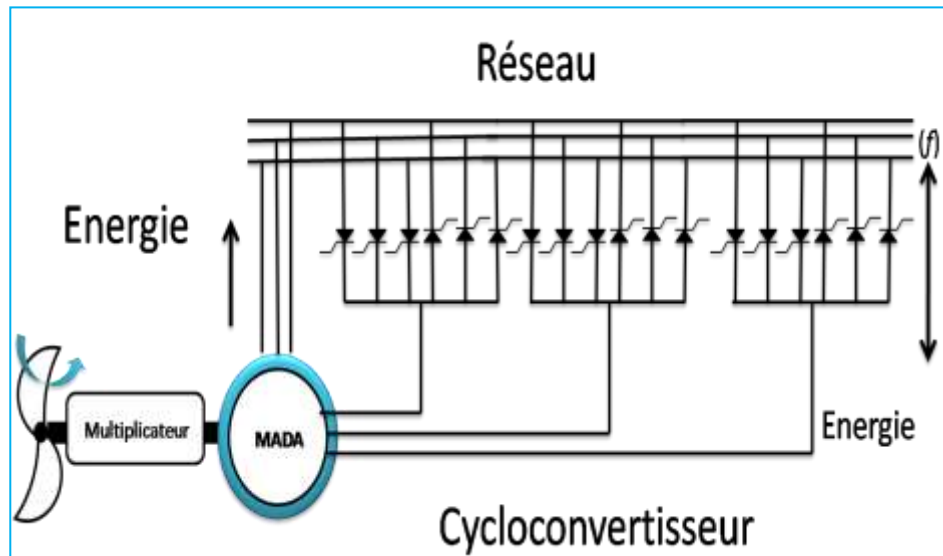


Figure I-20 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

I.9.5.4 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure. 1.21) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés 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 (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme [10].

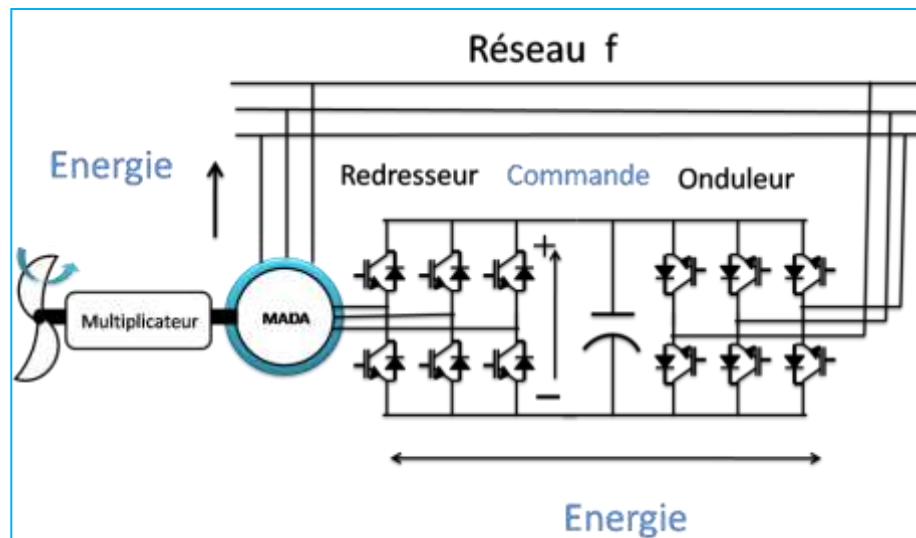


Figure I-21 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

I.9.6 Systèmes utilisant la machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [12]

I.9.6.1 Machines synchrones à rotor bobiné

Font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [12]

I.9.6.2 Machines synchrones à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS.

Le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [12]

Conclusion

Une description de l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme : les méthodes de description du gisement éolien ; les exemples d'architectures qu'on a commencé par les différents capteurs (à axe horizontal, vertical), et les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal ; le rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Les machines électriques, leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien ont été présentées.

MODELISATION DU SYSTEME DE
CONVERSION D'ENERGIE
EOLIENNE

II Introduction

Comme on l'a vu auparavant, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique, ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite, les ont écartées du marché

Alors, dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal tri-pales . Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées et est bien adapté à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici.

II.1 Modelisation de la partie mecanique de l'eolienne

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur R .

Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse $\Omega_{eolienne}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraine une génératrice électrique (Figure II.1)[11].

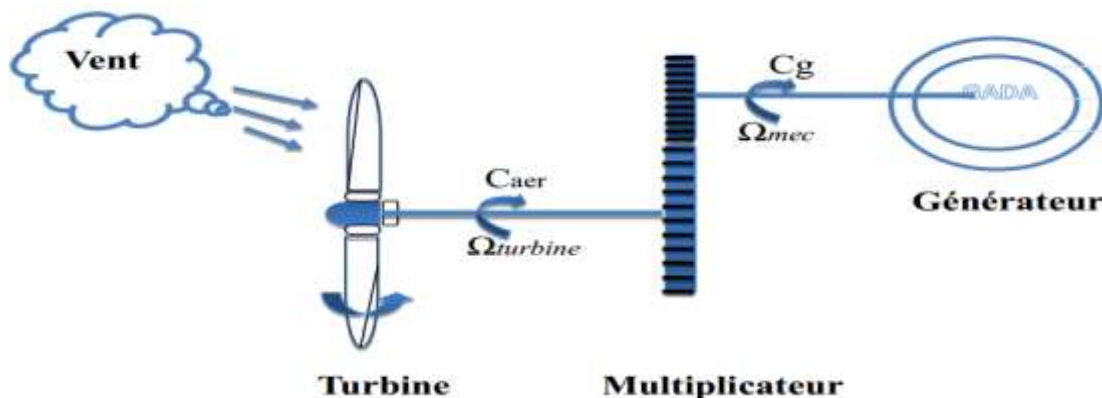


Figure II-1 Schéma de la turbine éolienne

II.1.1 Loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1.7 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:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2}$$

(II.1)

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) :

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

(II.2)

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

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{II.3}$$

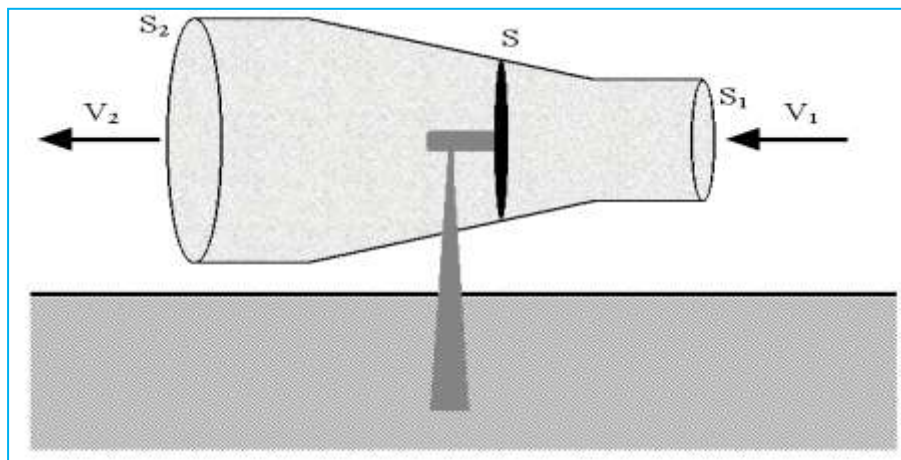


Figure II-2: Tube de courant autour d'une éolienne

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 :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^2}{2}$$

(II.4)

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

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

5)

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. II.3), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [5]

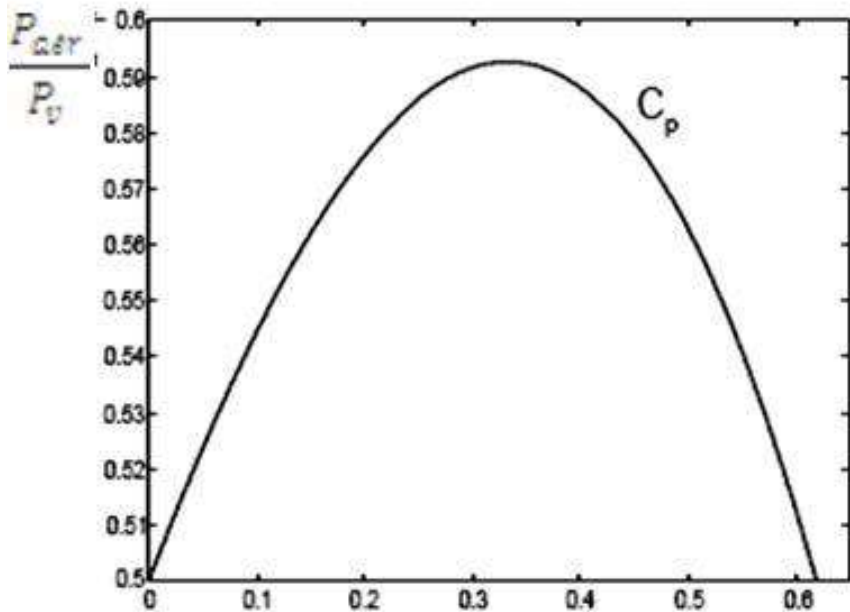


Figure II-3: Coefficient de puissance

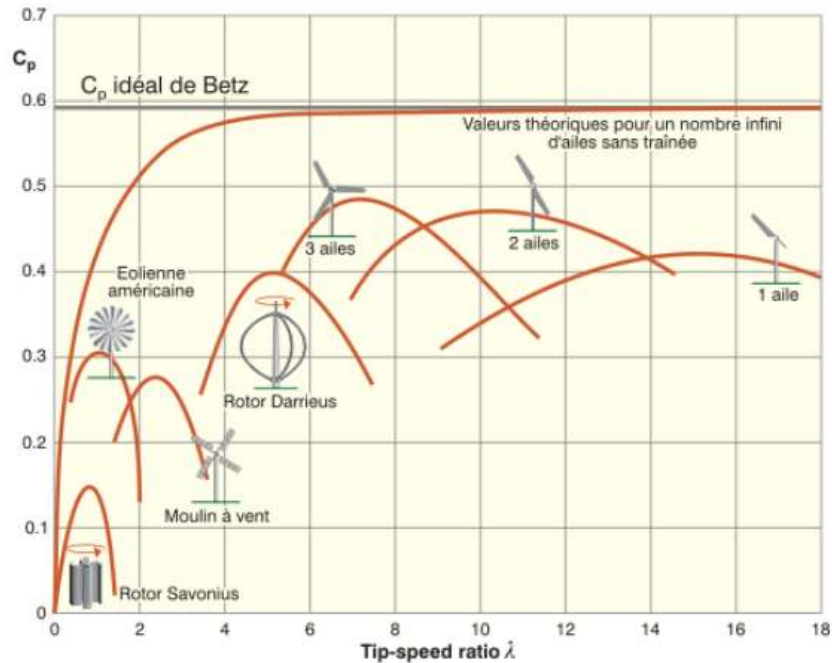


Figure II-4: Coefficient de puissance pour différents types éoliennes

II.1.2 Production d'énergie mécanique

❖ En combinant les équations (II.1), (II.4) et (II.5), la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aér} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.6)$$

❖ Avec $\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1}$:

$$(II.7)$$

❖ 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 :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p\left(\frac{R \cdot \Omega_2}{K \cdot V_1}\right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.8)$$

❖ 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.5).

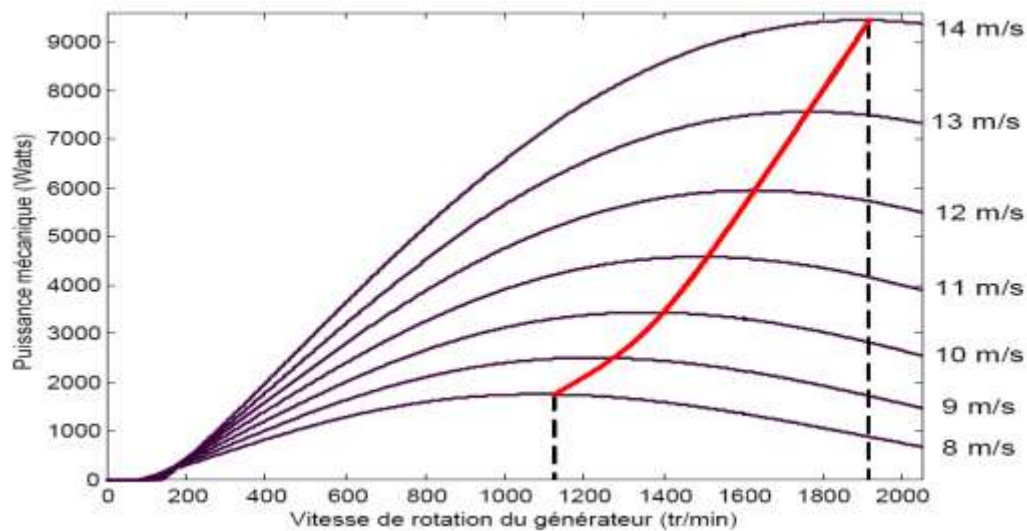


Figure II-5 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

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.I.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 [5].

II.2 Modèle de la turbine

La vitesse du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [2]

$$P_{v=\frac{1}{2}} = \rho S v^3$$

(II.9) Avec :

$$S = R^2 \pi$$

(II.10)

Où:

ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m³ 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.

La puissance extraite par l'éolienne $P_{eolienne}$ peut s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p

$$C_{aer} = \frac{P_{eolienne}}{\Omega}$$

(II.11)

$C_p(\lambda, \beta)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β . A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [2], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [9] :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (II.12)$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales.

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (II.13)$$

Ω : est la vitesse de la turbine.

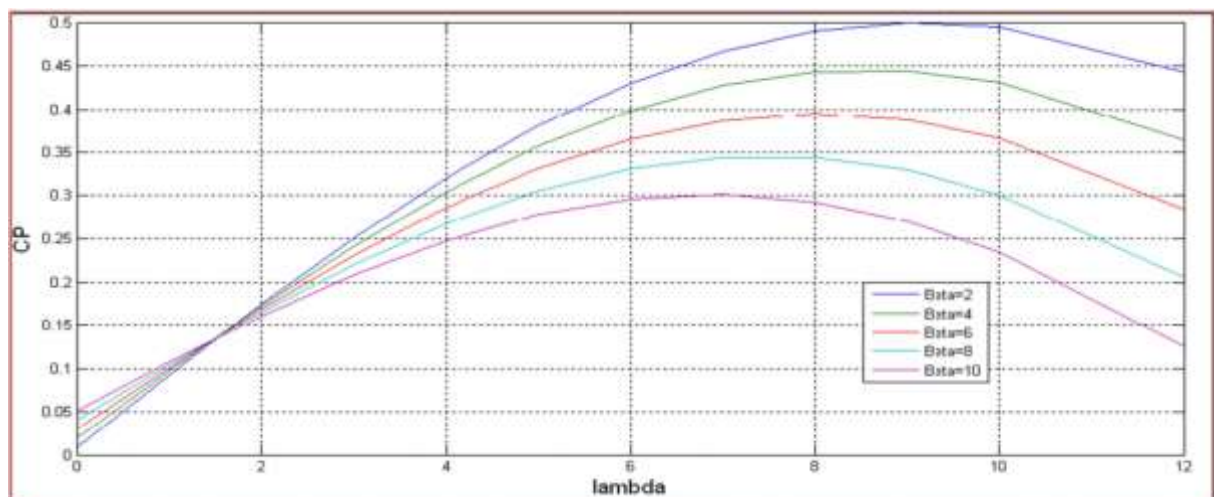


Figure II-6 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

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

$$C_{aer} = \frac{P_{eolienne}}{\Omega} \quad (II.14)$$

II.2.1 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g [15].



