



N° d'ordre:
N° de série:



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

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies

Filière: Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: Machines Électriques

Par: Zelaci Samir ,Beddi Ayoub , Omran ilias

Thème

**Commande prédictive d'une génératrice
asynchrone à double alimentation**

Devant le jury composé de:

Mr. Allal Abderrahim	Président
Mr. Kechida Ridha	Examineur
Mr.Serhoud Hichem	Encadreur

2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۴۳۸



Dédicace

*Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une
pensée éclairée ;*

*Ils ont été les premiers à être crédités de notre
obtention de l'enseignement supérieur*

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

*A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous
a apaisés,*

*Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous devenions
vieux*

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

*A tous nos honorables professeurs ;
Qui n'a pas hésité à nous tendre la main*

Je te dédie cette recherche

Remerciements

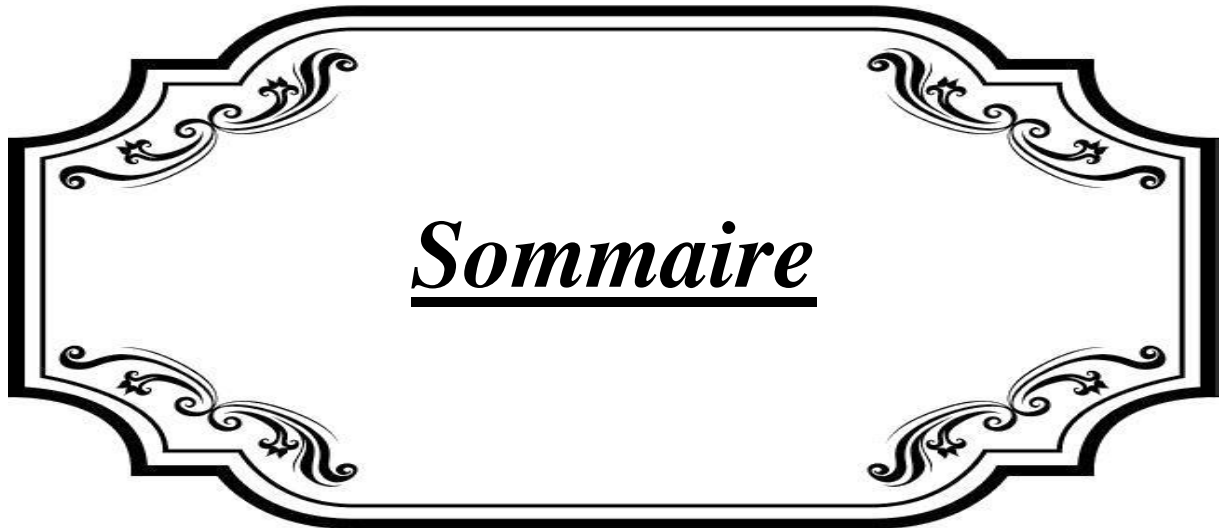
Je remercie Dieu pour l'accomplissement de Ses promesses et pour être le Guide de mes pas et mon Appui.

Nous tiens à remercier profondément mon encadreur le

***Dr.SARHOUD .H** qui je dois tous le respect et la reconnaissance, grâce à sa patience, sa présence, ses conseils et ses remarques, ce travail est mené à terme.*

Je remercie également : Les membres du jury pour avoir accepté de lire mon travail et m'apporté les remarques nécessaires.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé dans les moments pénibles (covid-19) et qui m'ont donnée la force et la volonté de continuer et réaliser ce modeste travail



Sommaire

Sommaire

	page
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	i
Notations symboliques	vii
Introduction générale	01
Chapitre I: Les énergie éolienne à vitesse variable	
I.1.Introduction	03
I.2.Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	03
I.3.Définition de l'énergie éolienne	04
I.4.Constitution d'une éolienne	04
I.4.1. Principe	04
I.4.2.Constitution et Fonctionnement d'une éolienne	05
I.5.Les types d'éolienne	07
I.5.1.Éoliennes à axe vertical	07
I.5.2.Eoliennes à axe horizontal	08
I.6.Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	08
I.6.1.Bilan des forces sur une pale	08
I.6.2.Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	09
I.7.Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique	10
I.7.1.Eoliennes à Vitesse Fixe	11
I.7.2.Eoliennes à Vitesse Variable	12
I.7.3.Eolienne à vitesse variable à base de la MADA (structure de Scherbius avec convertisseurs MLI)	14
I.8.Énergie disponible dans le vent	14
I.8.1 Le coefficient de puissance C_p	14
I.8.2 Théorie de Betz	15
I.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	16
I.9.1.Systèmes non couplés au réseau alternatif	16
I.9.2 Systèmes couplés au réseau alternatif	16
I.10.Fonctionnement à vitesse variable	21
I.11.Zones de fonctionnement d'une éolienne	22
I.12.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	23
I.12.1.Avantages	23
I.12.2.Inconvénients	23
I.13.Conclusion	23
Chapitre II: Modélisation et commande vectorielle de la GADA	
II.1.Introduction	25
II.2.Description de la GADA	25
II.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	25

II.4.Constitution de la GADA	26
II.5.Structure de la machine	27
II.6.Domaines application de la GADA	27
II.7.Modes de fonctionnement de la GADA	28
II.7.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	28
II.7.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	29
II.7.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	29
II.7.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	29
II.8.Avantages de la GADA	29
II.9.Inconvénients de la GADA	30
II.10. Modélisation de la GADA	30
II.10.1. Hypothèses simplificatrices	30
II.10.2.Modèle mathématique de la GADA	31
II.10.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q)	33
II.11.Principe de la commande vectorielle de la GADA	35
II.12.Etablissement du modèle de la GADA	35
II.12.1.Choix du référentiel pour le modèle diphasé	35
II.13.Types de commande vectorielle	38
II.13.1.Commande directe	39
II.13.2.Commande indirecte	39
II.13.3.Type du régulateur PI	41
II.14.Résultats de simulations	41
II.15.Interprétations des Résultats	43
II.16.Conclusion	44
Chapitre III: Commande du système éolien à vitesse variable basé sur GADA	
III.1.Introduction	46
III.2.Modèle de la Turbine	46
III.3.Modèle de la chaîne de conversion	48
III.3.1.Architecture du dispositif de commande	48
III.4.Filtre (côtéréseau)	49
III.4.1.Modélisation du filtre passif (côté réseau)	49
III.5.Modélisation de la turbine	49
III.5.1.La modélisation	49
III.5.2.Schéma bloc du modèle de la turbine:	53
III.6.Stratégie de commande de la turbine	53
III.7.Système de la chaîne globale	54
III.8. Principe de MPPT	56
III.9.Résultats de simulation	58
III.10.Interprétations des Résultats	58
III.11.Conclusion	60
Chapitre IV: Commande prédictive de GADA	

IV.1.Introduction	62
IV.2.La philosophie de la commande prédictive	62
IV.3.Différents types de commande prédictive	63
IV.4.Concepts de base de la commande prédictive	64
IV.5.Stratégie de la commande prédictive	65
IV.6.Intérêts de la commande prédictive	66
IV.7.Modélisation du système	67
IV.8.Principe de la commande prédictive en courant rotorique du GADA	67
IV.9.Commande prédictive de la GADA	69
IV.9.1.La commande FS-MPC de la GADA par le contrôle de l'Onduleur	69
IV.9.2.Modèle de la GADA	69
IV.10.Modèle de prédiction de la GADA	69
IV.11.La fonction de coût pour le contrôle de l'onduleur	71
IV.12.Résultats de simulation	72
IV.13.Interprétations des Résultats	75
IV.14.Conclusion	76
Conclusion générale	77
Annexe	79
Bibliographie	84

Liste de figure

	Page
Chapitre I: Les énergie éolienne à vitesse variable	
Figure (I.1): Principe de la conversion de l'énergie éolienne.	04
Figure (I.2) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.	05
Figure (I.3) : Principes composants d'une éolienne.	06
Figure (I.4) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur	06
Figure (I.5) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable.	07
Figure (I.6): Eolienne à axe horizontal.	08
Figure (I.7) : Bilan des forces sur une pale.	08
Figure (I.8): Flux d'air sur un profil de pale "stall".	09
Figure (I.9): Variation de l'angle de calage d'une pale.	10
Figure(I.10):Evolution de la configuration électrique	11
Figure(I.11):Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage	12
Figure(I.12):Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage	12
Figure(I.13):Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	12
Figure(I.14):Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator	13
Figure (I.15): Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne	13
Figure(I.16):Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	14
Figure(I.17):Tube de courant autour d'une éolienne.	15

Figure(I.18):Coefficient de puissance.	16
Figure(I.19):Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.	16
Figure(I.20):Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.	17
Figure(I.21):Contrôle de glissement par l'énergie dissipée.	18
Figure(I.22):Structure de Kramer pour la MADA.	19
Figure(I.23):Structure avec deux ponts à diodes et à transistors.	19
Figure(I.24):Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.	20
Figure(I.25):Structure avec convertisseurs à MLI.	20
Figure(I.26):Aérogénérateur à vitesse variable.	21
Figure(I.27):Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	22
Chapitre II: Modélisation et commande vectorielle de la GADA	
Figure(II.1):Modes de fonctionnement de la GADA	26
Figure (II.2) : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur Statique	27
Figure(II.3):Structure de la machine.	27
Figure(II.4):Eolienne installée en mer	28
Figure (II.5):Modes opérationnels caractéristiques de la GADA	29
Figure(II.6):Représentation simplifié de la GADA	31
Figure(II.7):Modèle de PARK de la GADA	34
Figure (II.8): Référentiel diphasé d q lié au champ tournant statorique.	36
Figure(II.9):Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimenté en tension.	38
Figure (II.10):Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	39
Figure (II.11):Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.	40
Figure (II.12):Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	41
Figure (II.13):La puissance active et réactive statorique	41
Figure (II.14): courant statorique l'axe d(a) et courant statorique l'axe q(b)	42
Figure (II.15): Courant rotorique l'axe d(a) et Courant rotorique l'axe q(b)	42
Figure (II.16): Courant d'une phase statorique(a) et Courant d'une phase rotorique(b)	42
Figure (II.17): Couple électromagnétique(a) et Flux statorique(b)	43
Chapitre III: Commande du système éolien à vitesse variable basé sur GADA	
Figure(III.1):Structure du système de conversion éolien	47
Figure(III.2):Modèle de la chaîne de conversion éolienne.	48
Figure(III.3):Schéma d'une turbine éolienne	51
Figure(III.4):Schéma bloc du modèle de la turbine	53
Figure(III.5):Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne	53
Figure(III.6):Structure de la chaîne global	54
Figure (III.7):Vitesse du vent (a)et Vitesse de rotation(b)	55
Figure (III.8):Puissance active statorique (a) et Puissance réactive statorique(b)	56
Figure (III.9):Courant rotorique d'un phase (a) et Courant statorique d'un phase(b)	56
Figure (III.10):Coefficient de puissance de la turbine(a) et Vitesse relative de l'éolienne(b)	56

Chapitre IV: Commande prédictive de GADA	
Figure (IV.1) :Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini	60
Figure (IV.2) :Schéma général de la commande prédictive à états finis	60
Figure (IV.3) :Classification de commandes prédictives utilisées dans le système d'électronique de puissance	61
Figure (IV.4) :Stratégie de la commande prédictive	64
Figure (IV.5) : Représentation temporelle du principe de la commande prédictive	66
Figure (IV.6):Organigramme de la commande prédictive en courant de la GADA	69
Figure(IV.7): Commande prédictive de la GADA	70
Figure (IV.8) : Vitesse de vent en fonction du temps(a) et La vitesse rotorique(b)	70
Figure (IV.9) : Puissance active statorique(a) et Puissance réactive statorique et sa référent(b)	71
Figure (IV.10) : les composantes directe et quadrature du courant rotorique(a) et courant d'une phase rotorique(b)	71
Figure (IV.11) : Courant d'une phase statorique(a) et flux rotorique et statorique(b)	72
Figure (IV.12) : Vitesse relative de l'éolienne(b) et Coefficient de puissance de la turbine(a)	72
Figure (IV.13) :MPPT de l'éolienne	73

Notations symboliques

Symbole	Signification	Unité
C_p	Coefficient de puissance	
C_e	Couple électromagnétique	$N.m$
C_{mec}	Couple mécanique, ce dernier prend en compte	$N.m$
C_{vis}	Couple visqueux	$N.m$
C_r	Couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
J	Moment d'inertie des parties tournantes	$K.g.m^2$
J_t	Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne	
f	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m.s/r$
G	Rapport de vitesse du multiplicateur	
K_p, K_i	Gains du régulateur PI classique	
M	Inductance magnétisante	H
M_{sr}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	Inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	Inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_s	Puissance active statorique	W
P_v	Puissance portée par le vent	W
$P_{rés}$	Puissance de réseau	W
Q_s	Puissance réactive statorique	VAR
R	Rayon de la turbine	M
R_s	Résistances statorique	Ω
R_r	Résistances rotorique	Ω