Figure II-7 Modèle mécanique du multiplicateur

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [11] :

$$\Omega_{mec} = G\Omega \quad (II.15)$$

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.16)$$

II.2.2 Equation dynamique de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{aer} - f\Omega_{mec} \quad (II.17)$$

f : coefficient de frottement visqueux $N_{m.s/Rad}$

Couple totale d'une éolienne:

$$C_{aer} = C_{mec} + C_{em} \quad (II.18)$$

J : Inertie en (kg.m²).

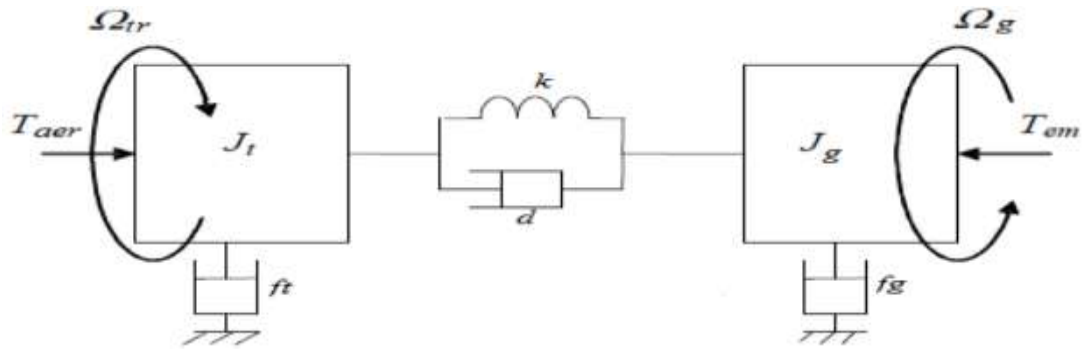


Figure II-8 Modèle du couplage mécanique entre l'aéroturbine et le générateur.

II.2.3 Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK

Le modèle de la turbine se déduit aisément de les équations dessus et est représenté sur la Figure.II.9

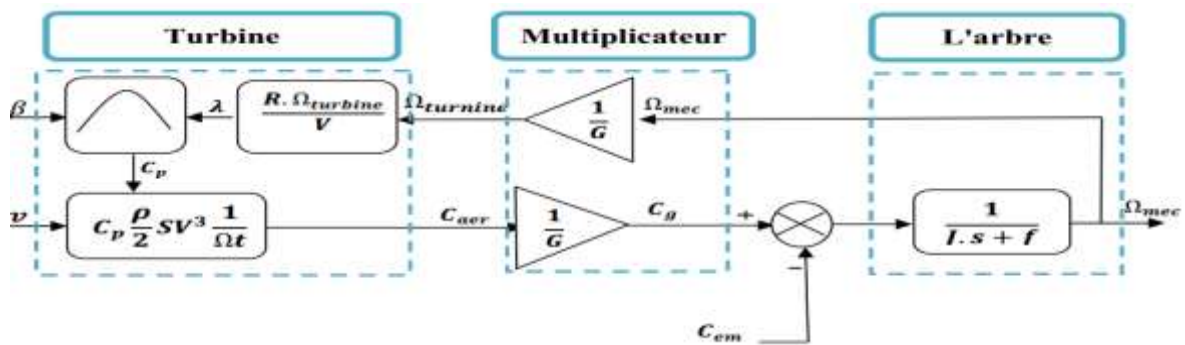


Figure II-9 Schéma bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation.

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté la Figure. II.10.

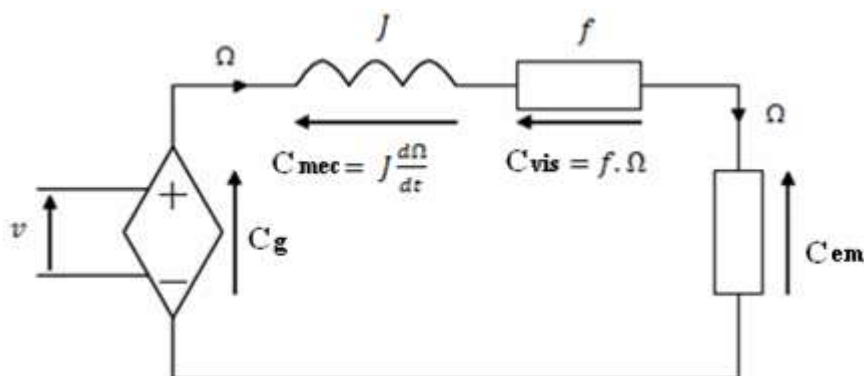


Figure II-10 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.

II.3 Stratégie de commande d'une éolienne

Comme il est illustré sur la Figure II.7. on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [14].

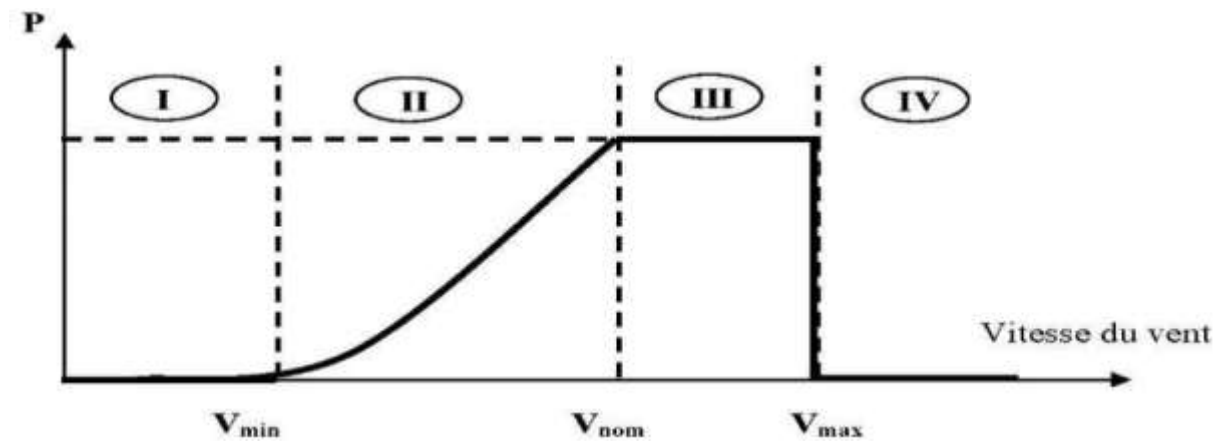


Figure II-11 Caractéristiques puissance, vitesse de vent

Zone 1: C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω out-in (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle éolienne a démarré).

Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Trac King). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale ($B=0$) afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse

Mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.

Zone 3: Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90 de la puissance.

Zone 4: Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : Le Pitch contrôle. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante [16].

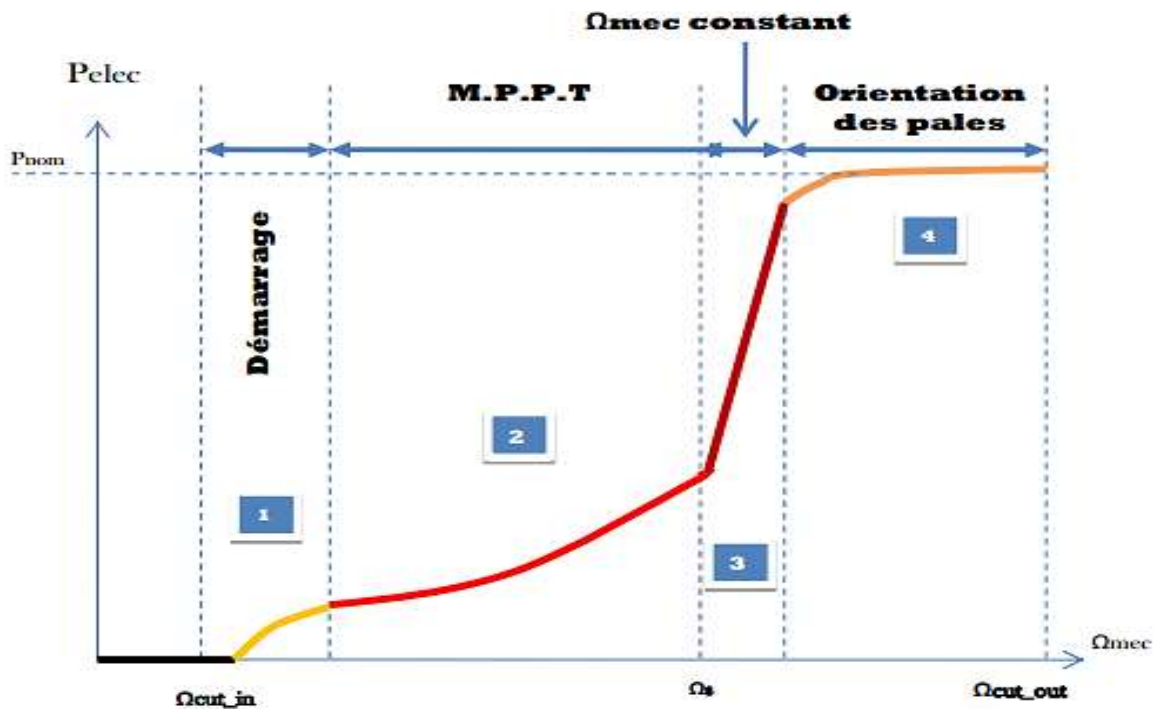


Figure II-12 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne .

II.4 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » [15]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de puissance la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure (II.7) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_p donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale [16].

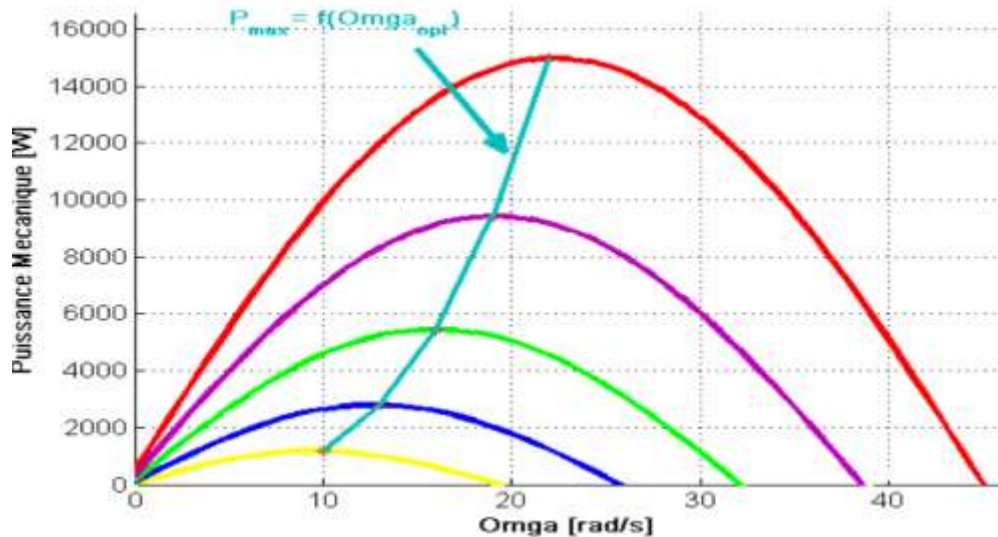


Figure II-13 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

On distingue deux familles de structures de commande [17] :

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



Figure II-14 Stratégies de commande de la turbine.

On trouve deux modes de commande :

- MPPT sans contrôle de vitesse de rotation .
- MPPT avec contrôle de vitesse de rotation.

Pour l'analyse de ces deux modes du contrôle, on supposera que la GADA et le convertisseur sont idéaux : peu importe la puissance mécanique transmise par la

Turbine le couple électromagnétique produit par la GADA est donc à tout moment égal à sa valeur de consigne exigée par le contrôle.

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons, [17] :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui rend la lecture de la vitesse du vent erronée, [17].

- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales, [17]. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction avec asservissement de la vitesse. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [17].

II.4.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

La seconde structure de la commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine.

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.17)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements vis queux $C_{vis} = 0$, on obtient : $C_{em} = C_g$
(II.12)

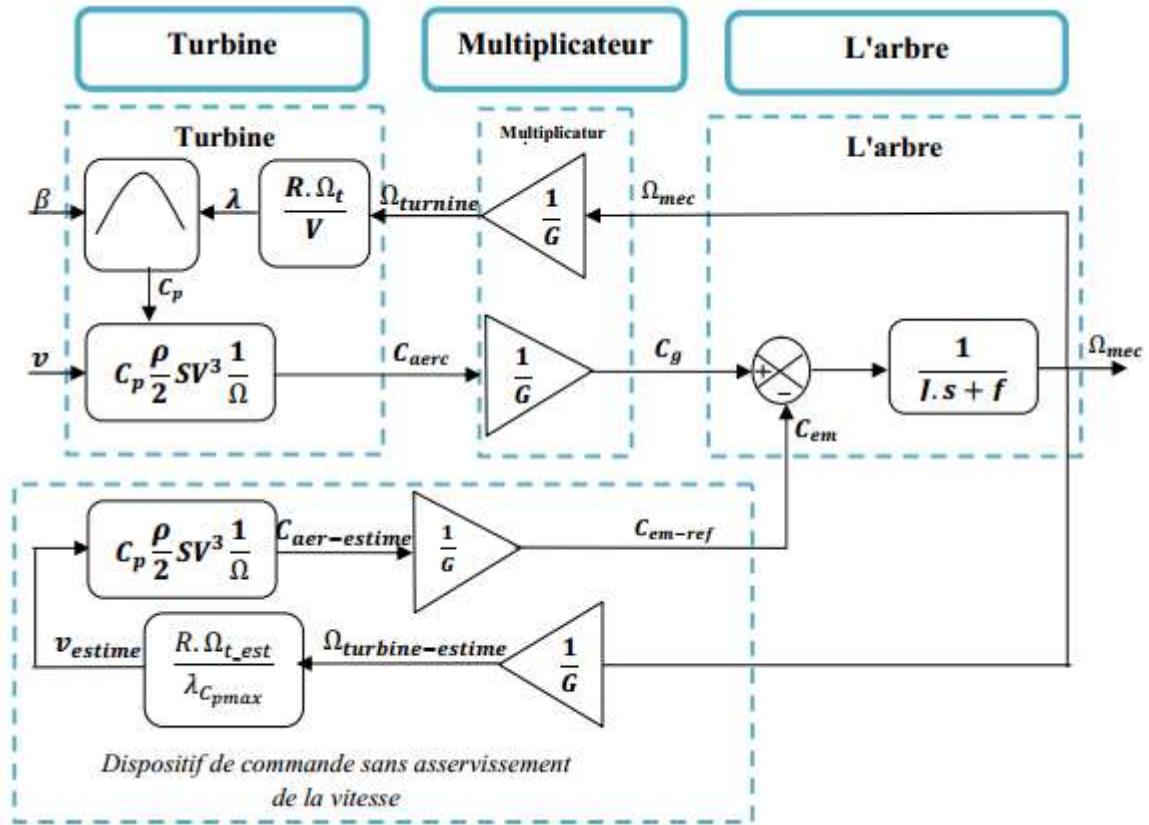


Figure II-15 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-re} = \frac{C_{aer-estimee}}{G} \quad (II.18)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$C_{aer-estimee} = C_p \frac{\rho s}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estimee}} V_{estime}^3 \quad (II.19)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-estime}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.20)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation.

$$V_{estime} = \frac{\Omega_{turbine-estimee}}{\lambda} \quad (II.21)$$

En regroupant ces quatre équations on obtient une relation globale de contrôle

$$C_{em} = \frac{C_p}{\lambda_{Cp}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.22)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur qui correspond au maximum du coefficient de puissance Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante.