L_S	Inductances propres statorique	H
L_r	Inductances propres rotorique	H
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	M
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	W
i_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
v_{abcr}	Tensions instantané des phases rotoriques	V
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques	A
v_{abcs}	Tensions instantané des phases statoriques	V
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)	A
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
p	Nombre de paires de pôles	
s	Opérateur de Laplace	
v_{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
v_{abcs}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)	V
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)	V
β	Angle de calage des pales	$^\circ$
Ω	vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
Ω_{ref}	vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine	rd/sec
θ_s	Angle entre l'axe rotorique et l'axe statorique .	Rd
θ_r	Position de stator	Rd
Λ	Position électrique de rotor	Rd
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec

ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	<i>rd/sec</i>
ω_S	Pulsation des courants statoriques	<i>rd/sec</i>
Φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	<i>Wb</i>
Φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	<i>Wb</i>
Φ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (<i>d, q</i>)	<i>Wb</i>
Φ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère (<i>d, q</i>)	<i>Wb</i>
<i>PI</i>	Proportionnelle intégrale	
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe	
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
<i>MADA</i>	Machine Asynchrone à Double Alimentation	
<i>MPC</i>	model predictive control	
<i>GPC</i>	Green Power Company	
<i>GADA</i>	Générateur Asynchrone à Double Alimentation	
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsions	
<i>MPPT</i>	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale	
V_{rot}	Représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur	
<i>V</i>	vecteur	
\vec{V}_{res}	Résultante de ces deux vecteurs est appelée	
\vec{F}_{res}	L'action du vent sur la pale produit une force	
\vec{F}_{ax}	se décompose en une poussée axiale	
F_{rot}	une poussée en direction de la rotation	
λ	Vitesse spécifique	
$s_{a,b,c}$	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension	
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien	
P_{mT}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	
<i>E</i>	Puissance éolienne instantanée	
V_1 et V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne	

W_{gl}	Vitesse angulaire de glissement
W_r	Vitesse avec le rotor tourne
W_g	Vitesse de glissement
R_a, R_b, R_c	Trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator
S_a, S_b, S_c	Trois bobines statorique
$R:$	Longueur de pales
$\Omega_t:$	Vitesse de la turbine.
V_{vent}	Vitesse de vent en (m/s)



Introduction générale

Introduction générale


La production d'électricité dans le monde entraîne différents types de pollution et cela indique que les pays s'intéressent de plus en plus à la production d'électricité par l'énergie éolienne afin de pour produire une énergie propre et durable, et l'état avancé de la recherche dans le domaine de l'énergie éolienne montre la volonté de développer des éoliennes plus puissantes et capables de mieux exploiter l'énergie disponible dans le vent, de nombreuses recherches sont actuellement en cours. Selon les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour produire de l'énergie éolienne une grande partie des éoliennes installées aujourd'hui sont équipées d'un générateur Double alimentation asynchrone (GADA). Ce dernier permet la production d'électricité à vitesse variable, ce qui permet de mieux exploiter les ressources éoliennes.

Dans le premier chapitre, nous présentons les derniers développements de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu des différents types d'éoliennes, des divers ensembles convertisseurs de machines, utilisés pour la conversion du vent basé sur une machine asynchrone à double puissance que vous étudierez.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation de l'éolienne et la commande vectorielle dans le but de régler la puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée à vitesse variable (avec turbine).

Dans le troisième chapitre, nous discuterons du contrôle d'un système éolien à vitesse variable basé sur le générateur asynchrone à double alimentation (GADA) donc les stratégies de commande élaborées ont été simulées.

Le dernier chapitre, on propose la commande prédictive à ensemble finis appliquée sur la DFIG à l'aide de régulateurs prédictive en courant rotorique mixte avec la commande vectorielle par orientation du flux statorique. Les simulations de ce stratégie de contrôle montrent un bon découpage et le bien la validité.



Chapitre I:
Les énergie éolienne à vitesse
variable

I.1.Introduction:

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle. 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, énergie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Cette force peut être utilisée mécaniquement pour produire d'électricité. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur[1].

Ce chapitre fera une présentation générale des différents types d'éoliennes, leur fonctionnement et conception ainsi que leurs avantages et inconvénients. La dernière partie de ce chapitre est consacré aux différentes machines électriques et plus spécifiquement la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation). On parle de Park éolienne ou de ferme éolienne pour décrire des unités groupées pour la production d'énergie électrique. Ces unités peuvent être installées en terre ou mer. Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

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

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail. Historiquement, en 1888 Charles F. Brush a construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19^{ème} siècle). La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité a été mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890 pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il a créé l'éolienne Lykkegard, dont il a vendu soixante-douze exemplaires en 1908.

I.3. Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique[2].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

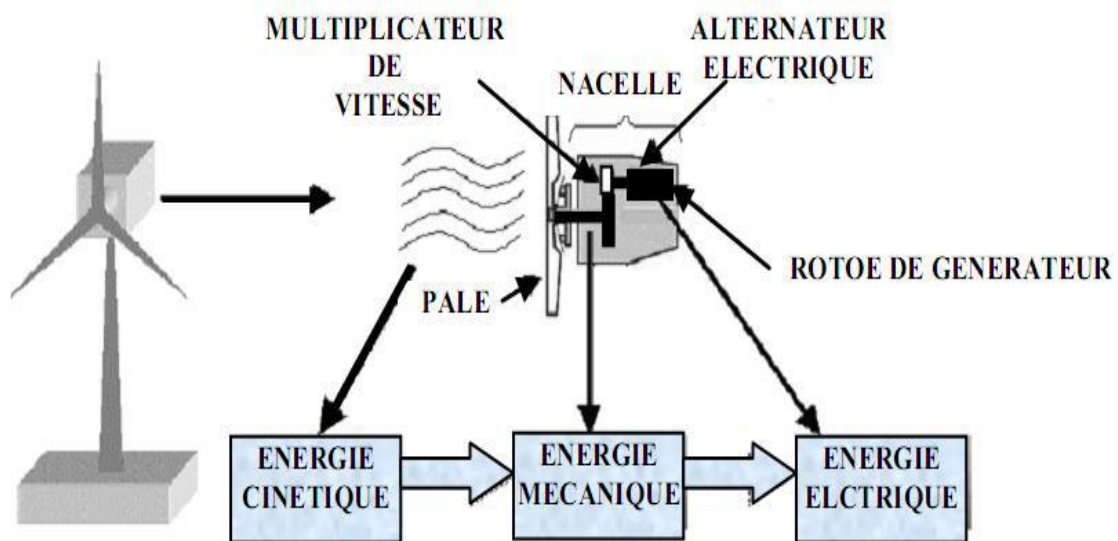


Figure (I.1): Principe de la conversion de l'énergie éolienne[3].

I.4. Constitution d'une éolienne :

I.4.1. Principe :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes : au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau

électrique. Il doit donc avoir une conversion et transmission régulière de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

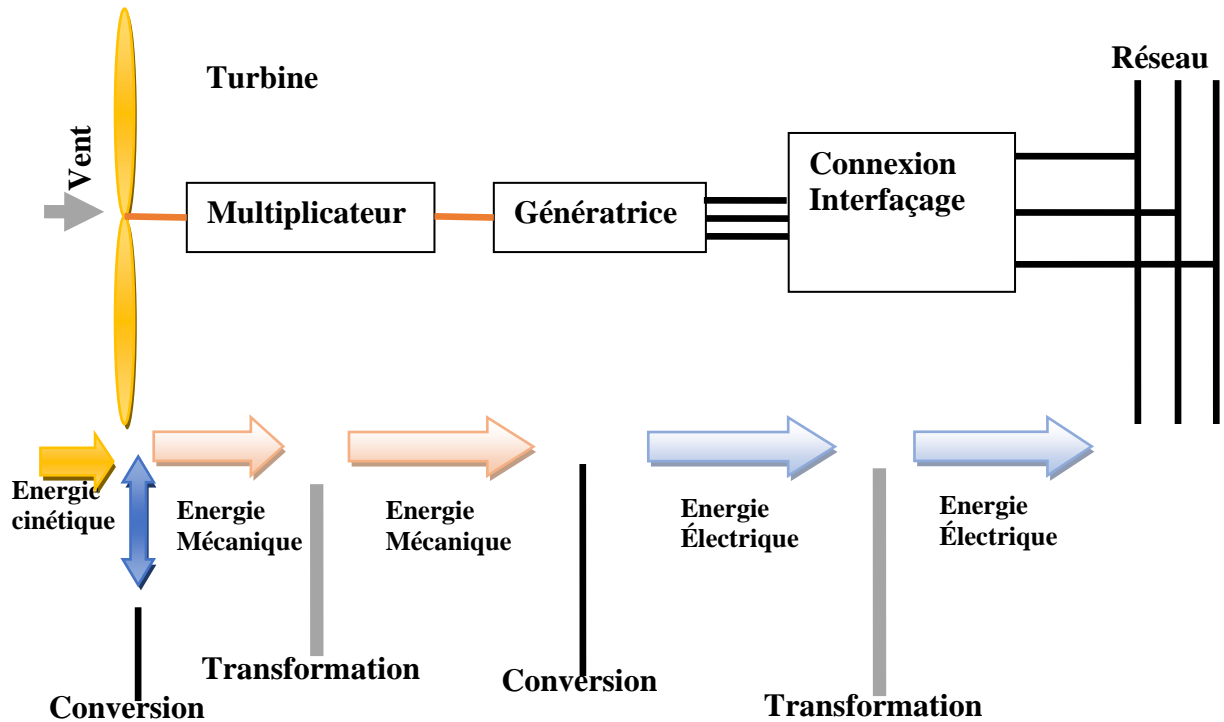


Figure (I.2) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne[3].

I.4.2. Constitution et Fonctionnement d'une éolienne:

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure(I.4) Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- **Le mât:** Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 100 m de hauteur)[4].

- **Le rotor :** Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [4].

- **La nacelle :** Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I.3) : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes

hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [4].

● **Les pales** : Elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en compte pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

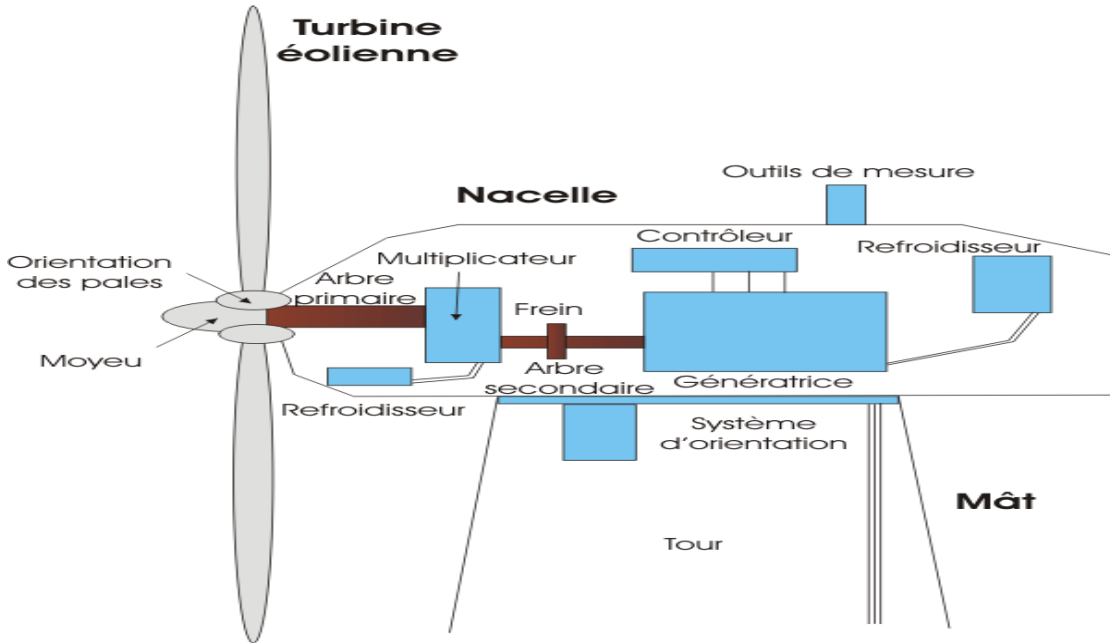


Figure (I.3) : Principes composants d'une éolienne[4].

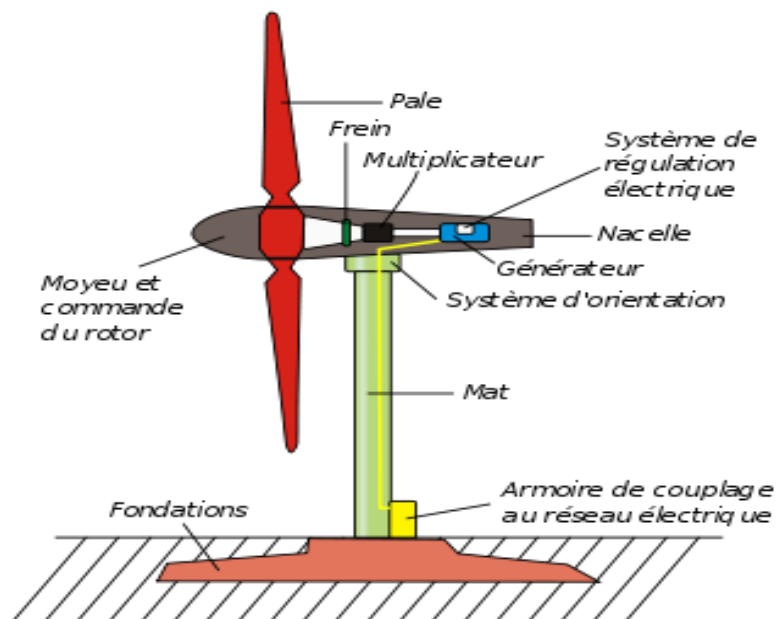


Figure (I.4) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur[4].

I.5. Les types d'éolienne:

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

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

I.5.1. Éoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mât qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [5].

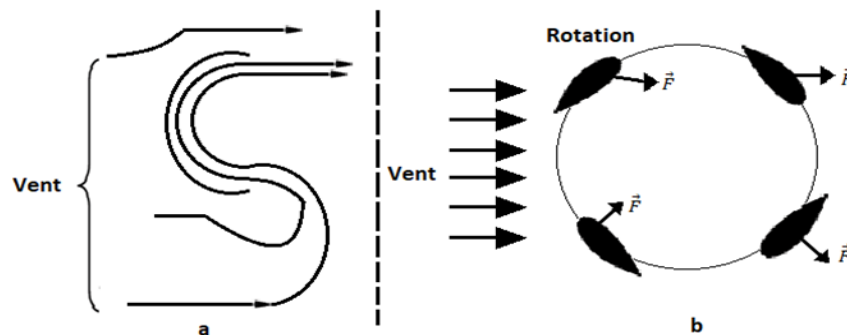


Figure (I.5) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable[5].

I.5.2. Eoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal plus largement employées nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût 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 coût moins important [6].

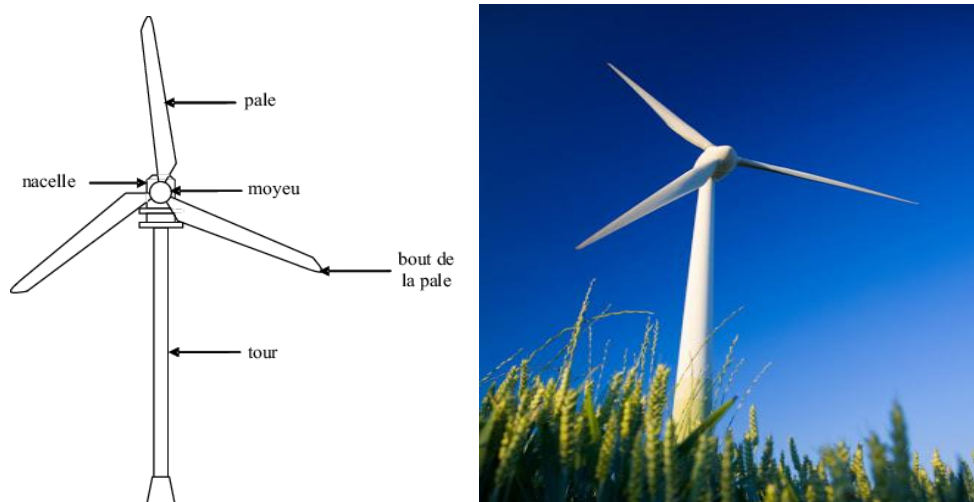


Figure (I.6): Eolienne à axe horizontal[6].

I.6. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne:

I.6.1. Bilan des forces sur une pale:

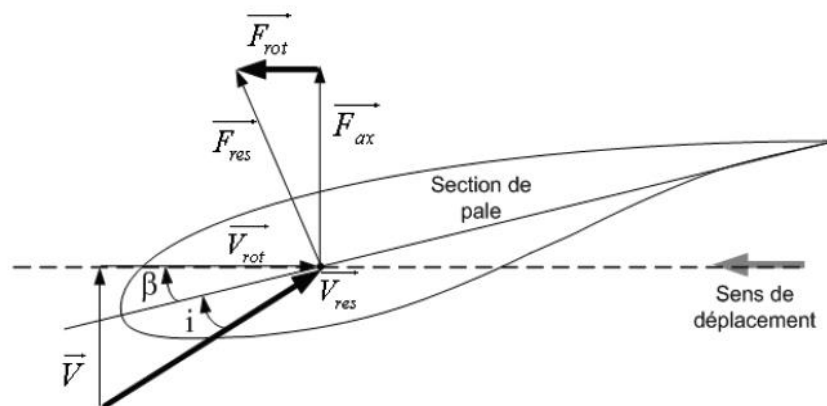


Figure (I.7) : Bilan des forces sur une pale[6].

La Figure (I.7) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [6]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

I.6.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne:

I.6.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall":

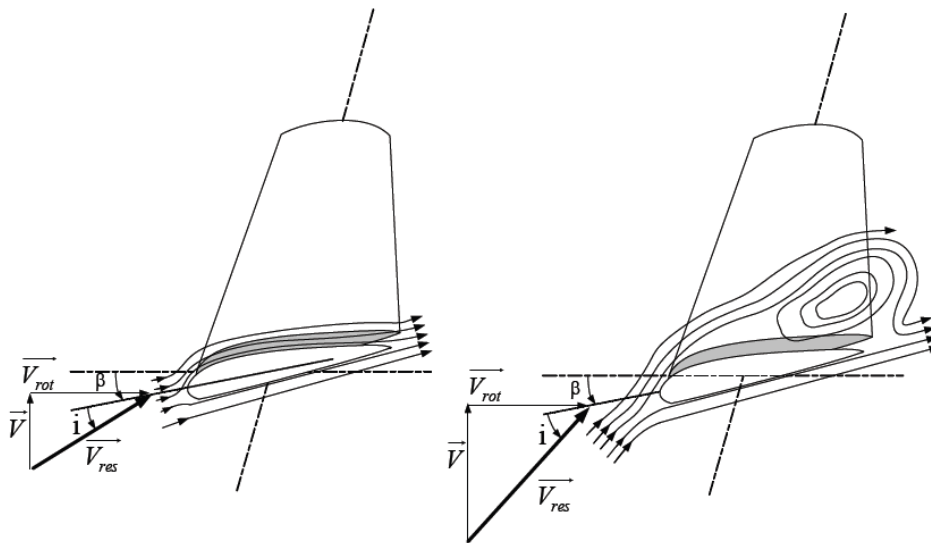


Figure (I.8): Flux d'air sur un profil de pale "stall"[6].

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_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.8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [6].

I.6.2.2. Système d'orientation des pales "pitch" :

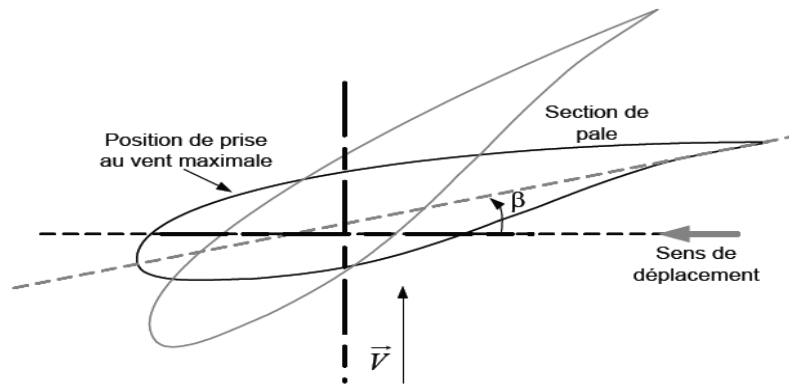


Figure (I.9): Variation de l'angle de calage d'une pale.

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

I.7. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique :

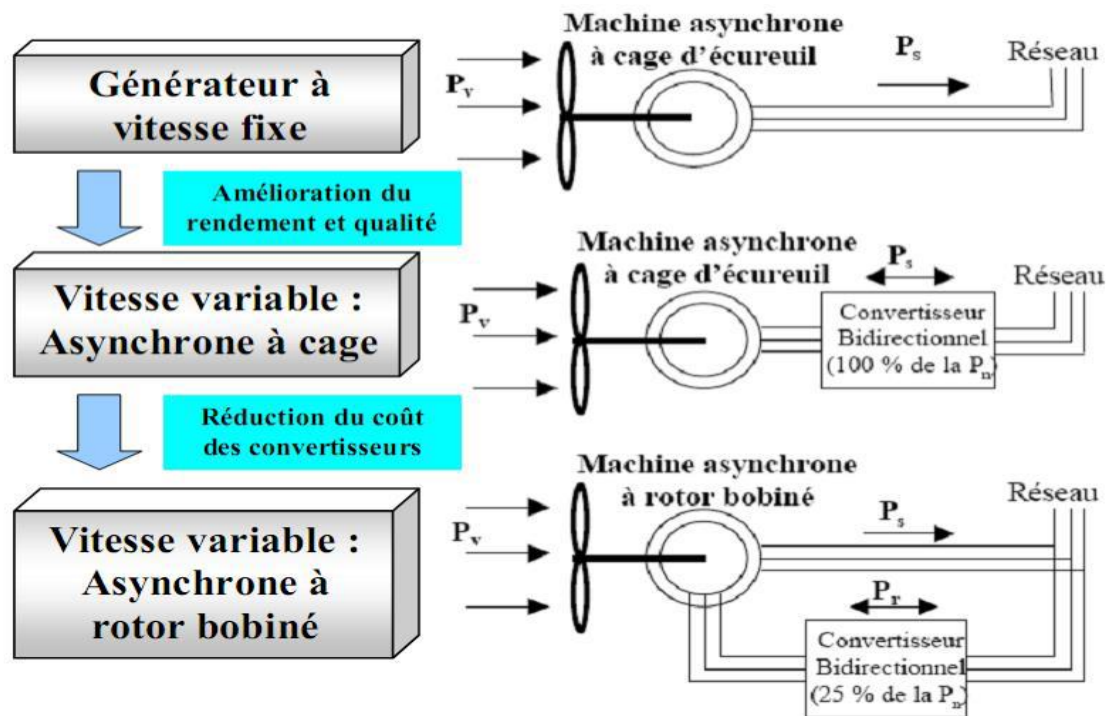
Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Comme on l'a indiqué sur la figure(I.10), ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du Système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépend de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De

plus, les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor.

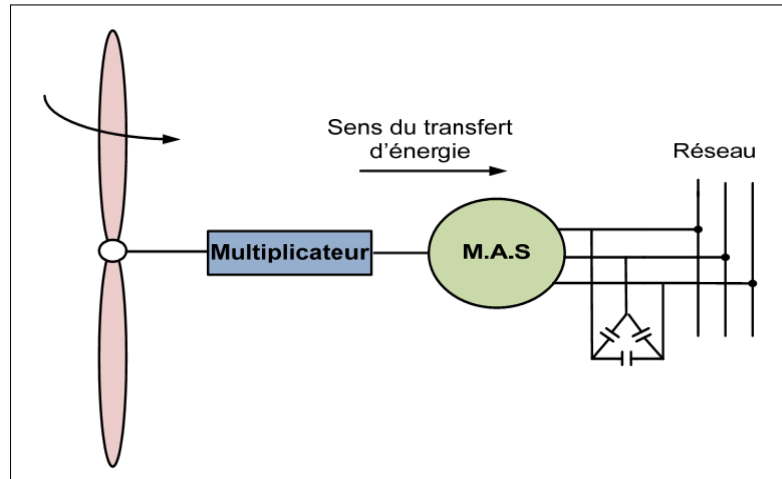
Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important. Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des machines asynchrones double Alimenté (MADA). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette Mémoire [9].



Figure(I.10): Evolution de la configuration électrique [9].

I.7.1.Éoliennes à Vitesse Fixe:

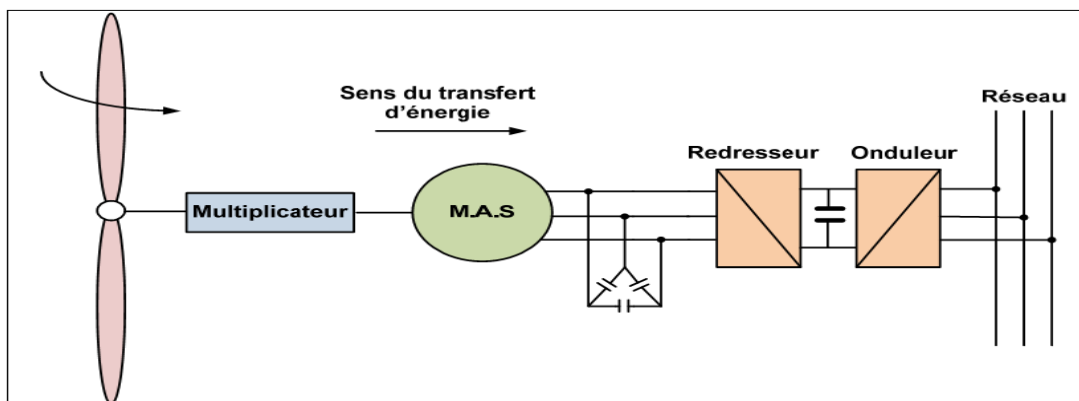
Dans le premier cas, Figure (I.11), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seuls les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles, et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [9].