$$C_{em-re} = \frac{C_p}{\lambda_{Cp}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.23)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice,

$$C_{em-r} = A \Omega_{mec}^2 \quad (II.24)$$

Avec :
$$A = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{1}{G^3} \quad (II.25)$$

-Simulatoin la chain de conversoin :

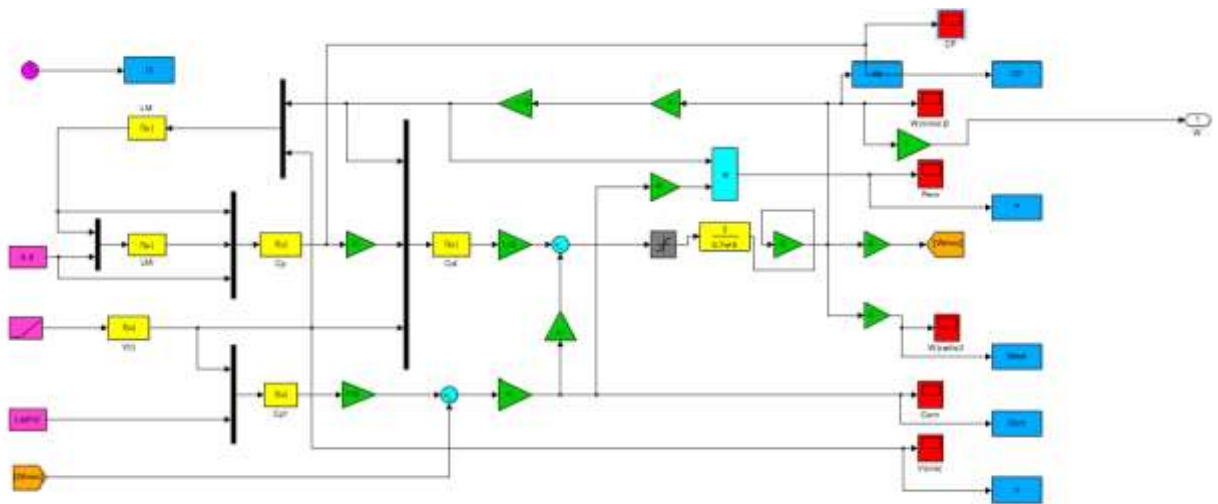


Figure II-16 La représentation sous forme de schéma-blocs

II.5 Résultats obtenus

A. Profil du vent :

La figure (II.13) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

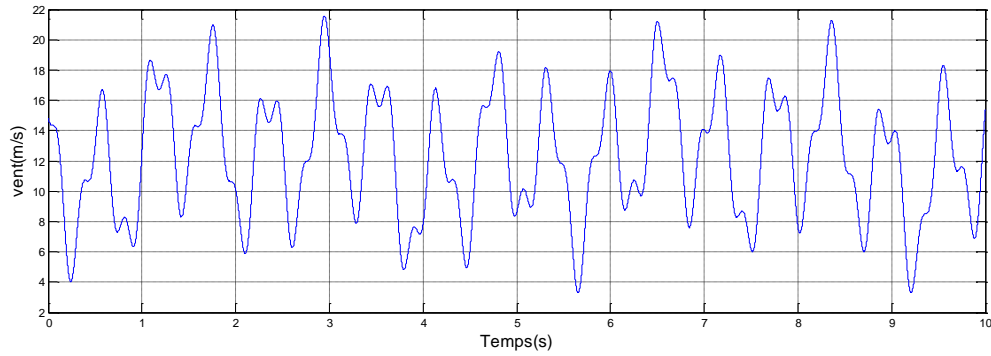


Figure II-17 Vitesse du vent

B. Le coefficient de puissance :

La figure (II.18) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (II.17).

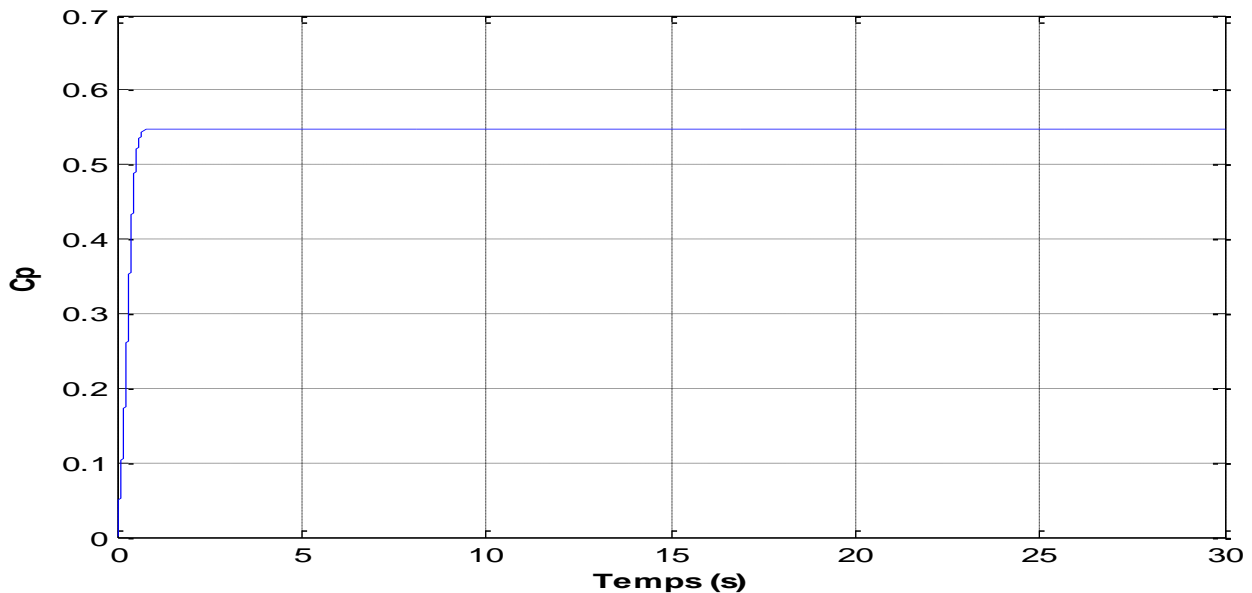


Figure II-18- Coefficient de puissance

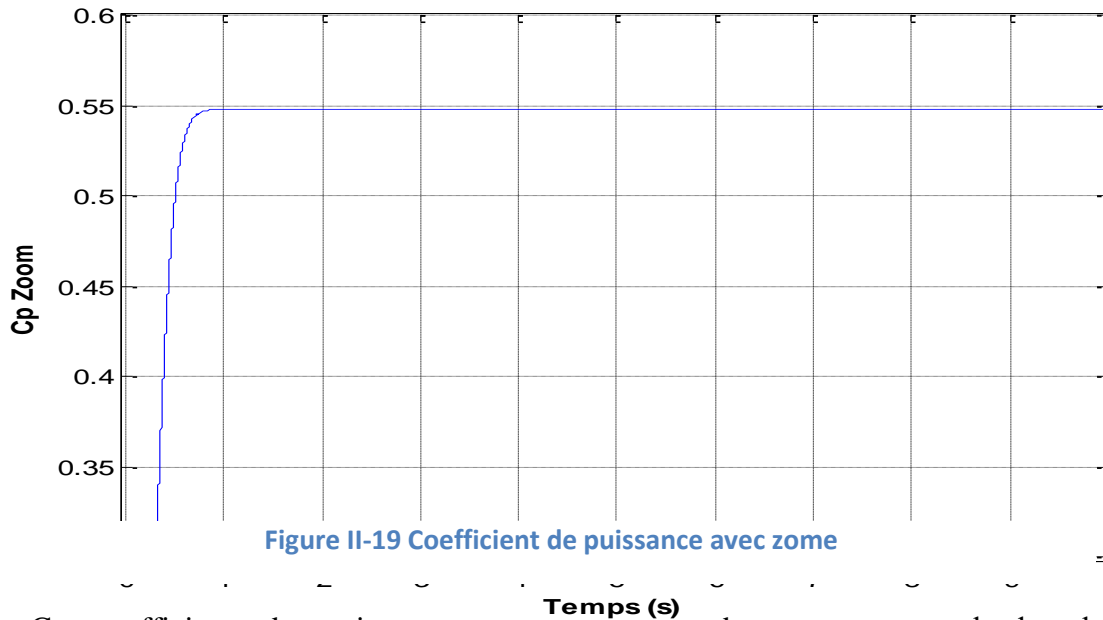


Figure II-19 Coefficient de puissance avec zome

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimale}$.

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,54, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

C. 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.

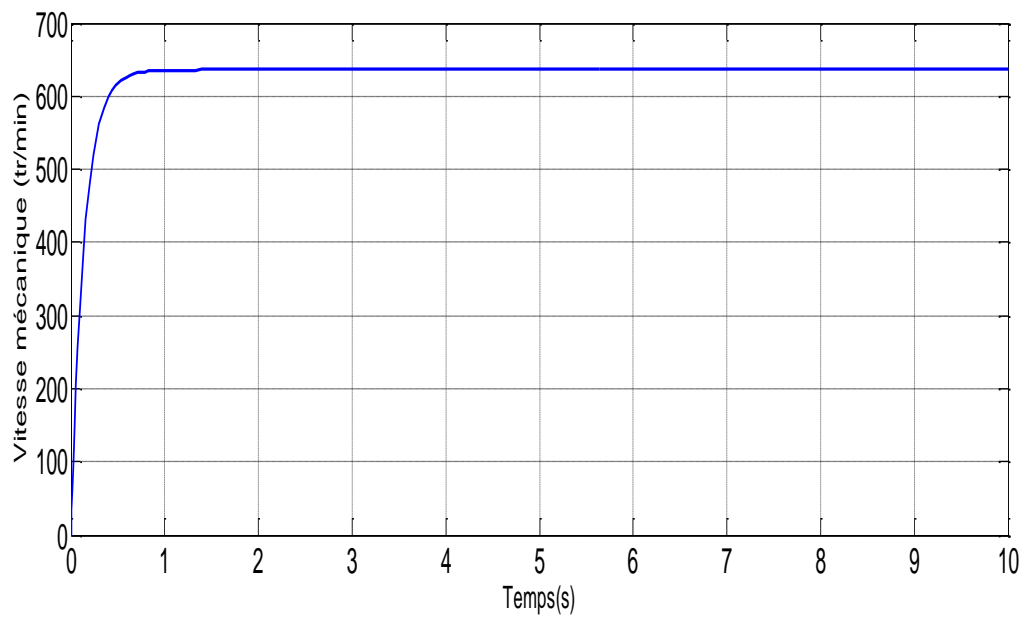


Figure II20- Vitesse mécanique (tr/min)

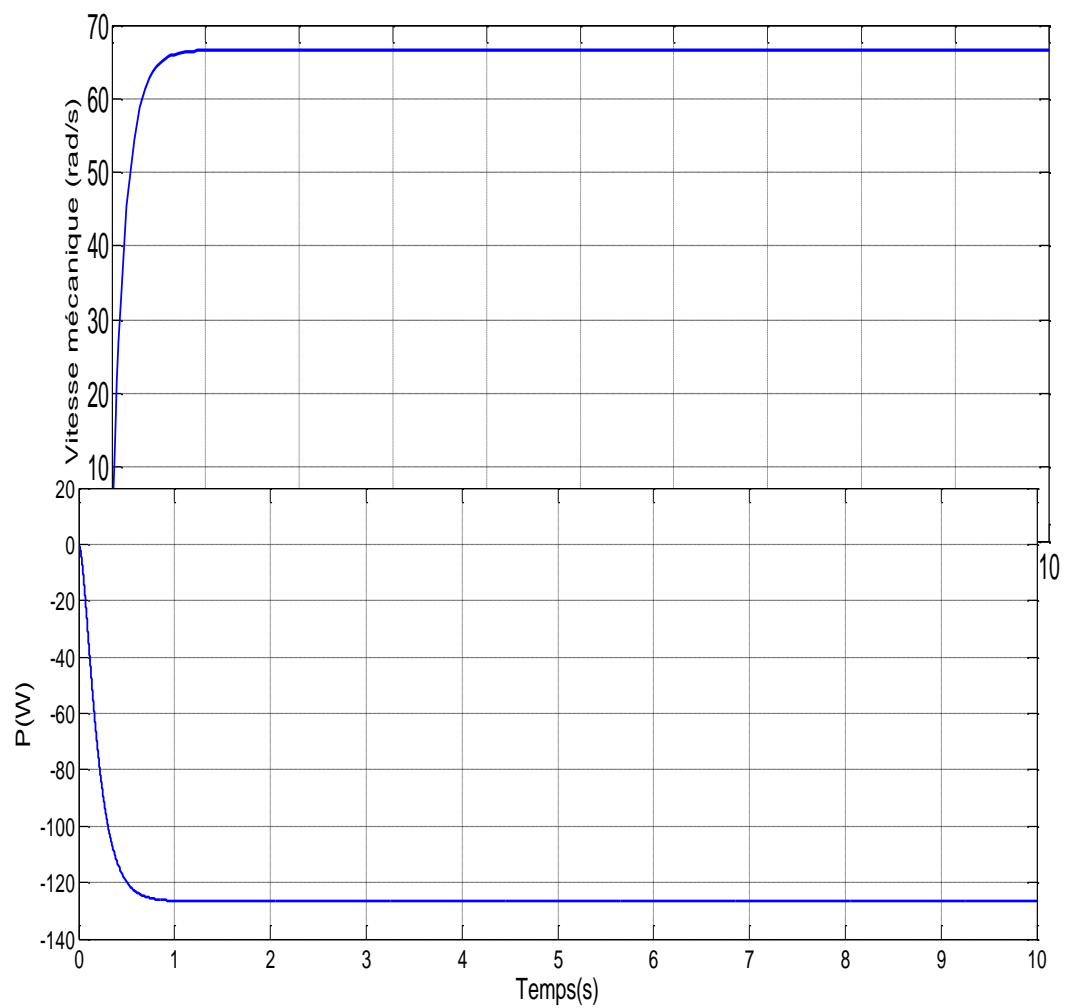


Figure II22- Puissance nominale.

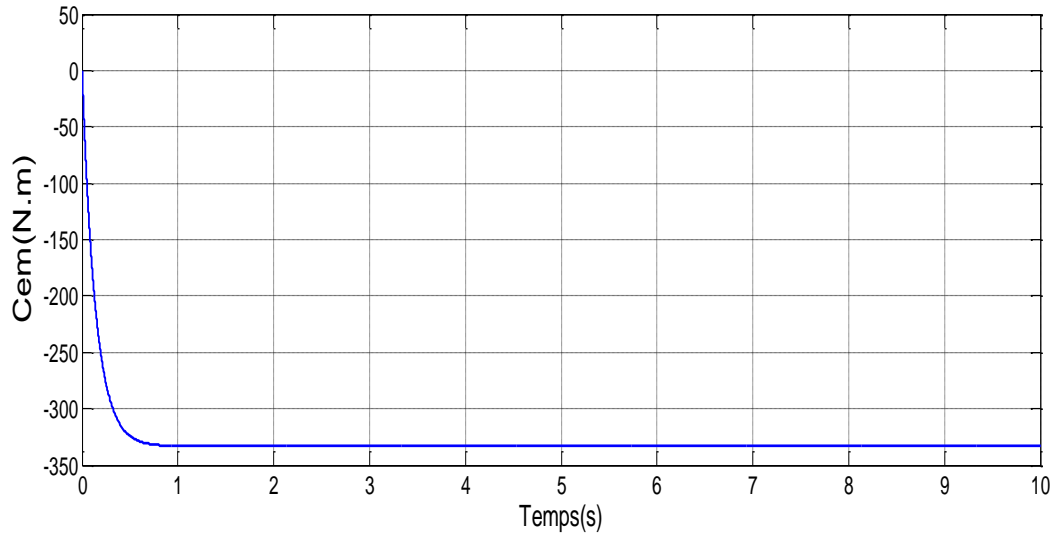


Figure II23- Couple électromagnétique

II.6 Interprétations des résultats

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur figure II-24 . la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur la figure II-(20-21). Il est à noter que pendant la durée de 10 s le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone. Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance produite (figure II-22) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance produite.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé une modélisation des différentes parties de la turbine éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales, l'angle décalage de celle-ci et le profil de vent utilisé.

Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme

sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations.

Cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne. Elle comporte sa propre commande afin de maximiser la puissance extraite du vent par MPPT .

Nous allons maintenant nous intéresser aux autres parties de l'éolienne afin de modéliser l'ensemble et étudier le fonctionnement global du système de conversion d'énergie.

Modélisation de la générateur
Asynchrone à Double Alimentation
(GADA)

III Introduction

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées. Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Ce chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA.

III.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Son rotor n'est par contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [18]. Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction

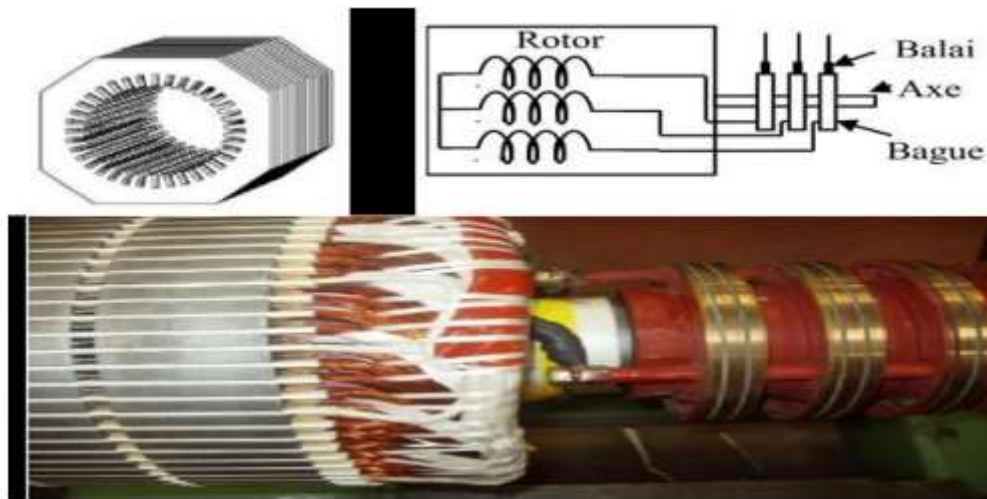


Figure III-1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA

III.1.1 Mode de fonctionnement de MADA :

la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [6]. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [19]. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement.

III 1.1.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone:

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor .

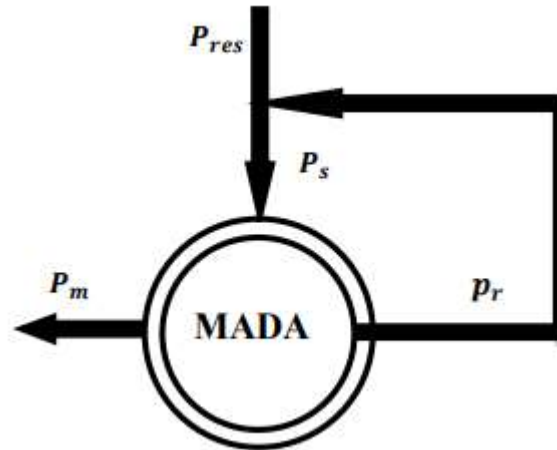


Figure III-2:Le fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

III 1.1.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone:

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

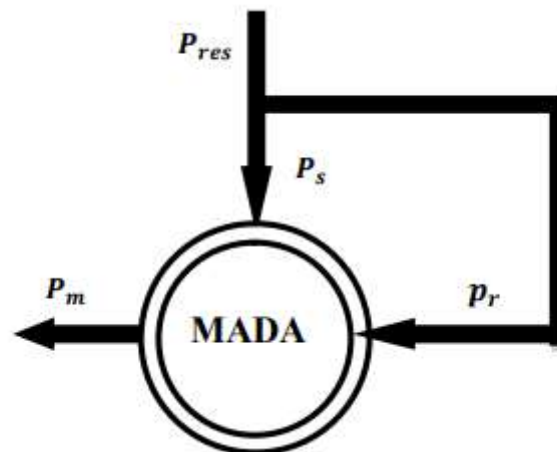


Figure III3-Lefonctionnement en mode moteur hyper synchrone

III.1.1.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement

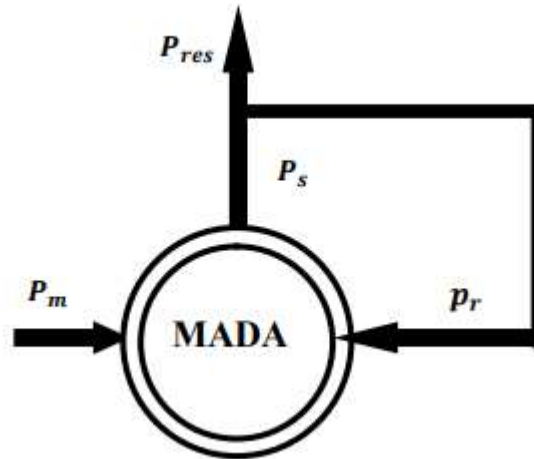


Figure III-4: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

III.1.1.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

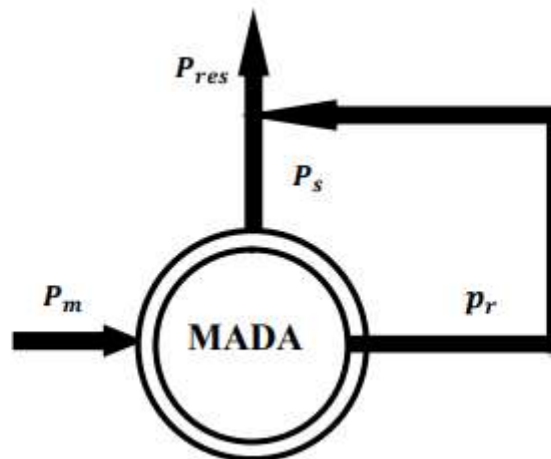


Figure III-5: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

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

III.2 Avantages et inconvénients de la GADA :

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

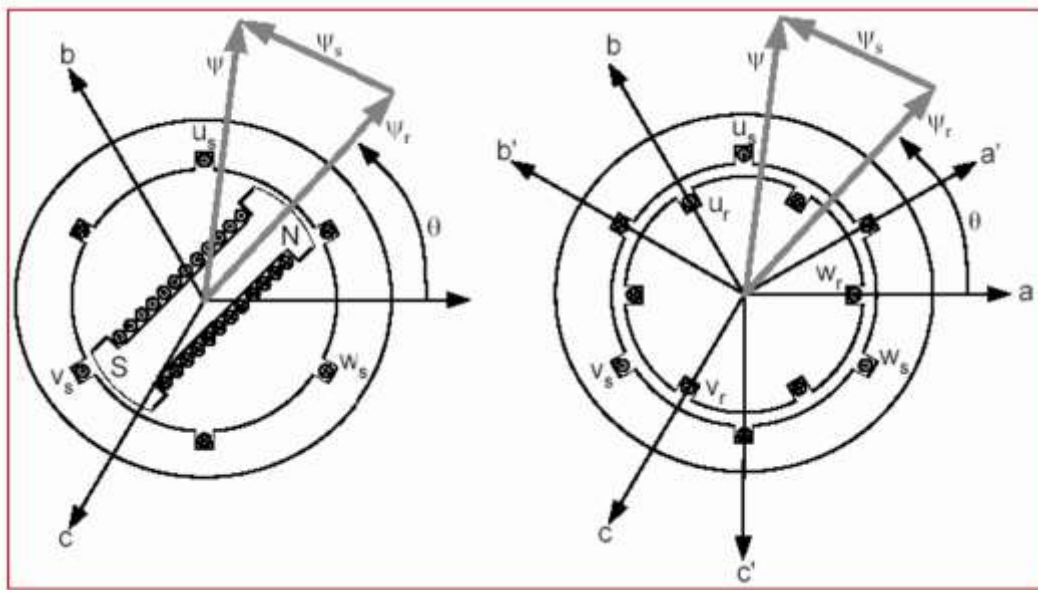


Figure III-6: Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA

Le vecteur flux ϕ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques ϕ_s et du flux rotorique ϕ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique ϕ_r qui a une amplitude

et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système [20].

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

A. Avantages de la MADA :

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique .
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne) .
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement .
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique .
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse .
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable .
 - Régulation découplée des puissances active et réactive. [21]

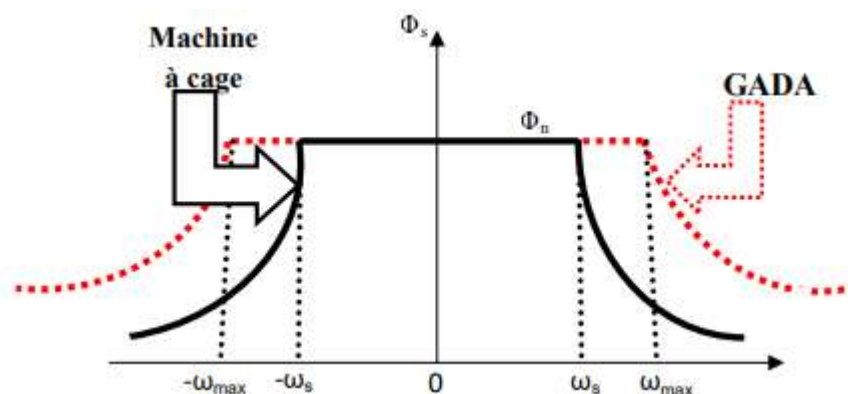


Figure III-7: Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage

B. 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.3 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.3.1 . Application moteur :

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

III.3.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la GADA 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 quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- } Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- } 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.4 -Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale.

III.5 Modélisation de la génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA)

III.5.1 Représentation de la GADA dans repère triphasé (*abc*) :

est équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé

[22]

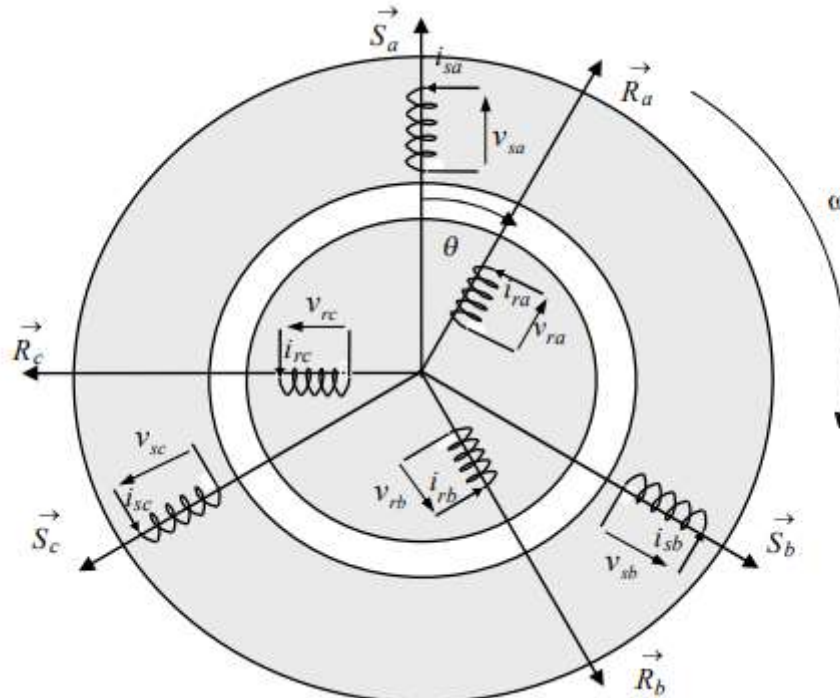


Figure III-8 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

III.5.1.1 Équations électriques

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement, on peut écrire :

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

Avec:

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

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

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

III.5.1.2 Equations magnétiques :

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

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

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

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

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

III.5.2 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques [23]. Cette transformation est constituée d'une transformation

triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha\beta)$, puis vers le repère (dq) .

Le repère $(\alpha\beta)$ est toujours fixe par rapport au repère (abc) ; par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe $(\alpha\beta)$ un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park

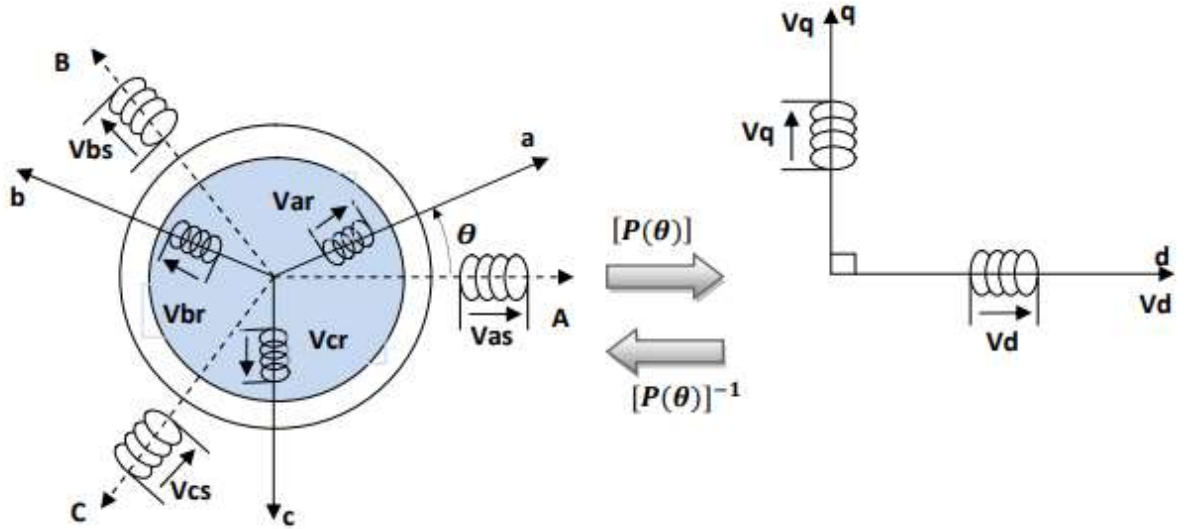


Figure III-9 Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent. La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

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

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

Cette matrice permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes biphasées; avec X_{abc} peut être : un vecteur de tension, courant ou flux.

III.5.3 Choix du référentiel

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [24].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- 1) au stator
- 2) au rotor
- 3) au champ tournant

III.5.3.1 Référentiel lié au stator

$$\omega_{coord} = 0$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées

III.5.3.2 Référentiel lié au rotor

$$\omega_{coord} = \omega_r$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

III.5.3.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_{coord} = \omega_s$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [24].