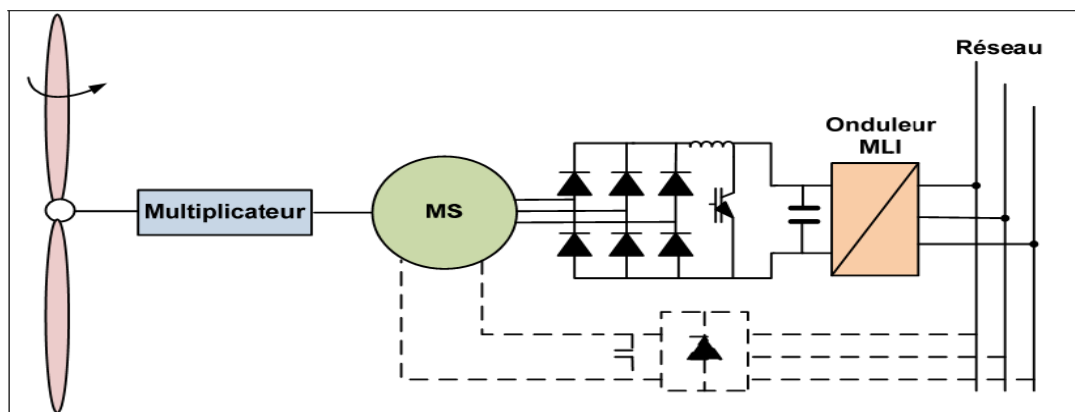
Figure(I.11):Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

I.7.2.Eoliennes à Vitesse Variable:

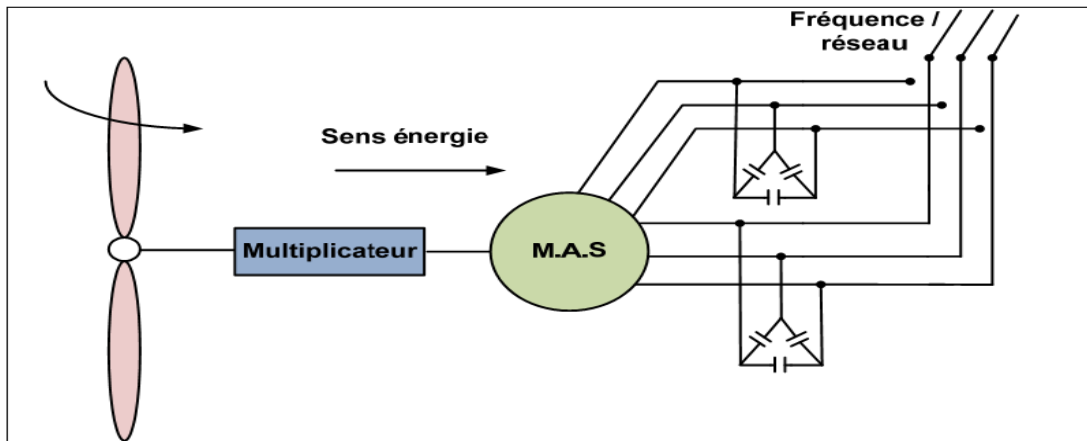
Dans le deuxième cas, Figure (I.12), une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique[9].



Figure(I.12):Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage[9].



Figure(I.13):Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone [9].



Figure(I.14): Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la figure (I.14). À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

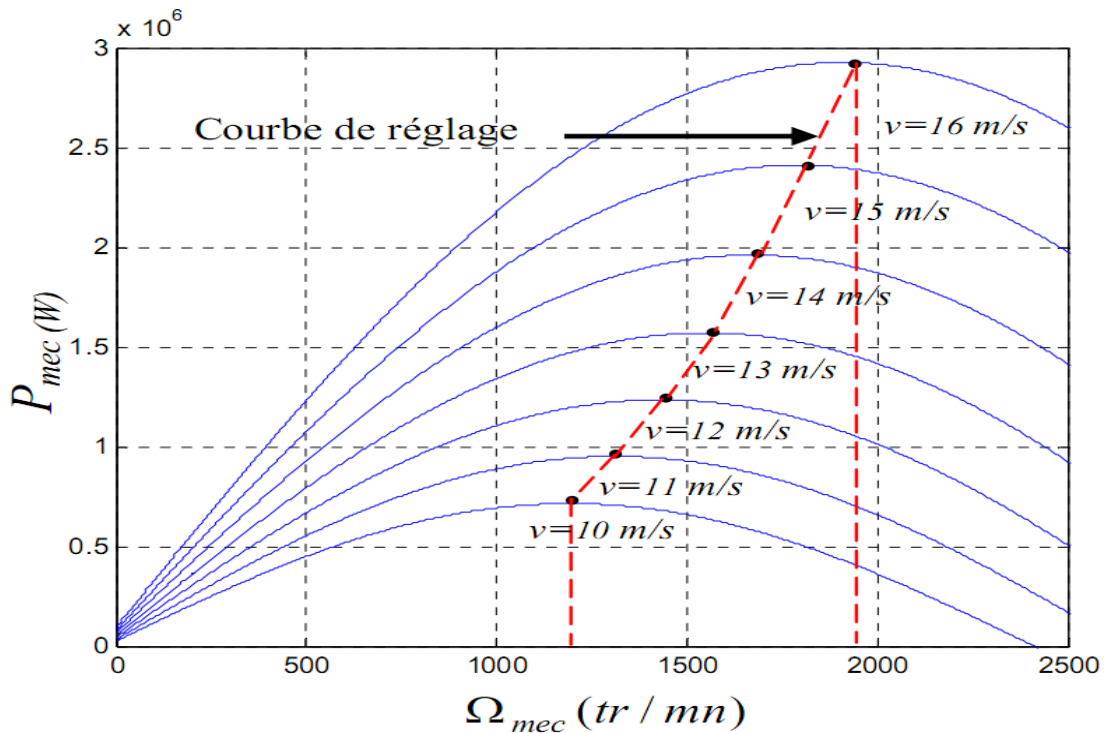


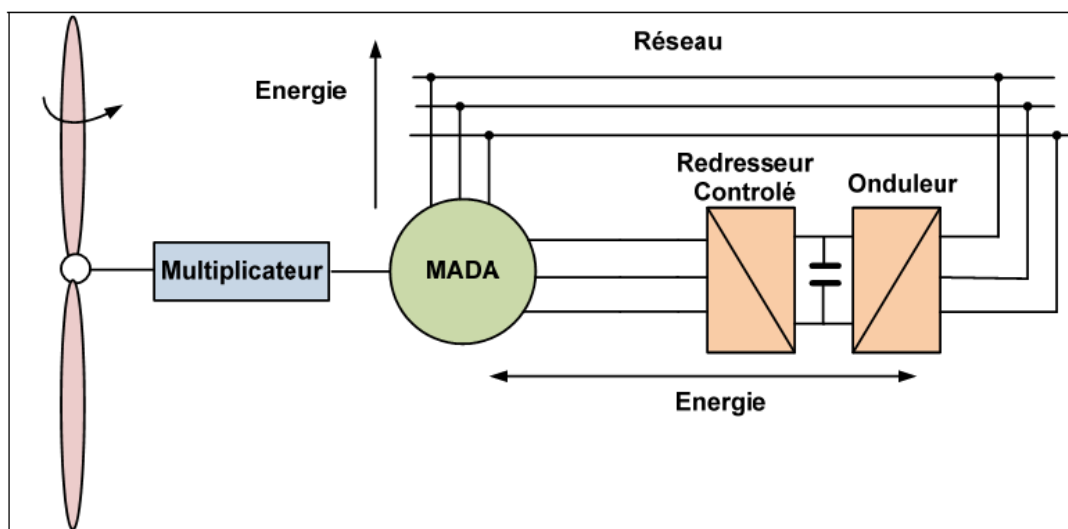
Figure (I.15): Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la figure (I.15) 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 100 et 1900 tr/min pour cet exemple [8].

I.7.3.Éolienne à vitesse variable à base de la MADA (structure de Scherbius avec convertisseurs MLI):

Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (Convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau), Figure(I.16).



Figure(I.16):Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

I.8.Énergie disponible dans le vent:

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = 0,5 m v^2$$

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors :

$$E = 0,5 \rho S v^3$$

Où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)

I.8.1 Le coefficient de puissance C_p :

En tenant compte du coefficient de puissance C_p , le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance P défini par la relation :

$$P = 0,5 C_p \rho A v$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine n et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda)$$

Avec : $\lambda = R\Omega/v$

Où R est le rayon de l'hélice et $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout des pâles. On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie de Rankine – Froude

I.8.2 Théorie de Betz:

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure(I.17) 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 traverser 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 en une seconde est :

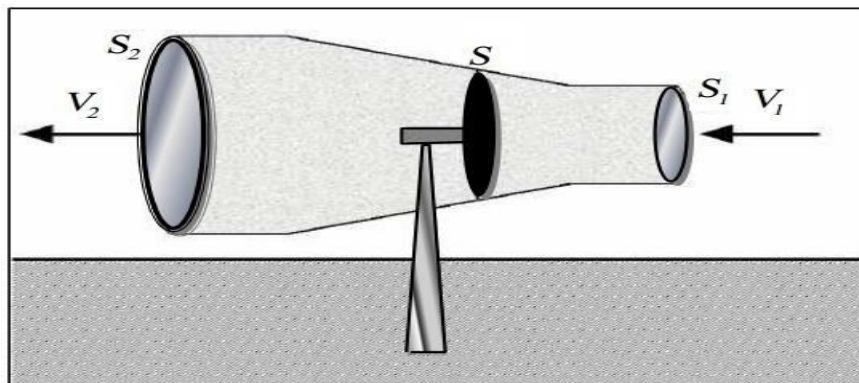
$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (I.1)$$

La puissance P_m 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) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I.2)$$

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

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (I.3)$$



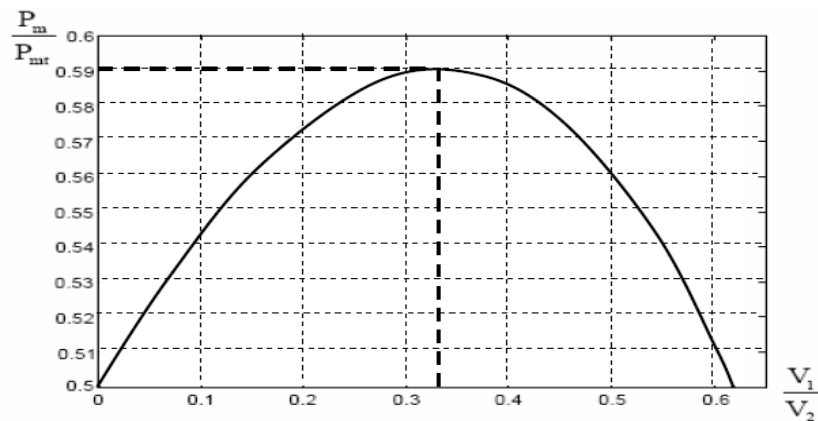
Figure(I.17): Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{mT} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{I.4}$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mT}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{4} \tag{I.5}$$



Figure(I.18): Coefficient de puissance.

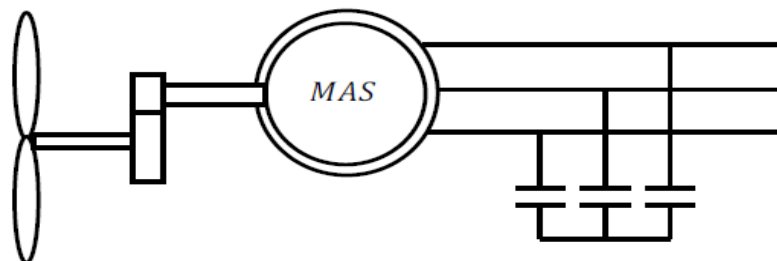
I.9.Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens:

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

- ✓ Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- ✓ L'implantation sur terre ferme (On shore) ou en mer (Offshore)
- ✓ Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.9.1.Systèmes non couplés au réseau alternatif:

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [8].



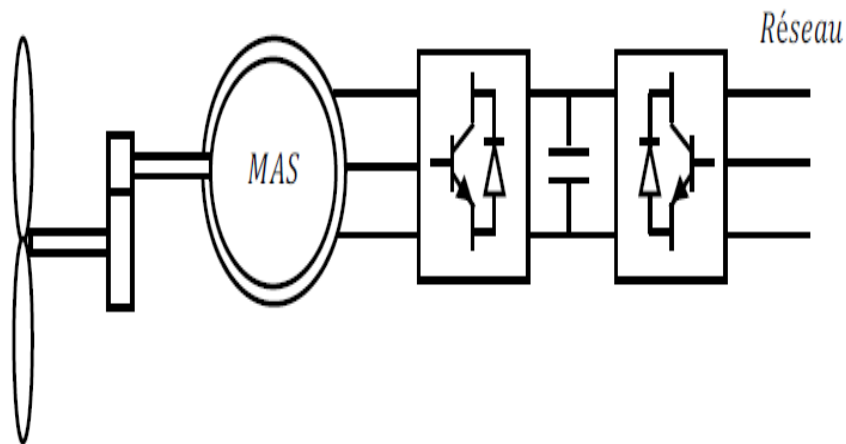
Figure(I.19):Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage[8].