III.5.4 Application de la transformation de Park à la GADA

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit : On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont $\omega_{coord} = \omega_s$

- **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:**

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

III.5.5 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)

❖ Equations électriques

En multipliant les systèmes des équations (III.1) par la matrice de Park, on obtient :

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

(III.3)

Sous forme vectorielle cela donne

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

(III.4)

Avec :

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

❖ Equations magnétiques

❖ En multipliant les systèmes des équations (III.2) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases}$$

(III.5)

Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (III.3) et (III.4) s'écrivent :

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

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

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

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

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

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

Dont

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} \\ [A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} ; [C] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} ; [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

III.5.6 Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

$$\text{On a: } \begin{cases} V_s = V_{sd} + j V_{sq} \\ V_r = V_{rd} + j V_{rq} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = \text{Re} ([V_s][I_s]) \\ Q_s = \text{Im} ([V_s][I_s]) \end{cases}$$

Avec la multiplication et tout les calculs il en résulte:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases}$$

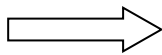
(III.10)

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases}$$

(III.11)

III.5.7 Expression du couple électromagnétique :



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

III.5.8 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 1.5 KW.

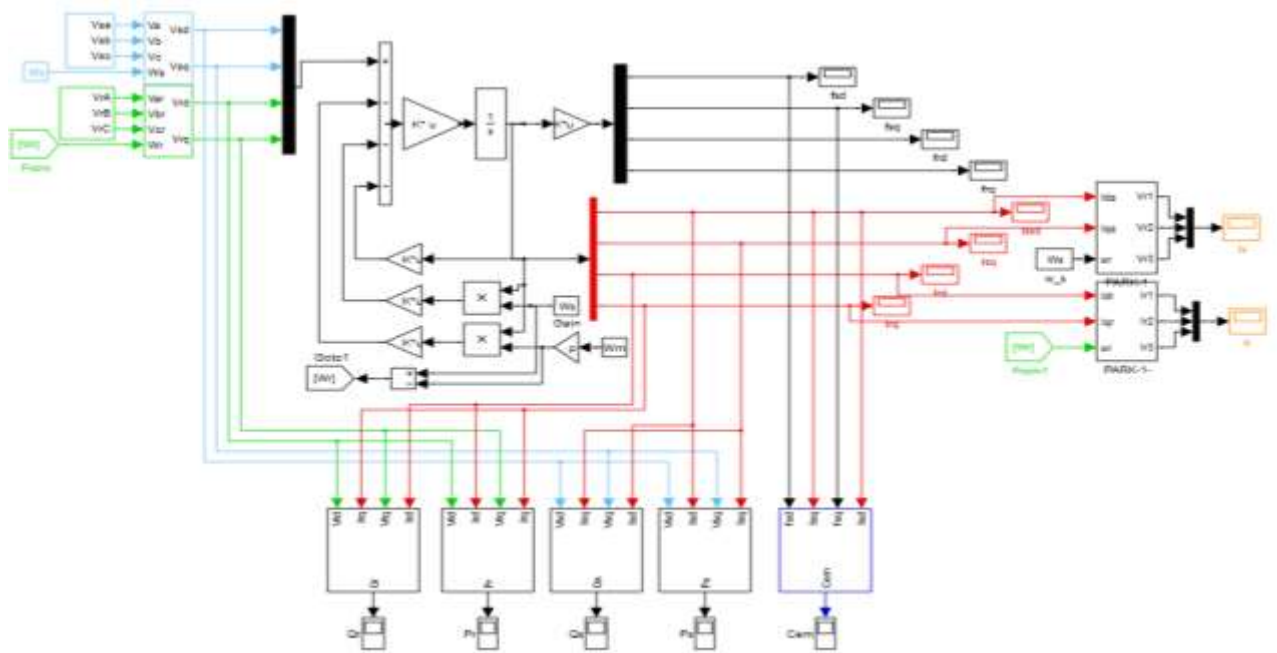


Figure III-10 Schéma bloqué de la modèle de GADA

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1.5KW, 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 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

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

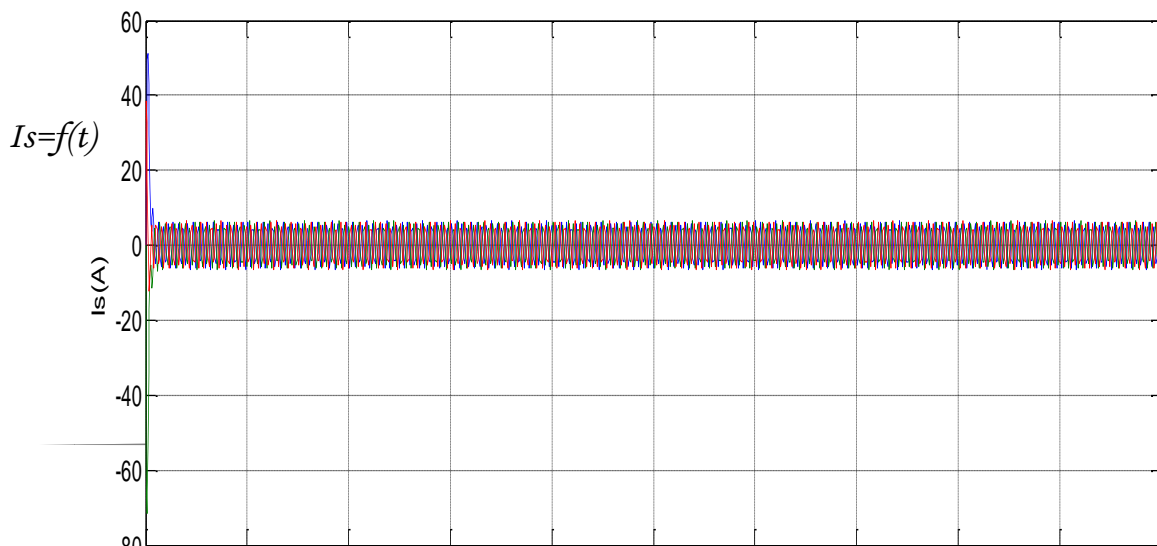


Figure III11- Courbe du courant statorique

$$I_r=f(t)$$

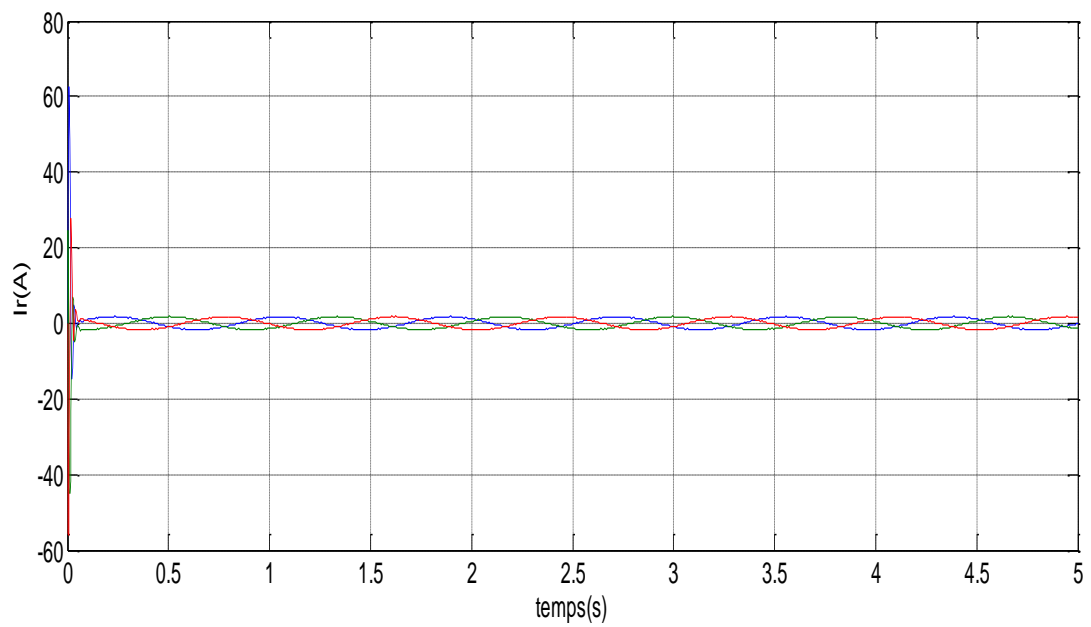


Figure III12-Courbe du courant rotorique

$$V_s=f(t)$$

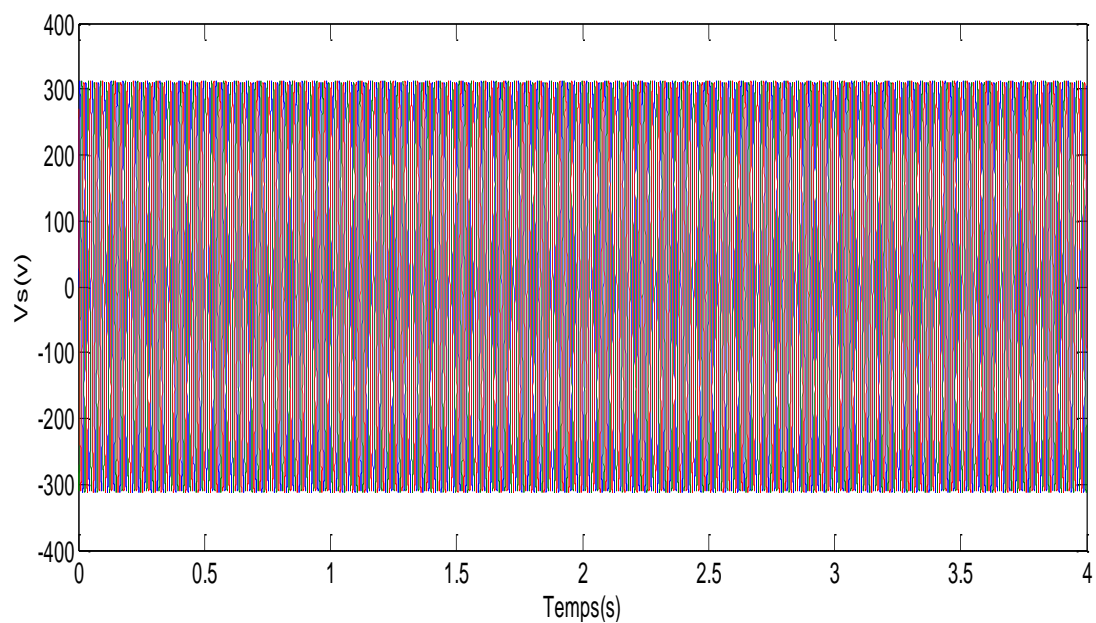


Figure III13- Courbe de la tension statorique

$$V_r=f(t)$$

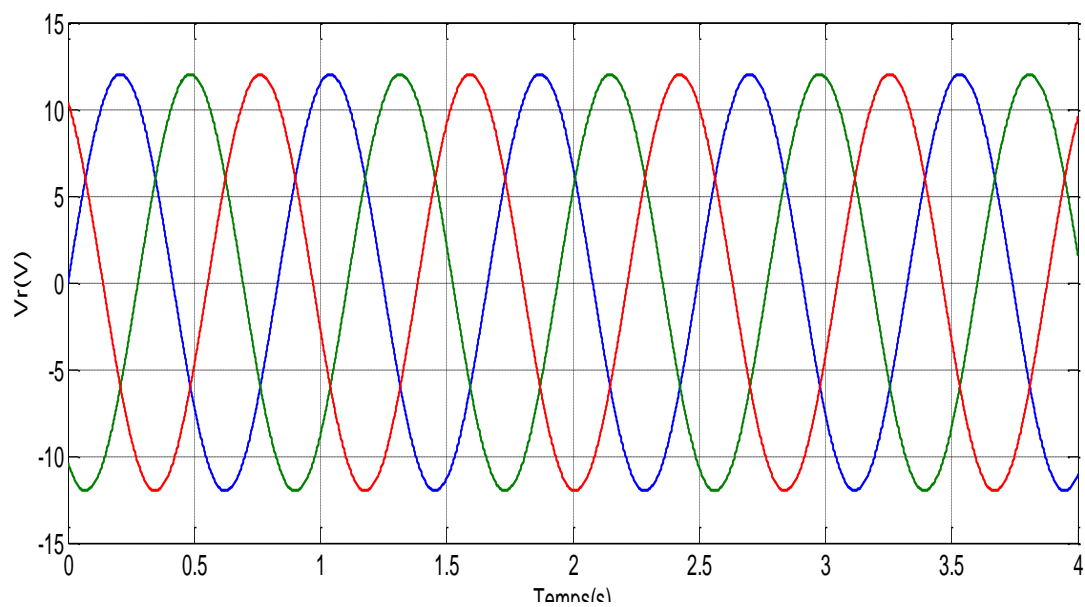


Figure III14-Courbe de la tension rotorique

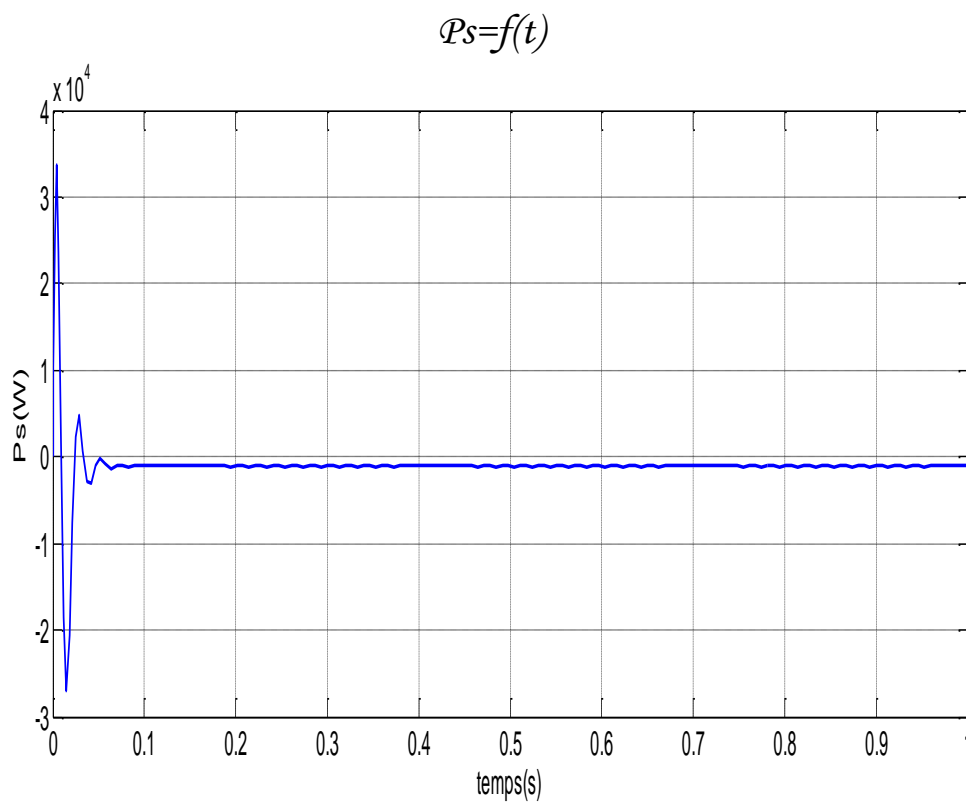


Figure III15-Courbe de la puissance active statorique

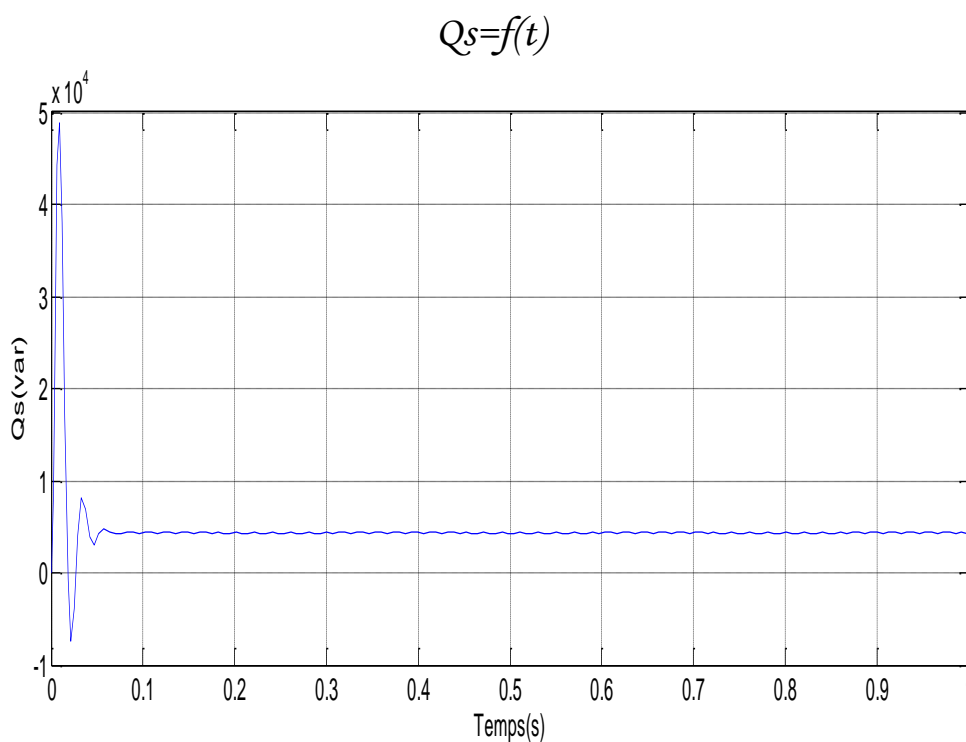


Figure III16- Courbe de la puissance réactive statorique

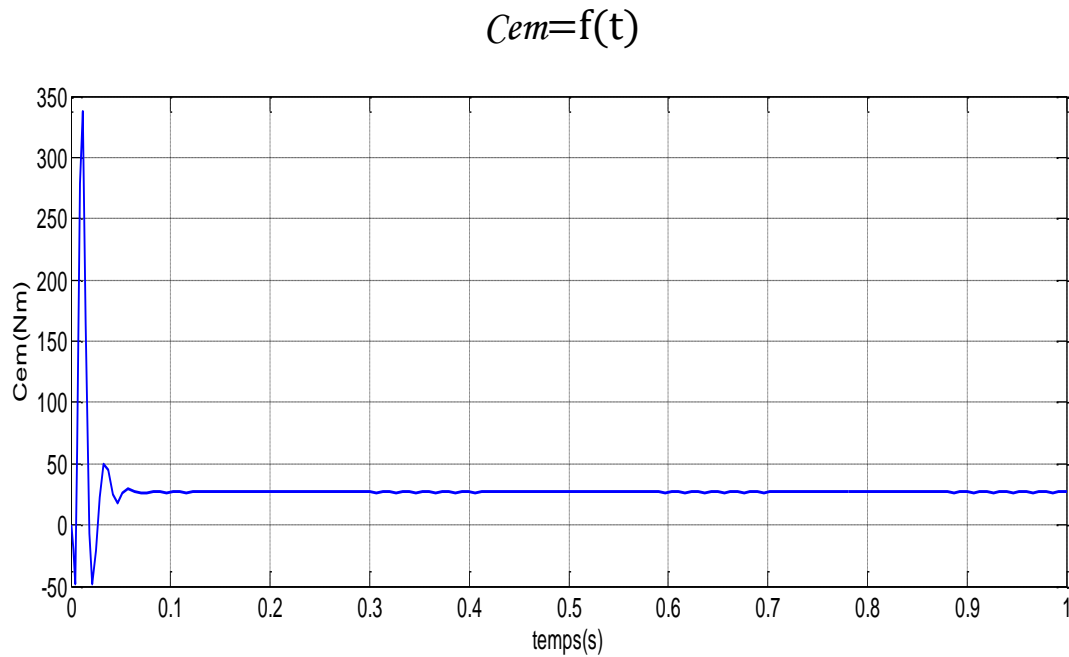


Figure III17- Courbe de la couple électromagnétique

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier temps une description générale du système éolien avec différente machine, puis on a focalisé à la machine asynchrone à double alimentation. Dans le but d'étudier le comportement de cette machine nous avons établi un modèle dynamique en tenant compte certaines hypothèses simplificatrices. Nous avons vu que la machine asynchrone à double alimentation, a été ramenée à une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances actives et réactive

Commande des puissances actives et réactives de la GADA

IV Introduction

Les qualités de la machine à courant continu, résumées essentiellement dans le découplage naturel entre le flux et le couple, ont fait de cette machine et pendant longtemps, le meilleur moyen utilisé dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Cependant, la présence du collecteur mécanique dont est dotée la machine à courant continu limite son emploi à des domaines où la vitesse et la puissance sont relativement réduites. Cette limitation a contraint les chercheurs à la remplacer par la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné en effet, la machine à induction est de construction simple, robuste, supporte les surcharges et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux. Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle.

IV.1 la commande vectorielle de la GADA

IV.1.1 Le principe de la commande vectorielle de la GADA

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour toute machine à courant alternatif.

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour les machines alternatives.

Le calculateur qui va agir sur la commande des interrupteurs se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement [25].

- La position du rotor pour les machines synchrones
- La vitesse du rotor pour les machines asynchrones

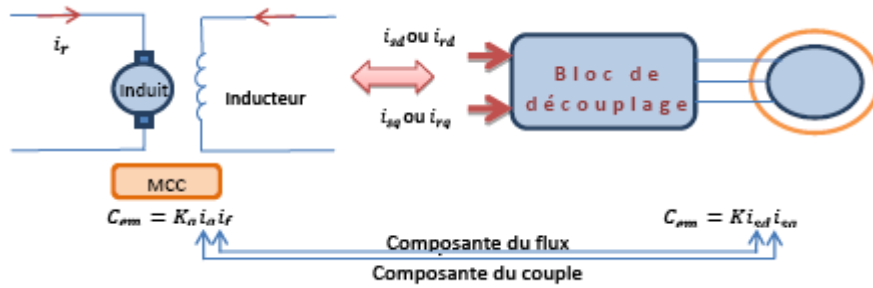


Figure IV-1 Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA

IV.1.2 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul (Figure . IV.2), nous pouvons écrire [26]. :

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

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

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

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

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

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

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

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

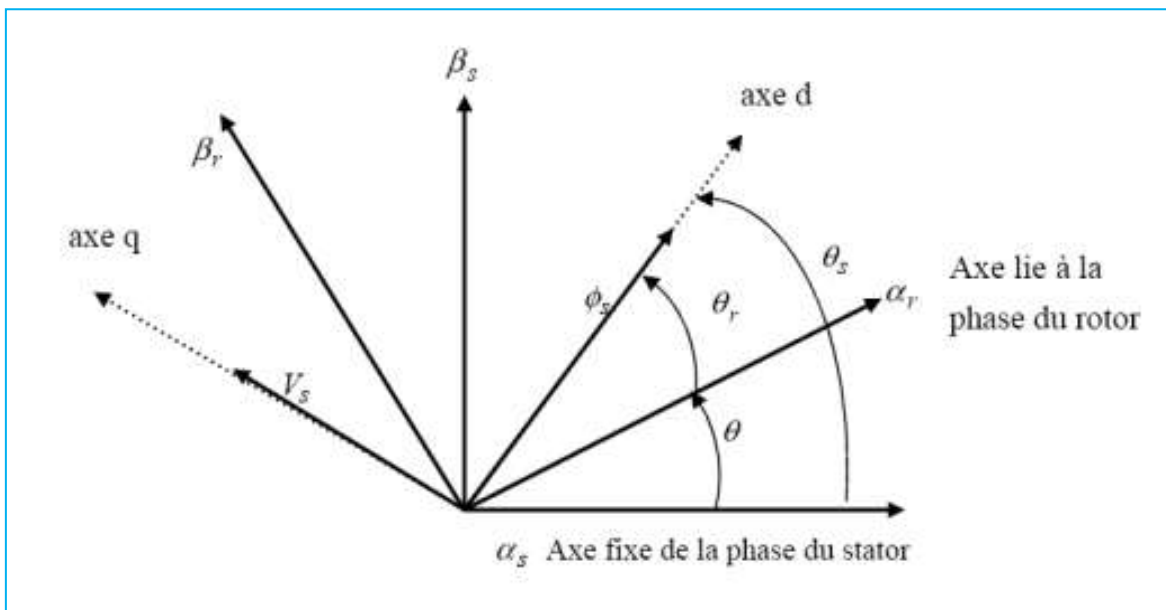


Figure IV-2 Orientation de la tension et de flux statorique

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

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

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

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

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

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

l'équation (III.16) de couple devient alors:

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

Il ressort de l'expression (III.9) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près

$$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \quad \text{imposée par le réseau [27].}$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rd} + M I_{sd}) - g\omega_s (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rq} + M I_{sd}) + g\omega_s (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases} \quad (IV.9)$$

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

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

(IV.10)

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient[16]:

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

(IV.11)

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

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

(IV.12)

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

g : Coefficient de glissement.

$(\frac{V_s M^2}{L_s})$: Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

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

A partir des systèmes d'équations (IV.7) et (IV.11), nous pouvons élaborer le modèle de la machine MADA pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc

(figure IV.1).

IV.2 Schéma bloc réduit de la MADA

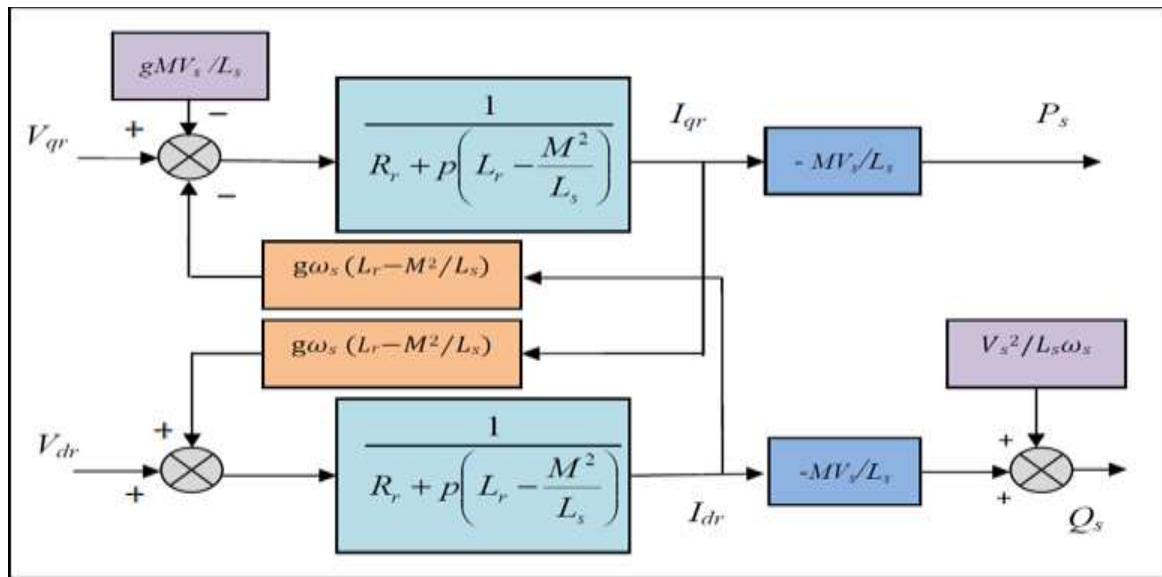


Figure IV-3 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne).

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.

Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe **q** rotorique et la puissance réactive pour l'axe **d** rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance optimal[27].

IV.3 Types de commande de la MADA

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

IV.3.1 Commande directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale[28].

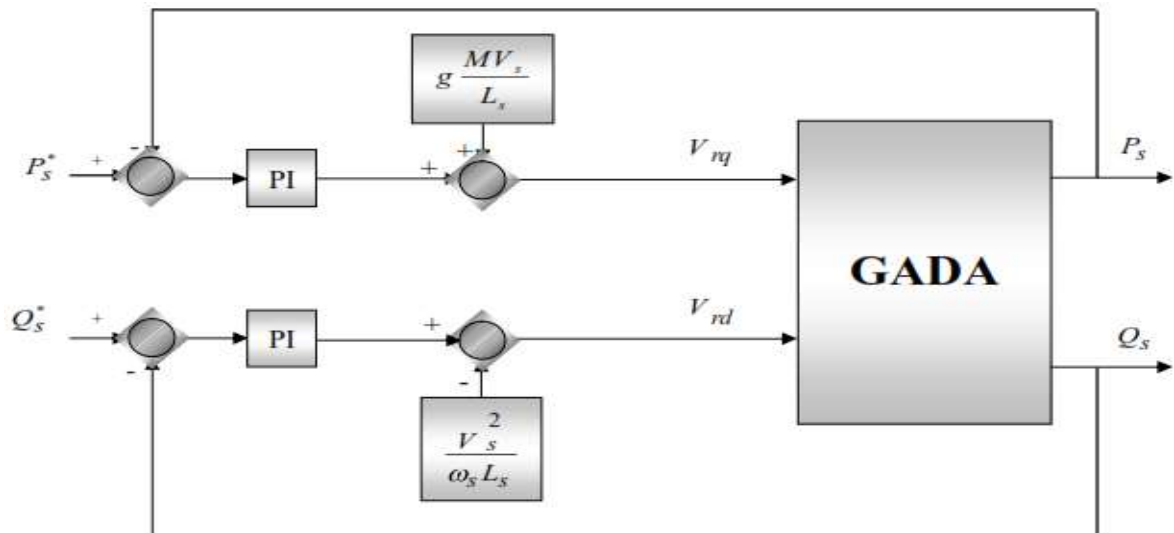


Figure IV-4 Schéma de principe de la commande directe

IV.3.1.1 Synthèse des régulateurs PI

Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en oeuvre tout en offrant des performances acceptables [29] C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de régulation éolien. La figure IV.5 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{s}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans la figure IV.4, la figure IV.6 et la figure IV.7.

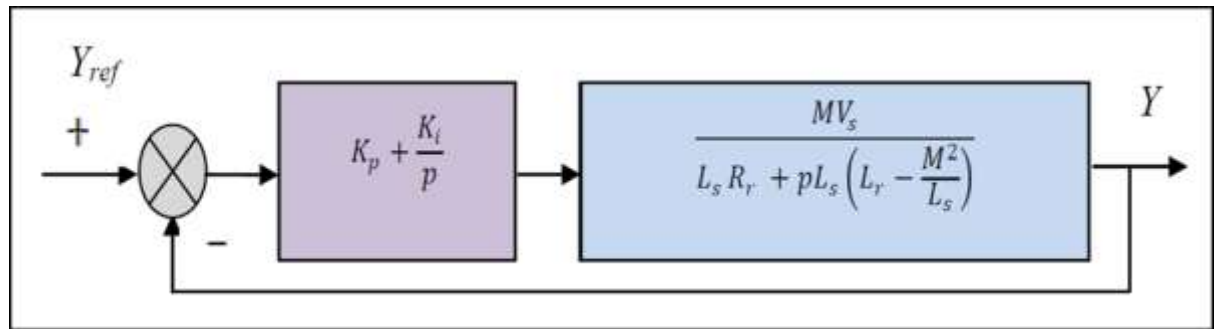


Figure IV-5 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

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

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

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

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

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

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

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

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

Le terme τ désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

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

IV.3.2 Commande indirecte

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des micro processeurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre[30].

IV.3.2.1 Commande indirecte en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, Elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe 'd' et 'q'. [31] Les courants rotoriques I_{rd} et I_{rq} sont respectivement les images de la puissance active P_s et la puissance réactive statorique Q_s doivent poursuivre leurs courants de références.