I.9.2 Systèmes couplés au réseau alternatif:

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [8].

I.9.2.1. Machine asynchrone :

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance figure(I.20)[7].



Figure(I.20): Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[7].

I.9.2.2. Machine asynchrone à double alimentation:

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

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

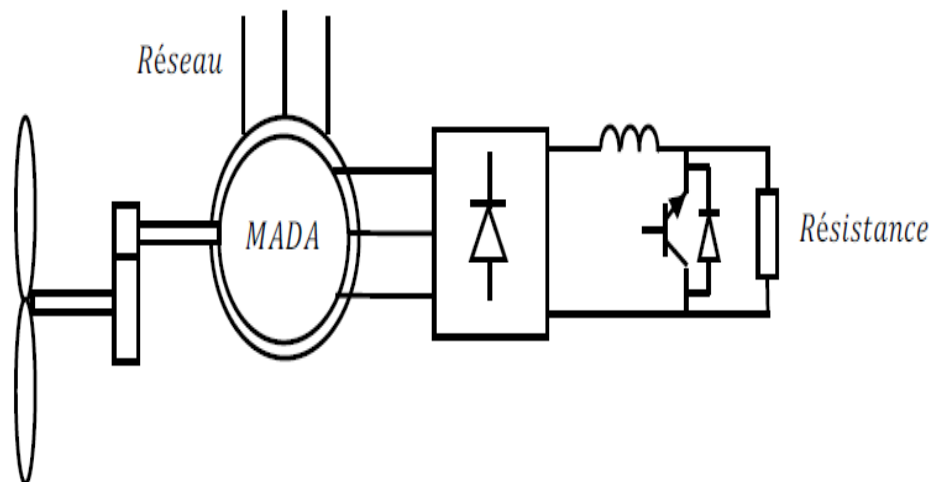
fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

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

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation avec leurs dispositifs de réglage de la vitesse à travers le contrôle de glissement sont envisageables :

A. Contrôle de glissement par dissipation de l'énergie rotorique:

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé figure(I.21). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.



Figure(I.21): Contrôle de glissement par l'énergie dissipée[7].

Vue la taille de la résistance (située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse avec un glissement maximum qui ne dépasse pas 10 %. L'inconvénient de ce principe c'est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion.

B. Transfert de la puissance rotorique sur le réseau:

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. On peut utiliser pour cette récupération un système statique de conversion d'énergie constitué par un convertisseur de puissance [7].

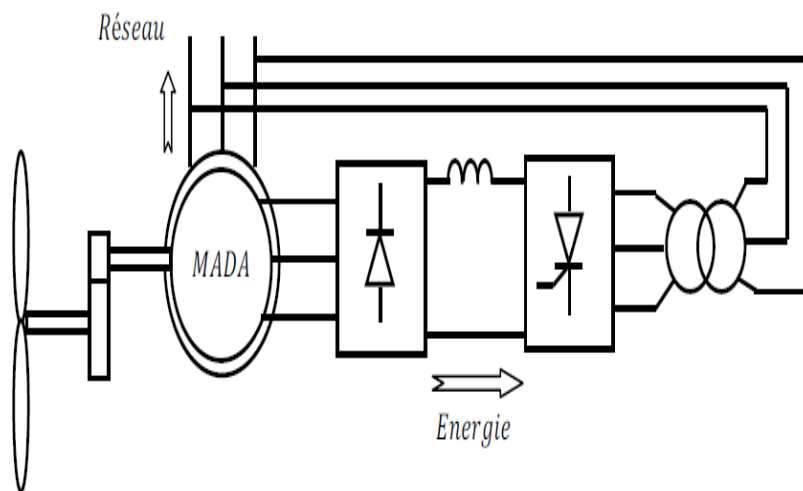
Ce convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25 % de la puissance nominale) pour un glissement maximal correspondant à la

puissance statorique nominale. Pratiquement, plusieurs solutions sont envisageables

B.1. Structure à base de pont à diodes et pont à thyristors:

Cette structure est appelée montage de Kramer. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone figure(I.22).

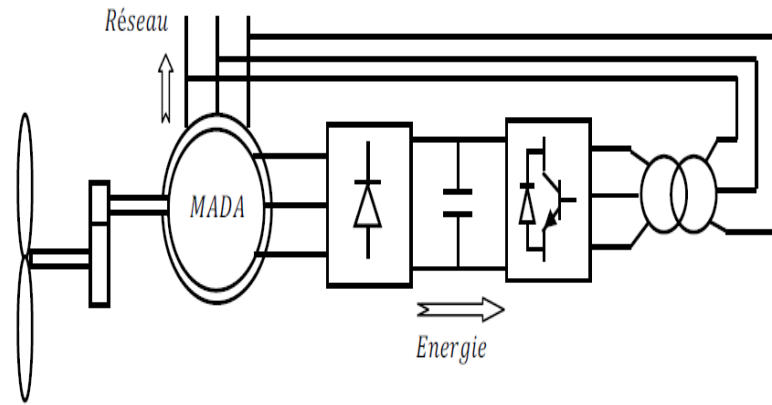
Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.



Figure(I.22): Structure de Kramer pour la MADA[7]

B.2. Structure à base de pont à diodes et pont à transistors:

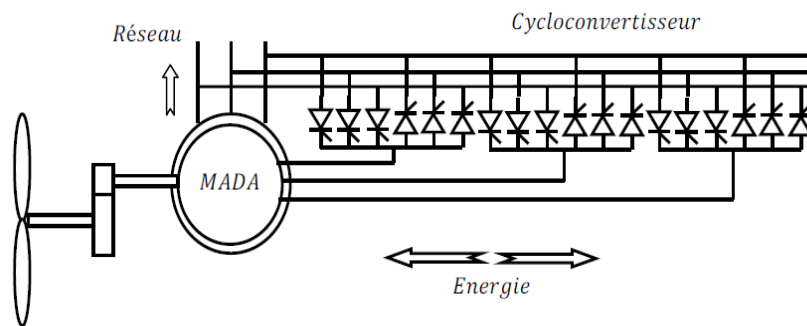
La structure consiste à remplacer l'onduleur à commutation naturelle constitué de thyristors, par un onduleur à commutation forcée et à modulation de largeur d'impulsions (MLI), constitué par des transistors de puissance figure(I.23). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont à diodes. Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tensions importantes qui peuvent réduire leur durée de vie [7].



Figure(I.23):Structure avec deux ponts à diodes et à transistors[7]

B.3.Structure à base de cyclo convertisseur:

Cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans deux sens. Cette topologie présente donc plus de marge de manœuvre pour la commande figure(I.24).

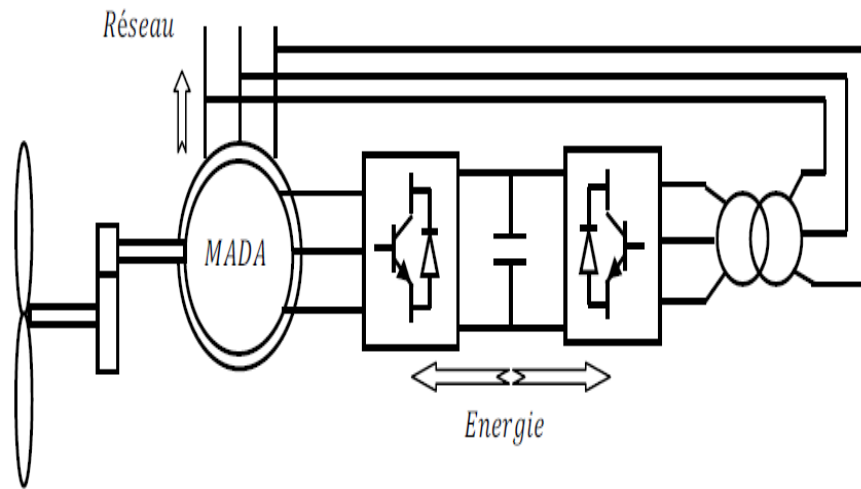


Figure(I.24):Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur[7]

Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de Scherbius". Formellement, le principe de Scherbius est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, le principe de Scherbius est reproduit à l'aide d'un cyclo convertisseur. Celui utilisé dans la figure ci-dessus est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau. Comme la puissance est bidirectionnelle, il est possible de faire varier l'énergie de glissement et faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur.

B.4.Structure à base de convertisseur à MLI:

Une autre structure intéressante figure(I.25) utilise deux ponts triphasés à IGBT commandés par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau



Figure(I.25): Structure avec convertisseurs à MLI.

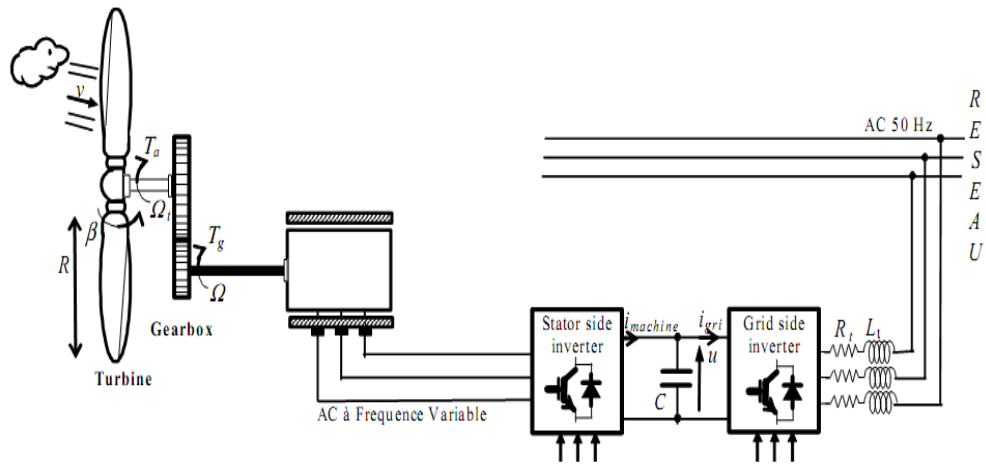
Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement du convertisseur à MLI du côté du réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

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

- ✓ Le fonctionnement à vitesse variable.
- ✓ Le convertisseur de puissance de petite dimension.
- ✓ Le niveau bas de fluctuations mécaniques.
- ✓ La possibilité de fonctionnement en hypo synchronisme et en hyper synchronisme, ce qui permet pour ce dernier mode de fonctionnement de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau.
- ✓ Et enfin le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

I.10.Fonctionnement à vitesse variable:

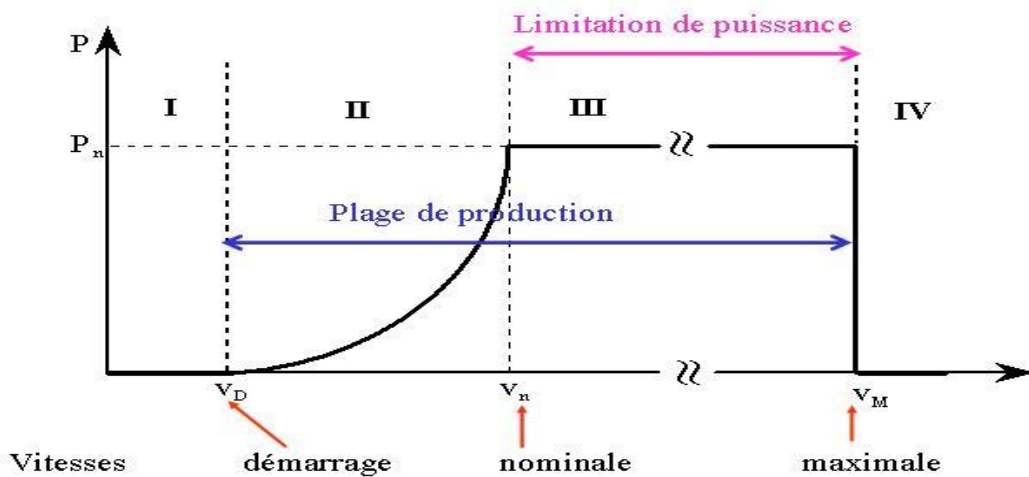
Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) figure(I.26)[8].



Figure(I.26):Aérogénérateur à vitesse variable[8]

I.11.Zones de fonctionnement d’une éolienne:

La figure (I.27) montre les zones de fonctionnement caractéristiques mesurées sur une éolienne de 1.5 MW [8].



Figure(I.27):Zones de fonctionnement d’une éolienne à vitesse variable

Il existe quatre zones de fonctionnement des éoliennes suivant la vitesse du vent

Zone 1:($V > V_1$)cette zone correspond au démarrage de la turbine avec une vitesse du vent très faible. L’énergie captée par la turbine dans cette zone est assez faible.

- ❖ V_1 : vitesse du vent correspond au démarrage de la turbine.
- ❖ V_1 :varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

Zone 2:($V_1 > V > V_2$)est la zone d’extraction maximale de la puissance (MPPT: maximum power point tracking). Elle correspond au Fonctionnement à charge partielle (CP). Dans cette zone l’angle de calage des Pales reste constant afin d’obtenir un β maximal ainsi la puissance Maximale est captée pour chaque vitesse du vent [8].