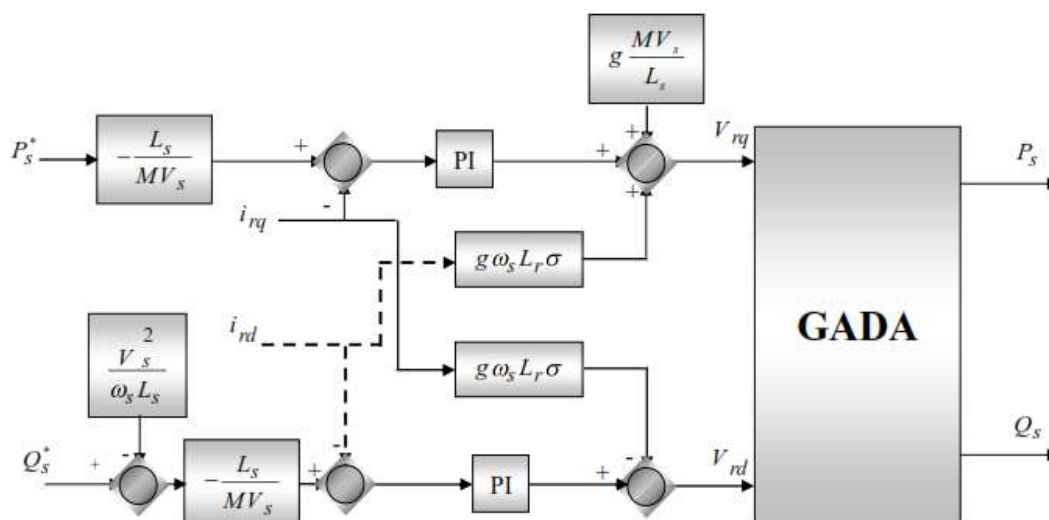


Figure IV-6 Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte

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

IV.3.2.2 Commande indirecte en boucle fermée

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système[26].

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en (figure IV.7) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

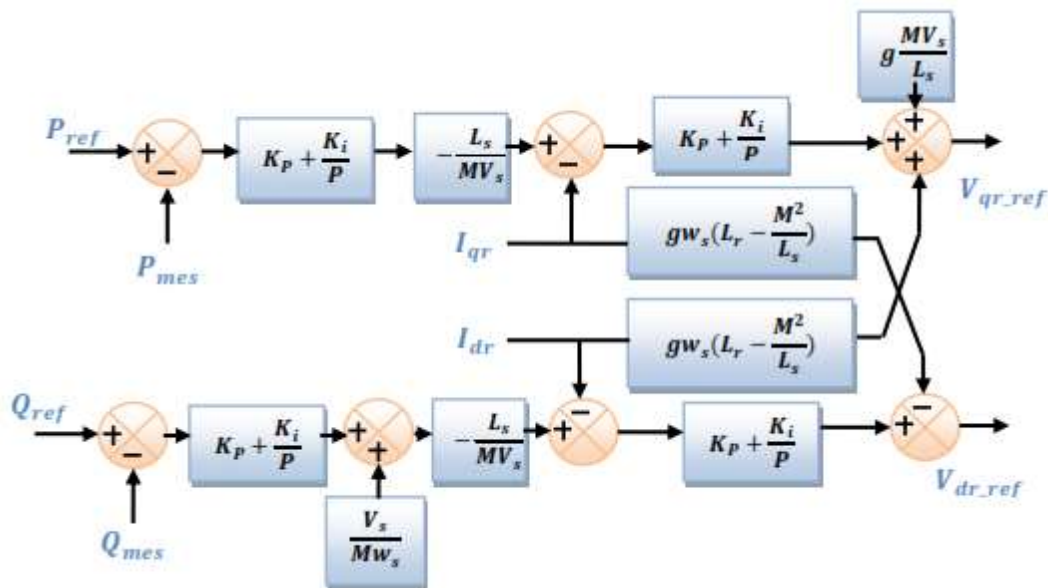


Figure IV-7 Schéma de la commande indirecte en boucle fermée

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique.

Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers.

IV.4 Convertisseur MLI

Le rotor de la MADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposée constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur[32].

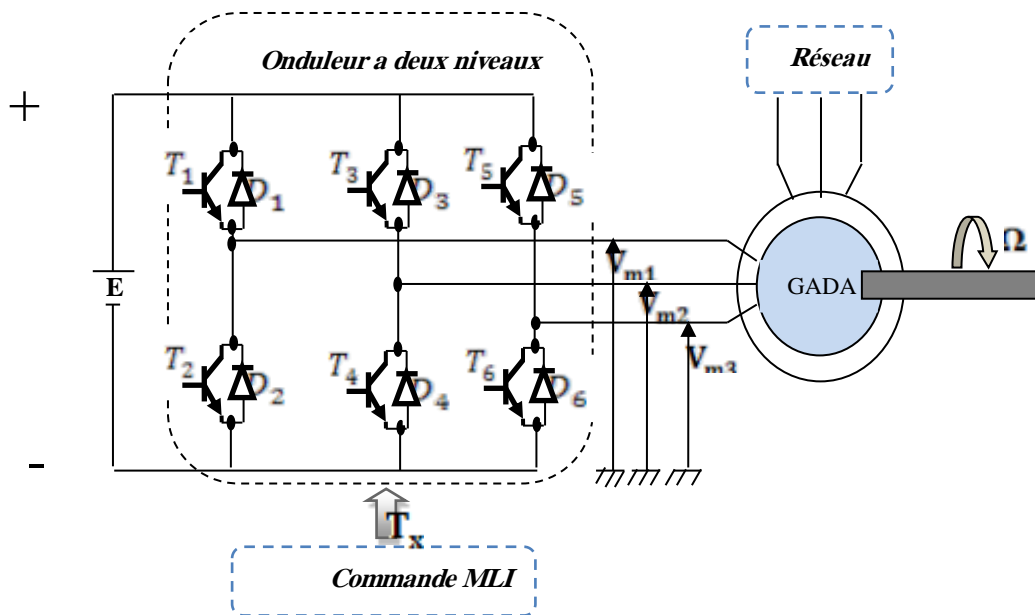


Figure IV-8 Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI

IV.4.1 Onduleur a deux niveaux

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d' Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le coeur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables . La (Fig. IV.9), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la

modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits[33].

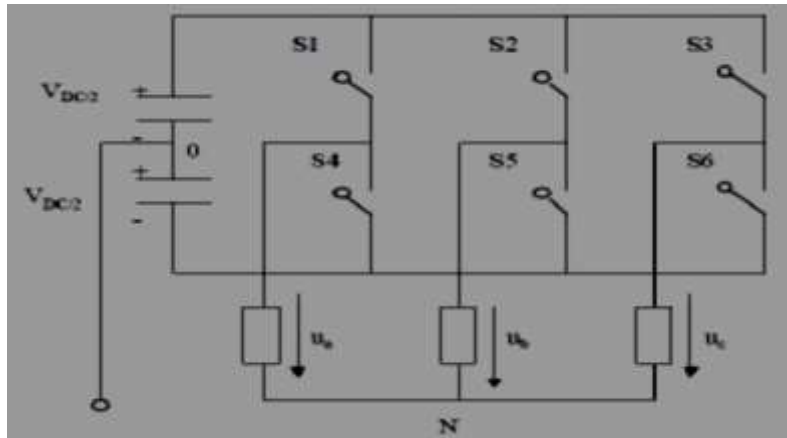


Figure IV-9 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a, S_b et S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.:

- Branche1 :

$S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.

- Branche2 :

$S_b=0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé;

$S_b=1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

- Branche3 :

$S_c=0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé;

$S_c=1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases}$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases}$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoidale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie[33].

IV.4.2 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

La (Fig. IV.9) représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente une charge triphasée de type R L E à partir d'un générateur de tension continue.

IV.4.3 Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes

❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_P \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} < U_P \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases}$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases}$$

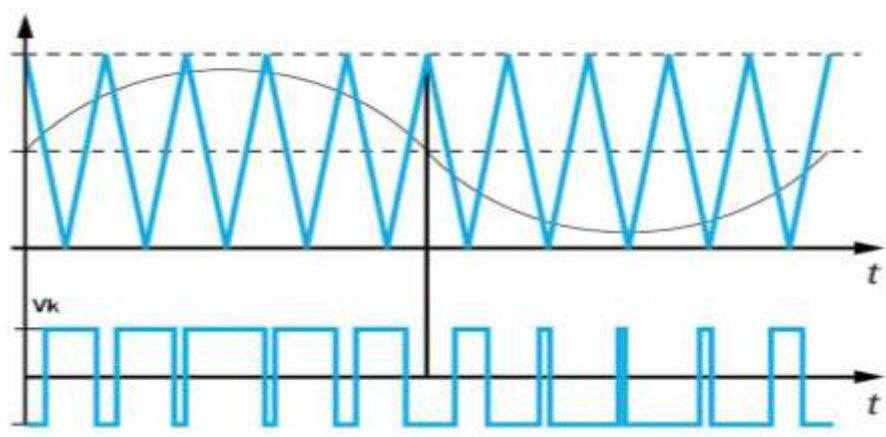


Figure IV-10 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse

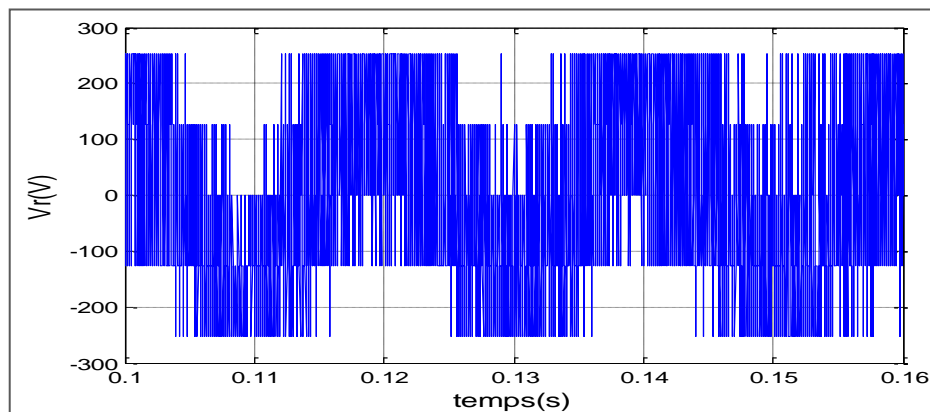


Figure IV-11 Tension rotorique ondulé

IV.5 Simulation du système avec onduleur

Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdal, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P= 1.5KW$.

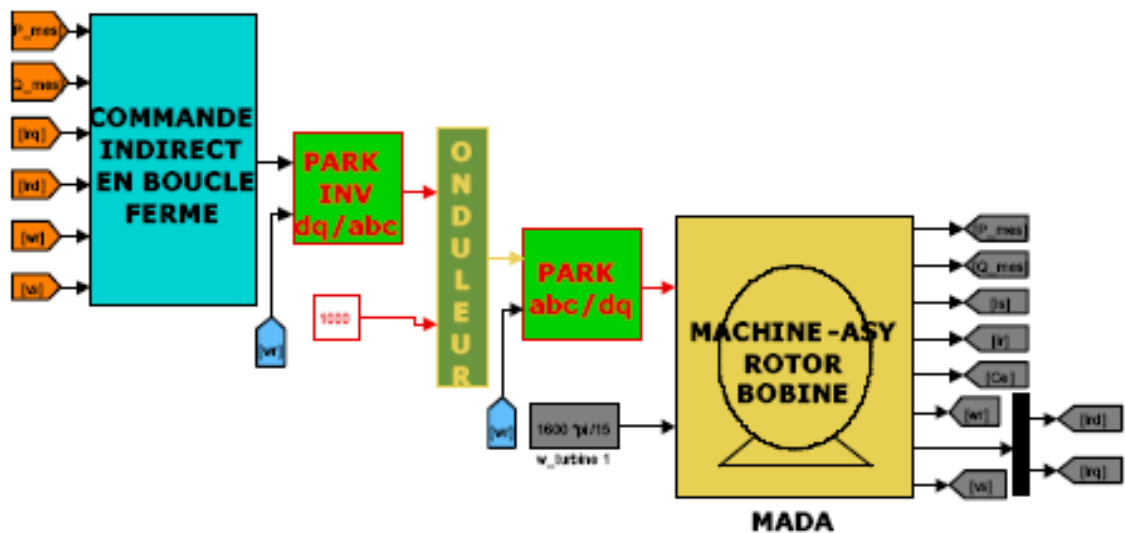


Figure IV-12 Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA avec onduleur

IV.6 Résultats de la simulation

Les figures suivantes représentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances active et réactive générées au niveau du stator de la générateur asynchrone double alimentée selon deux cas : sans l'association d'un onduleur au coté rotorique et avec l'association de ce dernier au coté rotorique.

La simulation de cette machine à 1.5 (paramètres donnés en Annexe), a été implantée sous MATLAB/SIMULINK

On a procédé aux essais suivant pondant une durée de 4s .Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min

T (s)	P_{ref} (W)	Q_{ref} (VAR)
0 à 0.5	0	0
0.5 à 1.5	-1000	1000
1.5 à 2.5	1000	-1000
2.5 à 4	-2000	0

IV.6.1 Modèle de commande d'une GADA :