- ❖ V_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, (V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s).

Zone 3: ($V_2 > V > V_3$): elle correspond à une vitesse mécanique quasiment Constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente Très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (PC).

- ❖ V_3 vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

Zone 4 : la vitesse du vent devient trop forte, les pales sont en position drapeau (Arrêt) et la puissance extraite devient nulle.

I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

I.12.1. Avantages:

- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables[9].
- ✓ L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gazes. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21 Milles tonnes de SO₂ et 17.5 milles tonnes de Nox. Ces émissions sont les responsables des pluies acides.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Elle ne nécessite aucun carburant.
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risqué comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours se bénéficier[2].

I.12.2. Inconvénients:

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer:

- ✓ Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- ✓ L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [2].
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.

I.13.Conclusion:

Dans ce chapitre nous sommes présentés l'introduction aux systèmes éolienne est leur principe, après un rappel de notions nécessaire à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne st différents type éoliennes.

Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons que 'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse Variable et que la présence de convertisseur entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation.

Chapitre II:

Modélisation et commande
vectorielle de la GADA

II.1.Introduction:

Tel que mentionné précédemment, on retient dans notre travail la topologie usuelle de configuration pour la connexion de la GADA au réseau. Ainsi, le rotor de la GADA est connecté au convertisseur d'électronique bidirectionnel afin d'échanger la puissance dite de glissement avec le réseau. Bien que les deux convertisseurs soient identiques du point de vue réalisation et mode de commutation, leur commande diffère selon le mode de fonctionnement désiré. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'élaboration de la commande pour le convertisseur côté rotor de la GADA. A cet effet, on présentera les détails sur le fonctionnement, la modélisation et la commande de la GADA.

Comme tout système dynamique, nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel de la GADA. Nous débuterons par une définition du modèle mathématique de la machine en exprimant les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine. Par la suite, à l'aide de la transformation de Park, on obtient un modèle de la GADA dans le référentiel biphasé noté usuellement (dq). Ensuite, nous aborderons la commande vectorielle qu'est sélectionnée comme point d'entrée puisqu'elle constitue, en quelque sorte, une source de littérature classique. En tant que méthode la plus répandue, l'orientation du flux statorique de la GADA est utilisée pour réaliser le découplage des puissances active et réactive échangées avec le réseau. Enfin, les performances du modèle élaboré seront envisagées sous différentes conditions moyennant une série de simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

II.2.Description de la GADA:

La GADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative"[10].

II.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un

par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $W_s = 2\pi f$ et le rotor tourne avec la vitesse W_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse W_{gl} telle que [10]:

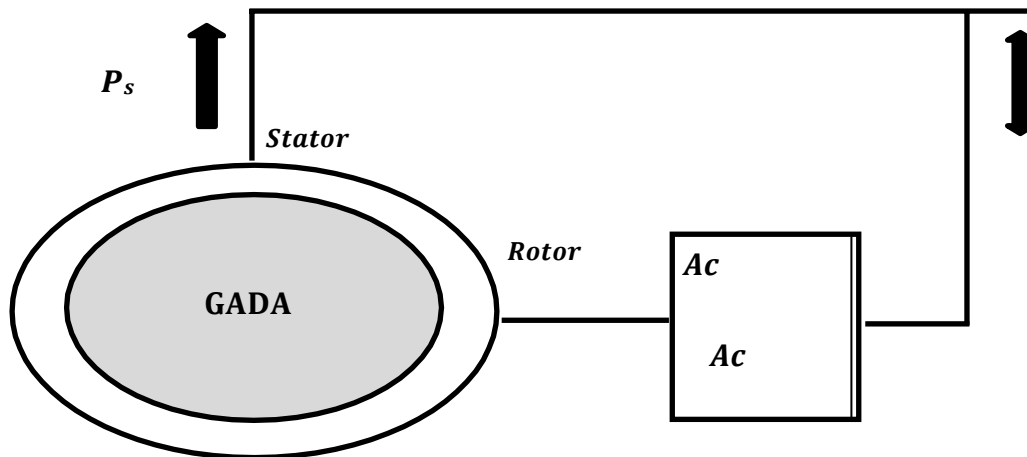
$$W_{gl} = W_s - W_r = W_g \quad (\text{II. 1})$$

Où : g est le glissement et W_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [11].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $W_{gl} = 2\pi f_{ro}$. C'est-à-dire:

$$f_{ro} = f_g \quad (\text{II. 2})$$



Figure(II.1): Modes de fonctionnement de la GADA [11]

II.4. Constitution de la GADA:

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure II.2). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [11].

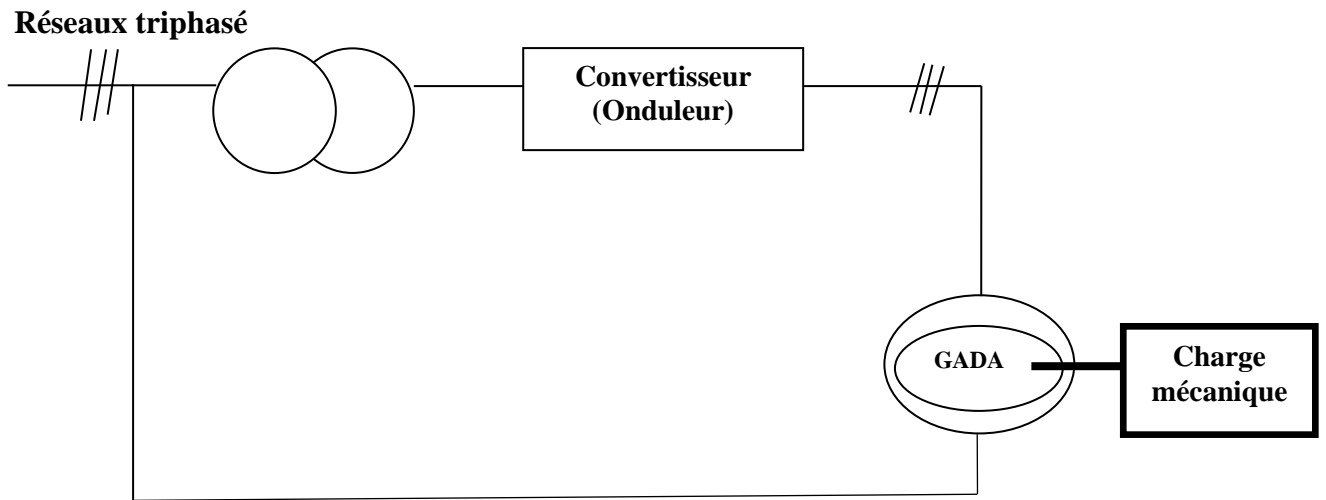
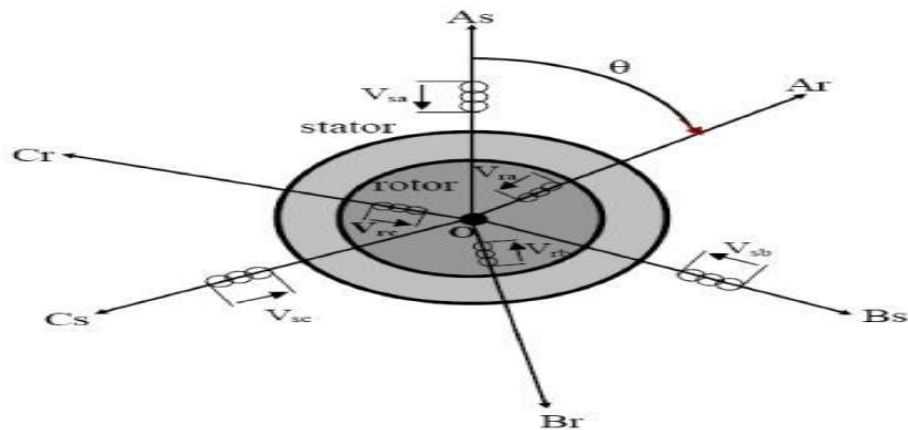


Figure (II.2) : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur Statique

II.5. Structure de la machine :

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. On peut voir sur la figure(II.3) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courant de rotor [12].

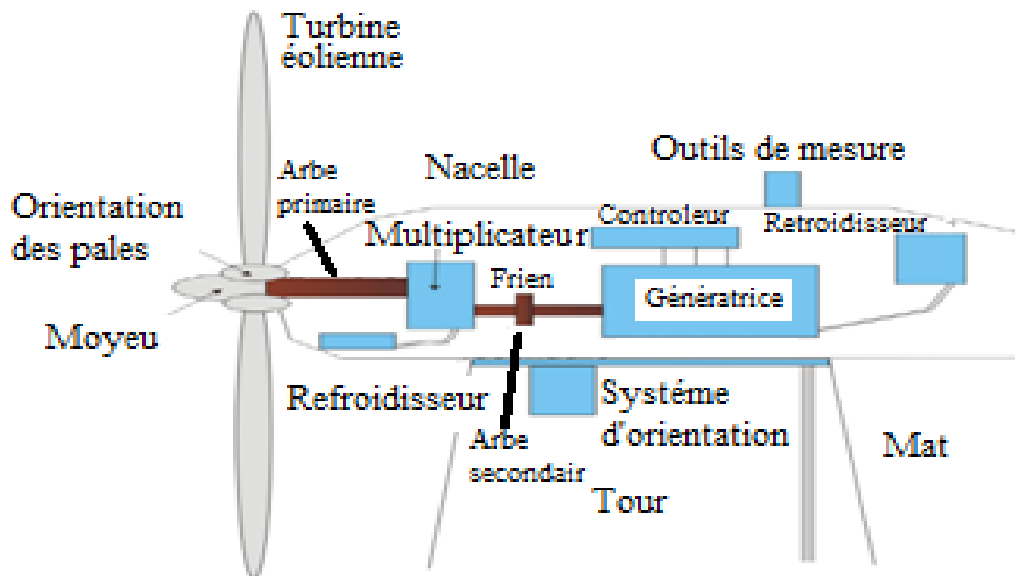


Figure(II.3): Structure de la machine.

II.6. Domaines application de la GADA:

La machine asynchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui

lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La GADA peut être utilisée dans les applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [12].



Figure(II.4):Eolienne installée en mer[12].

Les turbines de vent construites pour des puissances allant jusqu'à 4.5 MW. On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer, vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. Une synthèse bibliographique a mis en l'abondant littérature sur ce sujet a permis d'identifier un système d'alimentation particulière adéquat reposant sur l'utilisation d'un convertisseur AC/AC (cyclo-convertisseur).

II.7.Modes de fonctionnement de la GADA:

Comme la machine asynchrone classique, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse du Synchronisme pour être moteur et au-dessus pour être générateur. Pour la GADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [13] :

II.7.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

La puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.

II.7.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

II.7.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone:

Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

II.7.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone:

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à g est transmis par l'interne du rotor.

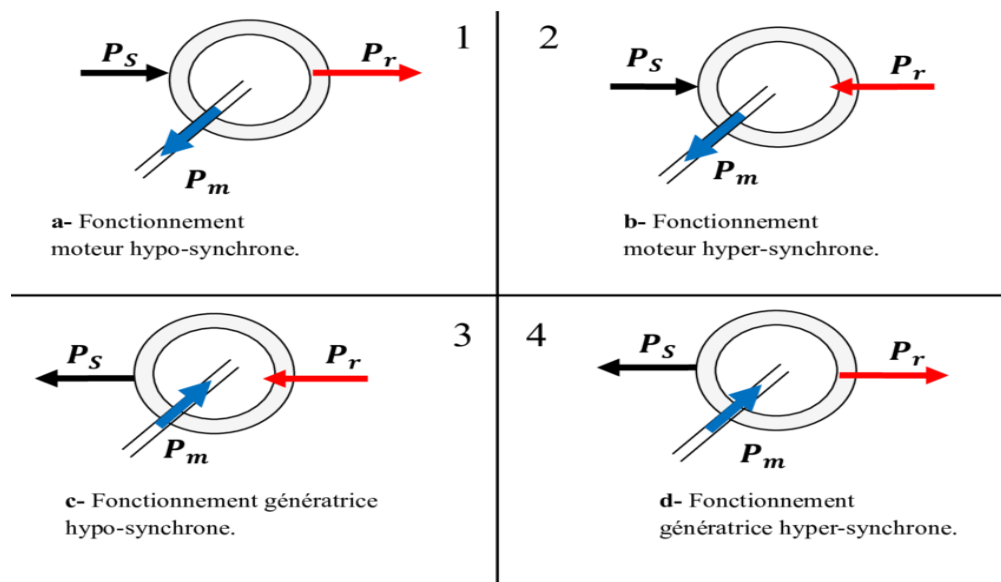


Figure (II.5): Modes opérationnels caractéristiques de la GADA[13].

II.8. Avantages de la GADA:

- ✓ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.[14]
- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance. [13]
- ✓ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale. [12]
- ✓ L'utilisation d'une GADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

- ✓ Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur. [10]
- ✓ Le circuit du rotor de la GADA peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ainsi au niveau du rotor, un convertisseur de haute commutation pourra être employé afin de réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation d'harmoniques et d'amélioration des rendements. [11]

II.9. Inconvénients de la GADA:

- ✓ La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- ✓ Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais.