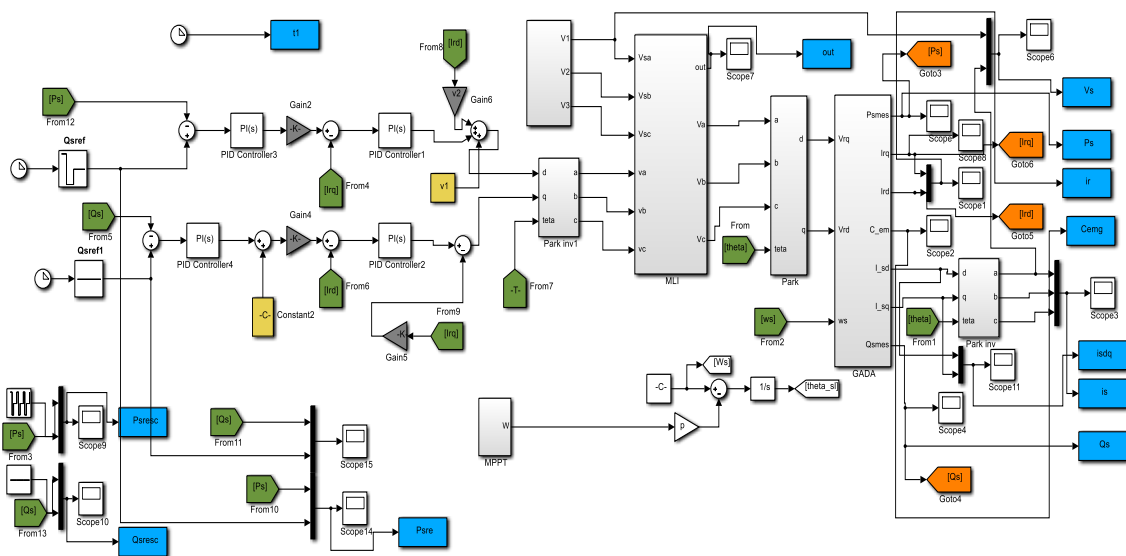


Figure IV-13 Shémq de simuloin de la commande d'une GADA

IV.6.2 Résultats

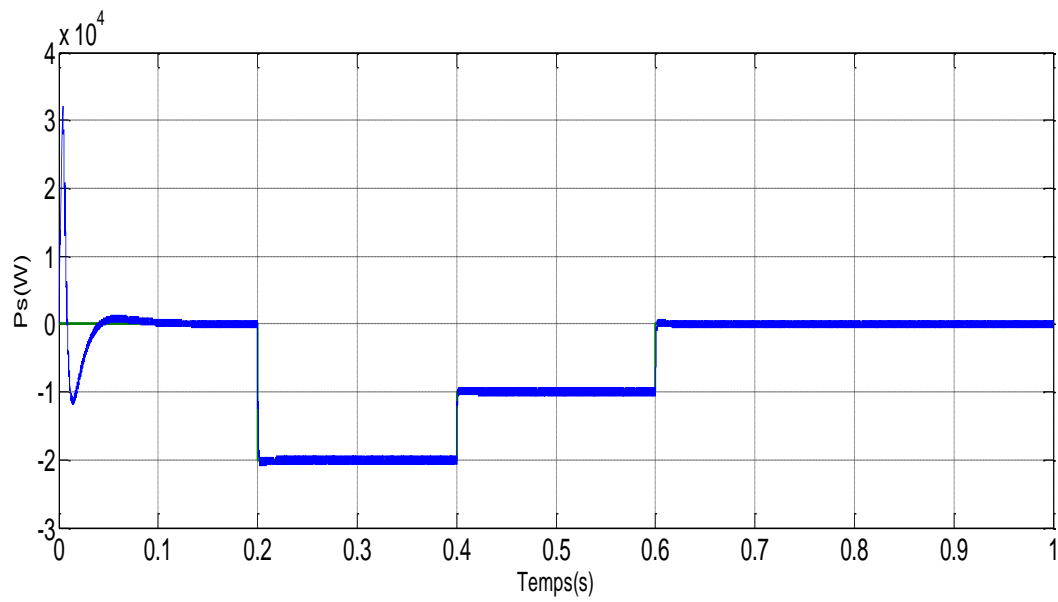


Figure IV14- Courbe de la puissance active statorique avec ses référence

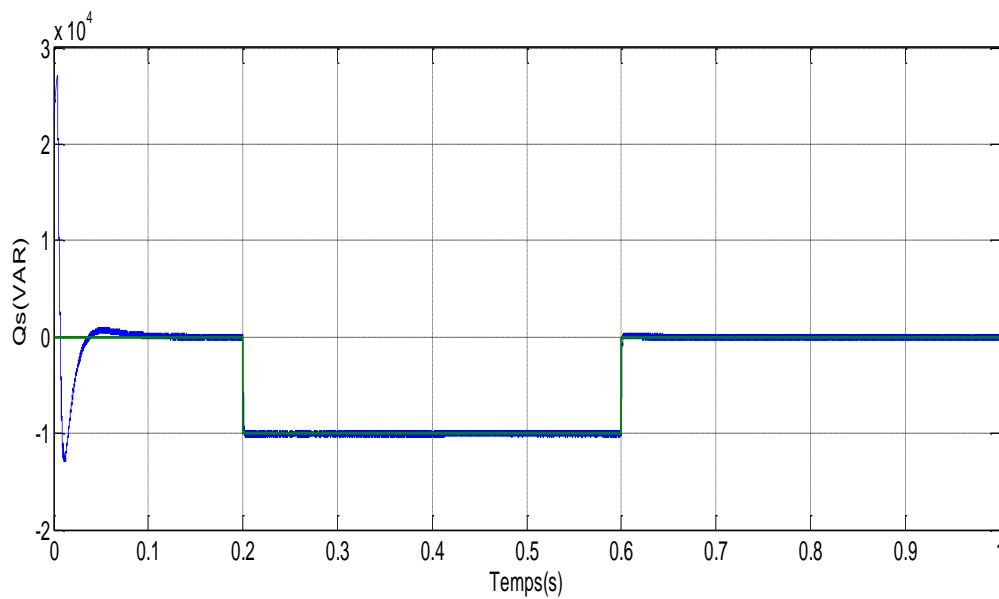


Figure IV15- Courbe de la puissance réactive statorique avec ses références

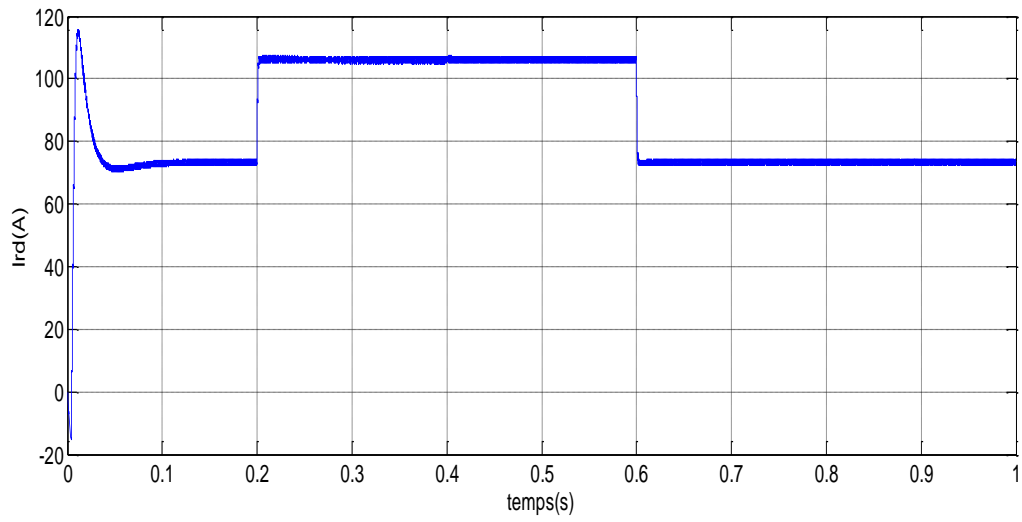


Figure IV16- Courbe de la courant (I_{rd})

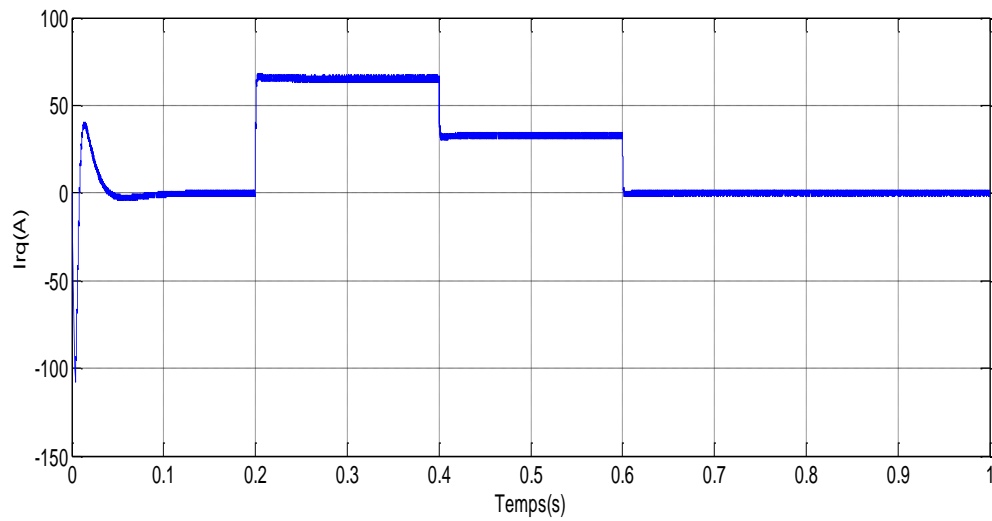


Figure IV17-Courbe de la courant (I_{rq})

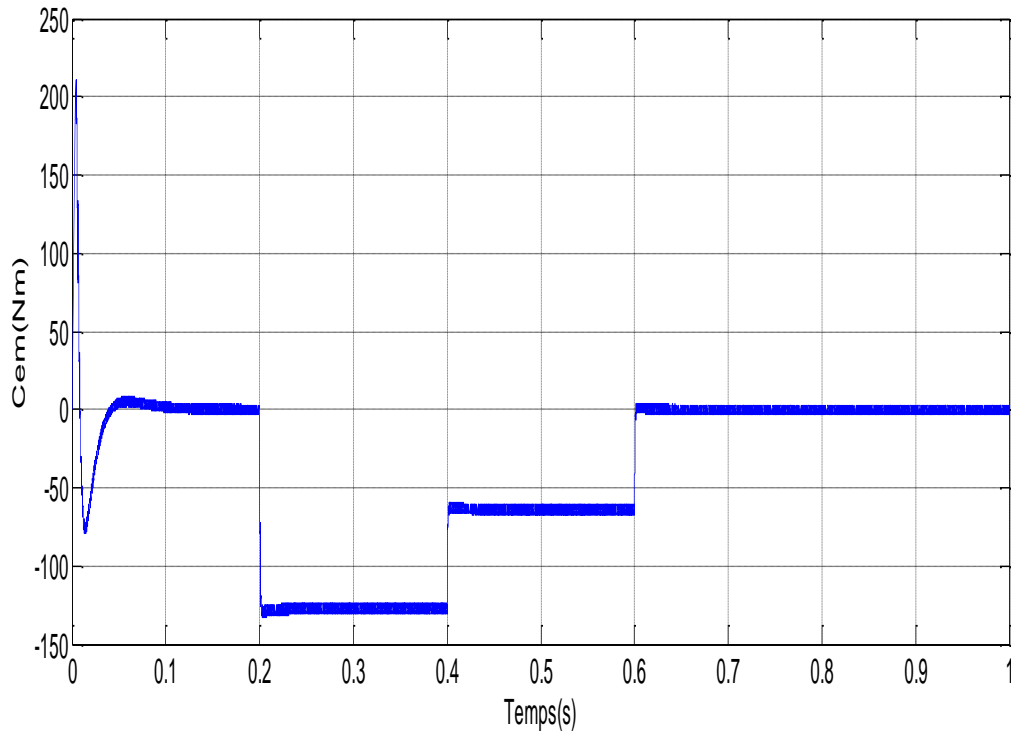


Figure IV18- couple électromagnétique cem (N.m)

IV.7 Interprétations des résultats

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

Donc :

- Les deux puissances présentent une robustesse acceptable malgré la simplifie des régulateurs applique qui sont de type PI.
- La puissance active du cote statorique est négative entre les instant $t=0.2s$ et $t=0.6s$ ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA.
- La composante quadrature du courant rotorique I_q contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe I_{dr} contrôle la puissance réactive échange entre le stator et le réseau.
- Les oscillations des différente grandeurs sont dues a la présence de l'onduleur.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux rotorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus réponde. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique. Ainsi, on a représenté trois modes de commande de la MADA ont été réalisés .Un mode direct dans lequel les puissances sont mesurées et comparées à leurs références. Un autre indirect où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances.

A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation qui ils sont obtenu, sans onduleur et avec utilisation un onduleur de tension a deux niveaux

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une problématique générale de la modélisation et la commande de système renouvelables, une chaîne éolienne verticale à attaque direct à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation,. Dans ce cadre, nous avons effectué la modélisation et la commande de ces systèmes sur le logiciel MATLAB/SIMULINK. Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art sur la chaîne éolienne est présenté dans le premier chapitre, nous avons présenté un bref historique de l'énergie éolienne, le développement de cette énergie en Algérie et leur classement mondial. Puis, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes. Ainsi, nous avons illustré le principe de fonctionnement et la constitution générale d'un système éolien. Ensuite, nous nous sommes intéressés au système éolien à attaque direct (sans boîte de vitesse), avec une turbine de type H-Darrieus et une asynchrone à double alimentation. Enfin, au regard de cet état de l'art, la problématique de la présente thèse et les objectifs fixés, sont présentés. Dans le deuxième chapitre de la partie I, un modèle de la turbine éolienne de type HDarrieus a été établi dans le but d'appliquer une technique de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de puissance. Le modèle dynamique de la MADA est formulé dans le référentiel $(d; q)$ lié au champ tournant et de son alimentation constituée d'un redresseur-onduleur équipé d'une commande MLI de type «sinus-triangle». Les résultats de simulation du système éolien (turbine-GADA) montrent un fort couplage entre la puissance active et la puissance réactive. Ce problème exige l'introduction de la commande vectorielle directe et indirecte. Dans la dernière chapitre nous avons détaillé tous les éléments constitutifs du système de conversion éolienne en associant la partie mécanique à la partie électrique, ainsi que la commande de chacun afin de faire fonctionner l'ensemble au maximum dans un état optimal. En outre de la commande

vectorielle de la GADA qui définit les signaux de commande du premier convertisseur, et de part l'existence du bus continu nous avons étudié le contrôle de la liaison au réseau définissant la commande du deuxième convertisseur. Ensuite, on a regroupé l'ensemble afin d'obtenir une connexion d'une GADA de 1.5 MW au réseau .

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [2]N.Cherfia "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007.
- [3] F.Poitière" Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone _a cage autonome - Machine asynchrone _a double alimentation reliée au réseau" thèse doctorat Juin 2006
- [4] :A.Belguidom « les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides », Mémoire de Magister,Université Mouhamed kiderBiskra
- [5] :F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.
- [4] T.Daoudi "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'un Générateur asynchrone thème magister. Univ 2017
- [6] : A. MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse. 05/04/2005.
- [7] : M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [8] :Y. A. BENCHERIF, " Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2008.
- [9]:Y. A. BENCHERIF, " Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2008.

[10] F. Poitiers, «Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[11]: S. EL-AIMANI, «Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2004.

[12]: [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 Magistère, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna, Département d'Electrotechnique, 2004.

[13] : M.Hassani, K.Benchaib « Etude d'un système de production d'énergie éolienne »mémoire de master, Centre universitaire d'Ain –Temouchent, 2016

[14] :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.

[15] : F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.

[16]:F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El- oued.2013

[17]:Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.

[18] A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

- [19]: M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [20] : F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.
- [21] : Global Wind Energy Council, "Global Wind 2008 Report", disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [22] : H. TAMRABET, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone", mémoire de magister, université de Batna. 20 /05 /2006.
- [23] :Industriels et Electrification, Laboratoire de recherche sur l'électrification des entreprises industrielles (LREED), BOUMERDES 2008.
- [22] : H. TAMRABET, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone", mémoire de magister, université de Batna. 20 /05 /2006.
- [24] : R. AZAIZIA, "Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux", mémoire de magister, université m'Hamed Bougara. 2008.
- [25] N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.
- [26] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ?,» Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7.
- [27].B. REGUIG «Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation " Application à l'énergie éolienne " », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, 2016.
- [28] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.
- [29].A. BENAMOR « Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à

Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique , Université d'El Oued, 2013

[30].B. TOUAL « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à

Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », thèse de magister de l'Université de Batna, 2010

[31]. A. MELLOUL « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », Mémoire de Magister en Électrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE), 2011.

[32].O. DJAAFRI et A.E. HARIZI «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne» Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.

[33] S. METATLA ; « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire de magister, ENP, el Harrach 2009.

ANNEXE

Annexe A :

Paramètres utilisés

A.1. Les valeurs nominales :

1.5kW ; 398/690 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A ; 1455 tr /min

A.2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R= 35.25\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G= 90$.
- Densité de l'air à 15°C : $\rho =1.225 \text{ kg. m}^{-3}$

A.3. Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine $J_{turbine} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f=0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

A.4. Données de la machine à double alimentation (GADA)

- R_s (Résistance du stator) = 0.012Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 0.021Ω
- L_s (Inductance du stator) = 0.0137 H
- L_r (Inductance du rotor) = 0.0135H
- M (Inductance mutuelle) = 0.0135
- P (Nombre de paire de pole) = 2

Annexe .B :

Paramètres des régulateurs

B. Régulation de la commande PI

$$\left\{ \begin{array}{l} k_p = 10e - 04 \text{ (boucle de courant)} \\ k_i = 3 \text{ (boucle de courant)} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{pp} = 71 \text{ (boucle de puissance)} \\ k_{ip} = 0.007 \text{ (boucle de puissance)} \end{array} \right.$$