II.10. Modélisation de la GADA:

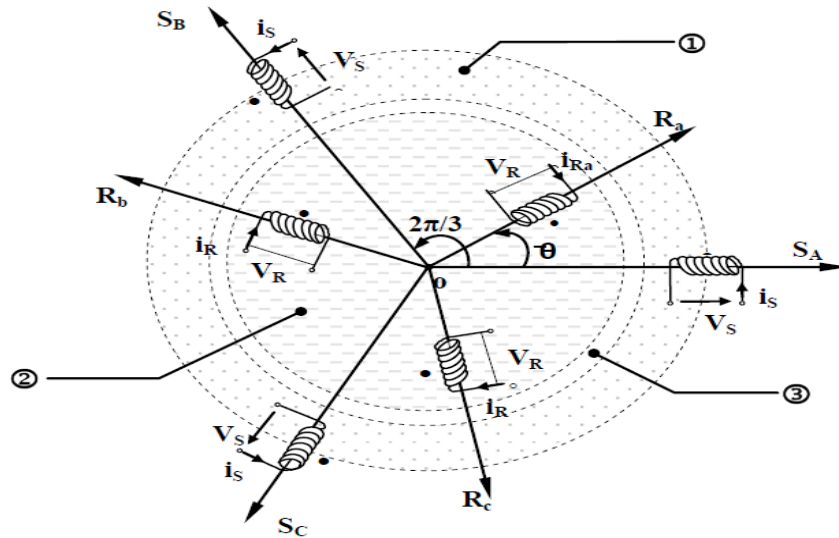
La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

II.10.1. Hypothèses simplificatrices:

- ✓ L'entrefer constant.
- ✓ L'effet des encoches négligé.
- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ✓ L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- ✓ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- ✓ Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- ✓ De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.
- ✓ Comportement de la machine asynchrone à double alimentation:
- ✓ Trois bobines statorique (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.

Trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (R_a, R_b, R_c).

La figure (II.6) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).



① Partie fixe : Stator. ② Partie mobile : Rotor. ③ Entrefer

Figure(II.6): Représentation simplifié de la GADA

II.10.2. Modèle mathématique de la GADA:

II.10.2.1. Equations électriques:

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [19].

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (II.3)$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par [26]:

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (II.4)$$

Où:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par:

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (II.5)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \quad (II.6)$$

Telque:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \text{ Et: } [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} [M_{sr}] =$$

$$M_0 \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (II.5.)Et (II.6) respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes:

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (II.7)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (II.8)$$

II.10.2.2.Equation mécanique:

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

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f \cdot \Omega \quad (II.9)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.7) et (II.8). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.10.2.3.Equations magnétiques:

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \end{cases}$$

Tel que: $[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$ Et: $[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$

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

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

Nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}]\frac{d}{dt}[i_s] + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II. 10})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}]\frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d}{dt}([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II. 11})$$

II.10.2.4. Equation des tensions et équation des flux et équation du couple électromagnétique:

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) sont données par:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II. 12})$$

✓ ω_s : Pulsation du champ tournant d'axe (d, q)

✓ ω_r : Pulsation électrique du rotor

L'équation des flux statorique et rotorique est donnée comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II. 13})$$

Après qu'on effectue le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimé sous différentes formes, on trouve celle-ci:

$$C_e = p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II. 14})$$

$$C_e = p \cdot M (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 15})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II. 16})$$

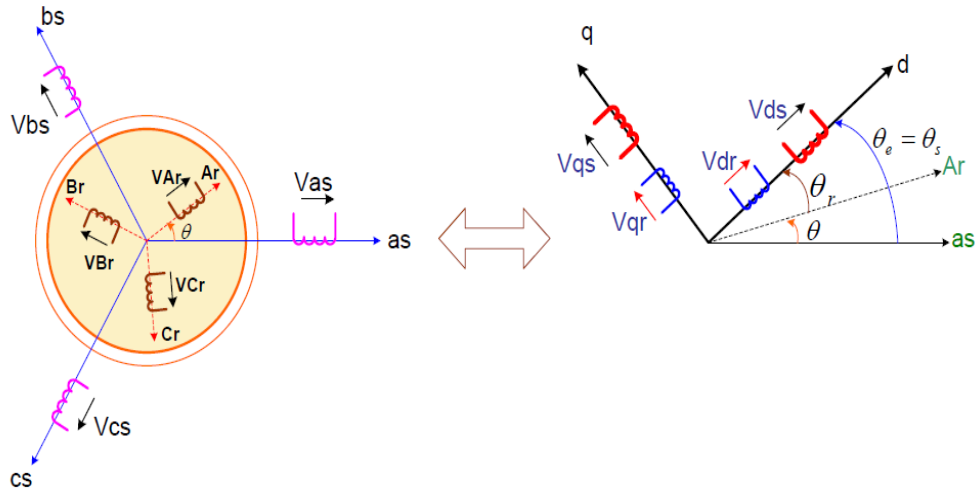
$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 17})$$

II.10.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q):

II.10.3.1 La Transformation de Park:

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal. Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée « du repère (α, β) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ». La matrice de

transformation de Park est définie comme suit :



Figure(II.7):Modèle de PARK de la GADA

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

II.10.3.2.Application de la transformation de Park:

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (II.19)$$

Avec :

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

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (II.20)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (W_e - W) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (W_e - W) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.21)$$

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II. 22})$$

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{rd}, V_{sq} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé, w_s et w_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques .

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

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II. 23})$$

Avec P le nombre de paires de pôles de la GADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{array} \right. \quad (\text{II. 24})$$

II.11.Principe de la commande vectorielle de la GADA:

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

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

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

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

II.12.Etablissement du modèle de la GADA:

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

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

II.12.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé:

En choisissant le référentiel diphasé $(d - q)$ lié au champ tournant et en plaçant le vecteur flux statorique φ_s sur l'axe d , on peut écrire d'après la figure (II. 8).

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

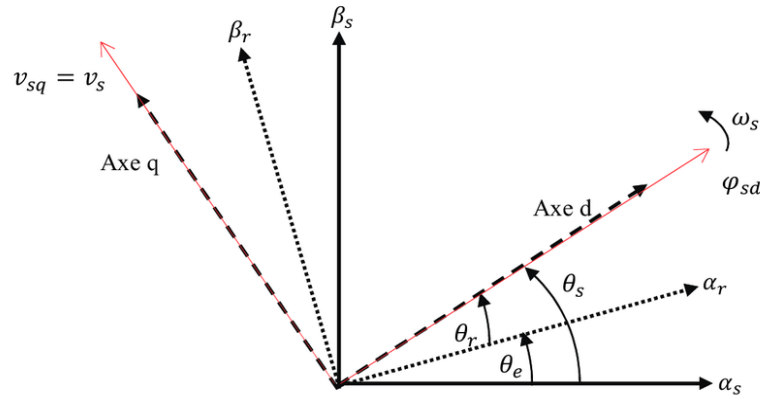


Figure (II.8): Référentiel diphasé $d - q$ lié au champ tournant statorique.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = W_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ 0 = -L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} - M i_{sd} \\ \varphi_{sd} = L_r i_{rq} - M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

II.12.1.1. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

A partir de l'équation de flux (II. 29), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique :

$$\begin{cases} i_{sd} = M L_s i_{rd} - \varphi_s L_s \\ i_{sq} = M L_s i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

II.12.1.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} i_{sd} - V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} i_{sd} + V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s i_{sq} \\ Q_s = -V_s i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Avec:

$$V_{sq} = V_s = W_s \varphi_s \quad \text{donc:} \quad \varphi_s = \frac{V_s}{W_s} \quad (\text{II. 34})$$

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

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

II.12.1.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Partir du système d'équation (II. 30), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{V_s M}{W_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \right) - W_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d i_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + W_r \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

Avec : $W_r = g W_s$

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

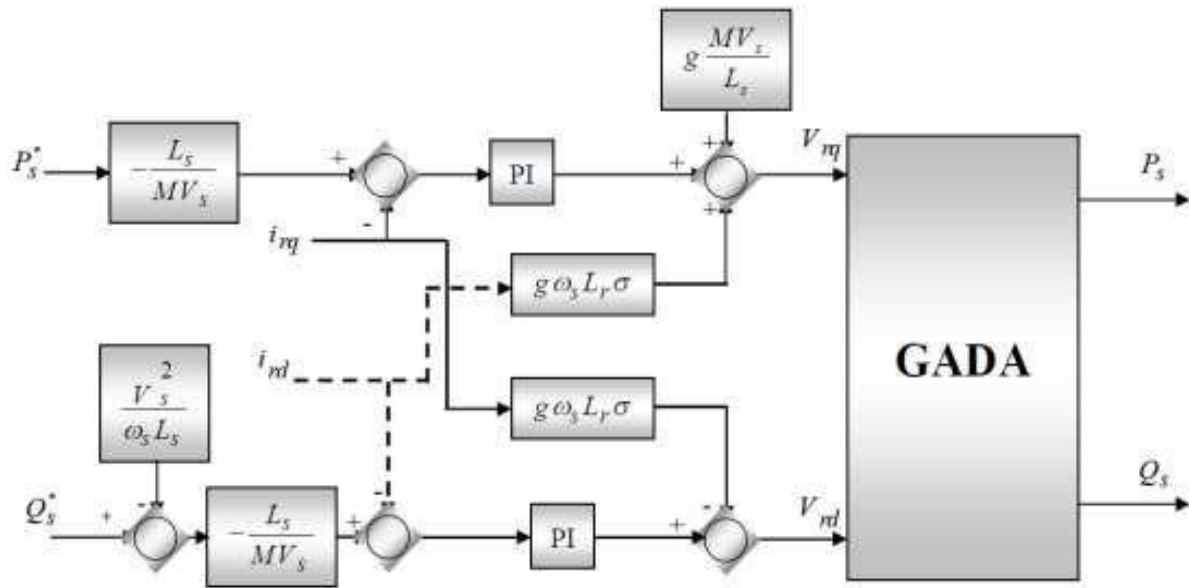
$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g W_s \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] i_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] i_{rq} + g W_s \left(i_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

- ✓ V_{rd} et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.
- ✓ $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

Les équations (II.34), (II.36) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (II.9).



Figure(II.9): Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA alimenté en tension [14].

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 .

II.13.Types de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développée soit :

- ✓ La commande vectorielle directe.
- ✓ La commande vectorielle indirecte [14].

II.13.1.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 [14].

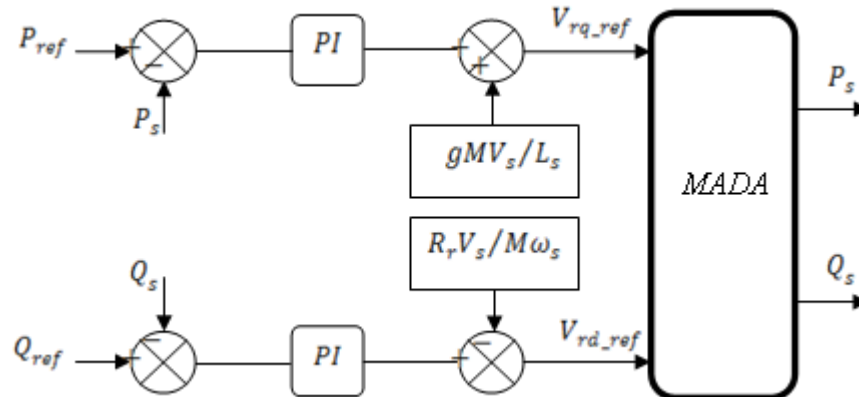


Figure (II.10):Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances[14].

II.13.2.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 microprocesseurs, 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 [12].

II.13.2.1.Commande indirecte en boucle ouverte :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure (II.11).

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

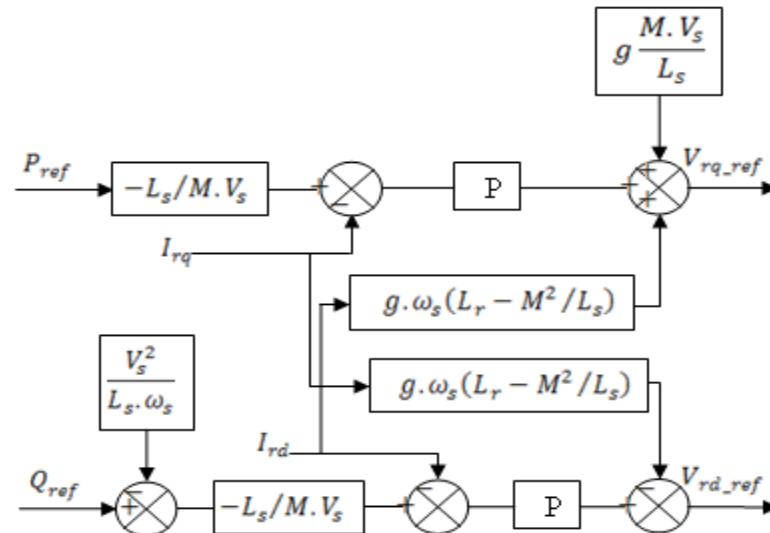


Figure (II.11): Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte [12].

II.13.2.2. Commande indirecte en boucle fermée (Commande avec boucle de puissance) :

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (II.12) 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.

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure (II.12).

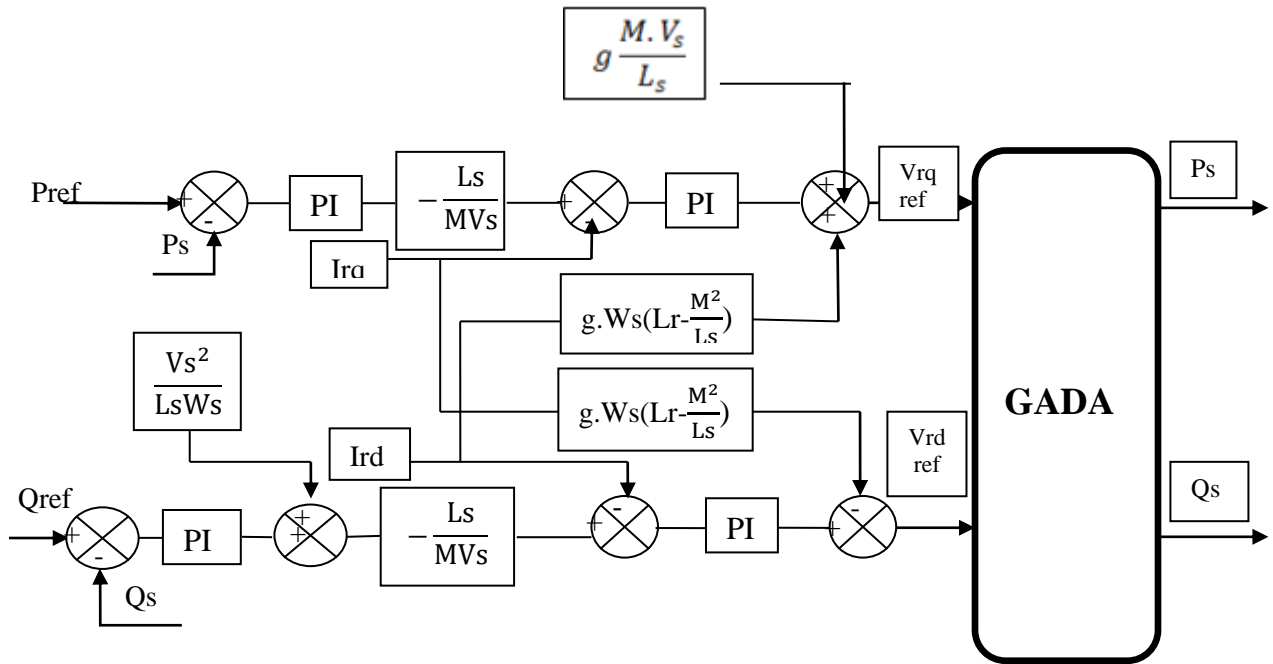


Figure (II.12): Schéma de la commande indirecte en boucle fermée

II.13.3.Type du régulateur PI:

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

II.14. Résultats de simulations:

Les résultats de simulation présentée sur les figures ci-dessous.

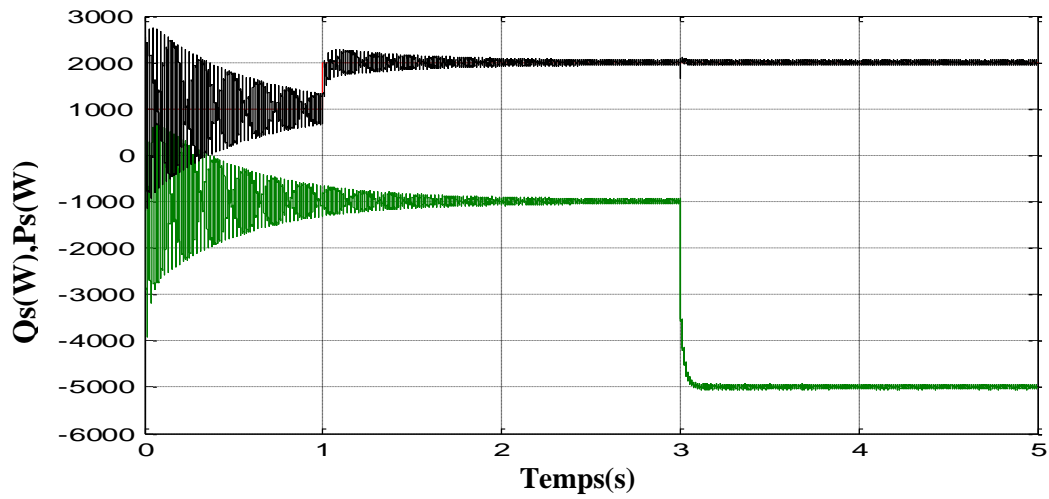


Figure (II.13): La puissance active et réactive statorique

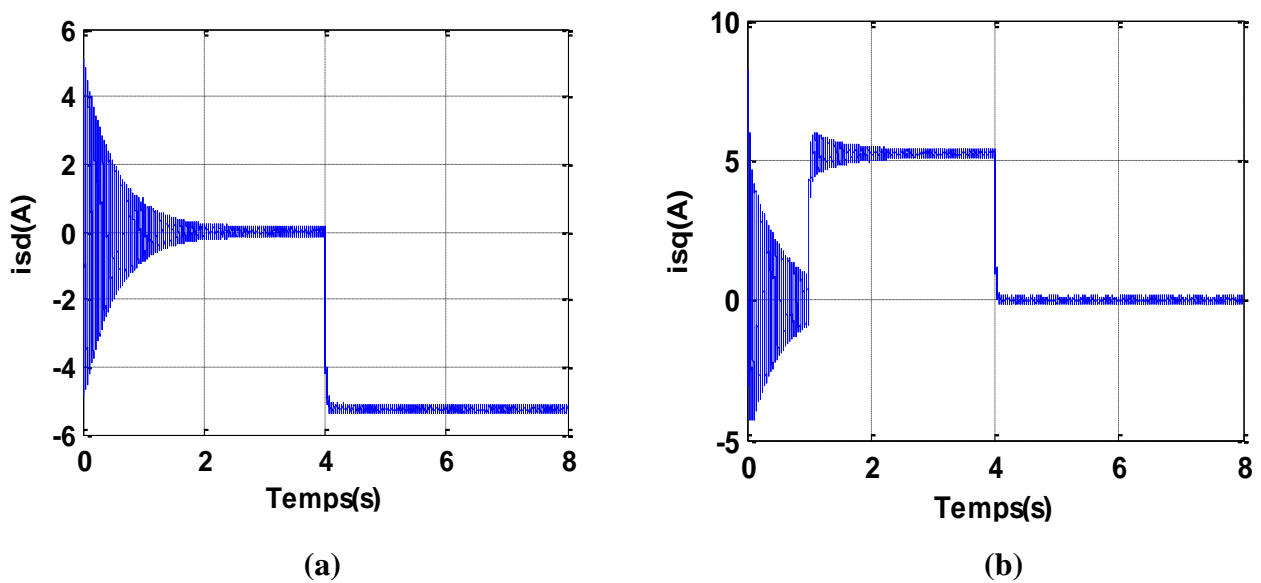


Figure (II.14): courant statorique l'axe d(a) et courant statorique l'axe q(b)

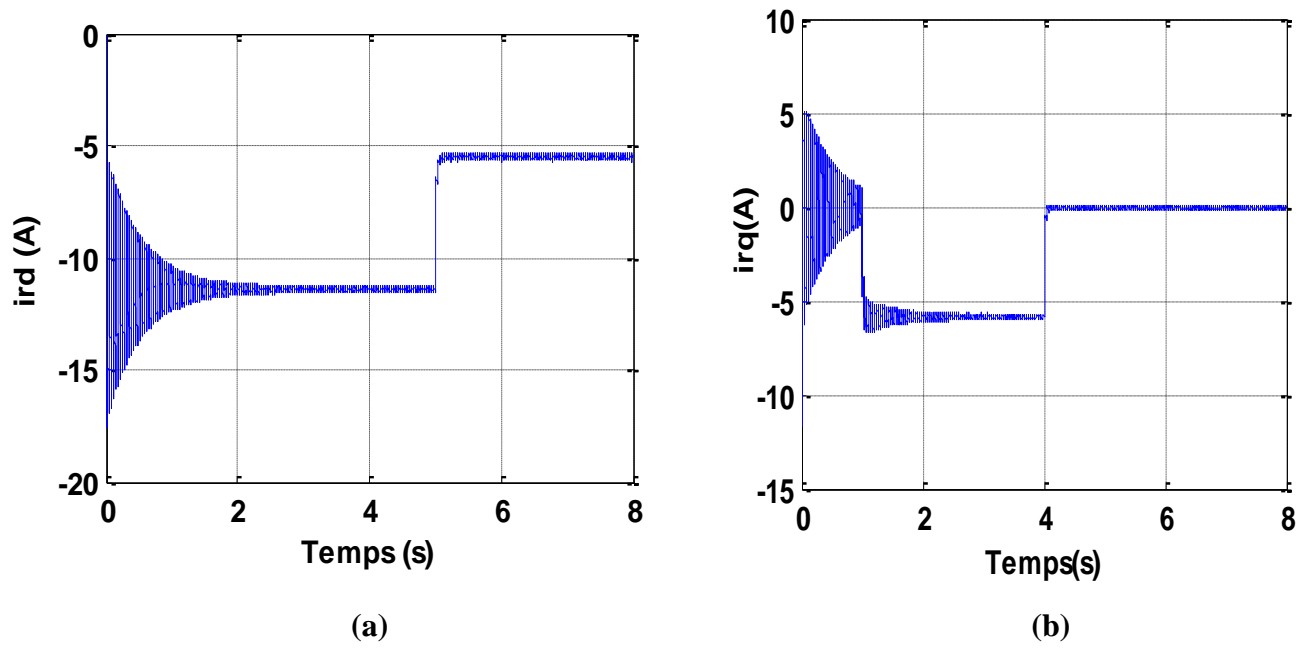


Figure (II.15): Courant rotorique l'axe d(a) et Courant rotorique l'axe q(b)

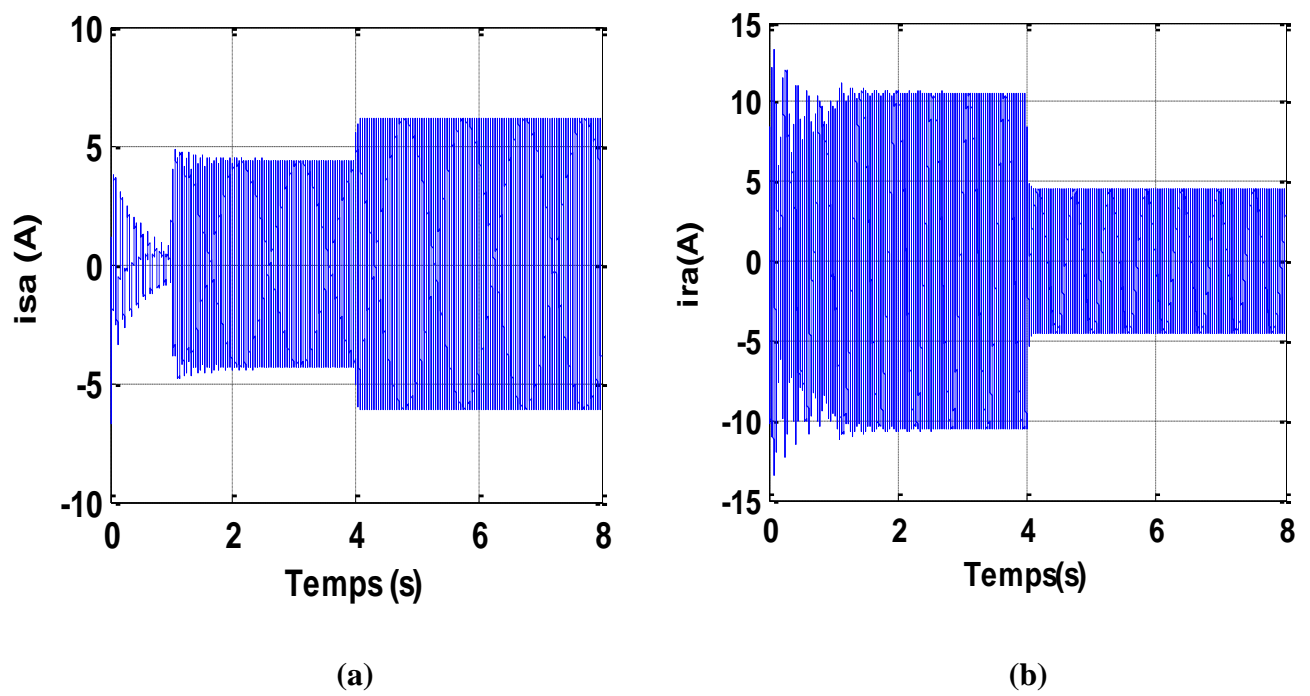


Figure (II.16): Courant d'une phase statorique(a) et Courant d'une phase rotorique(b)

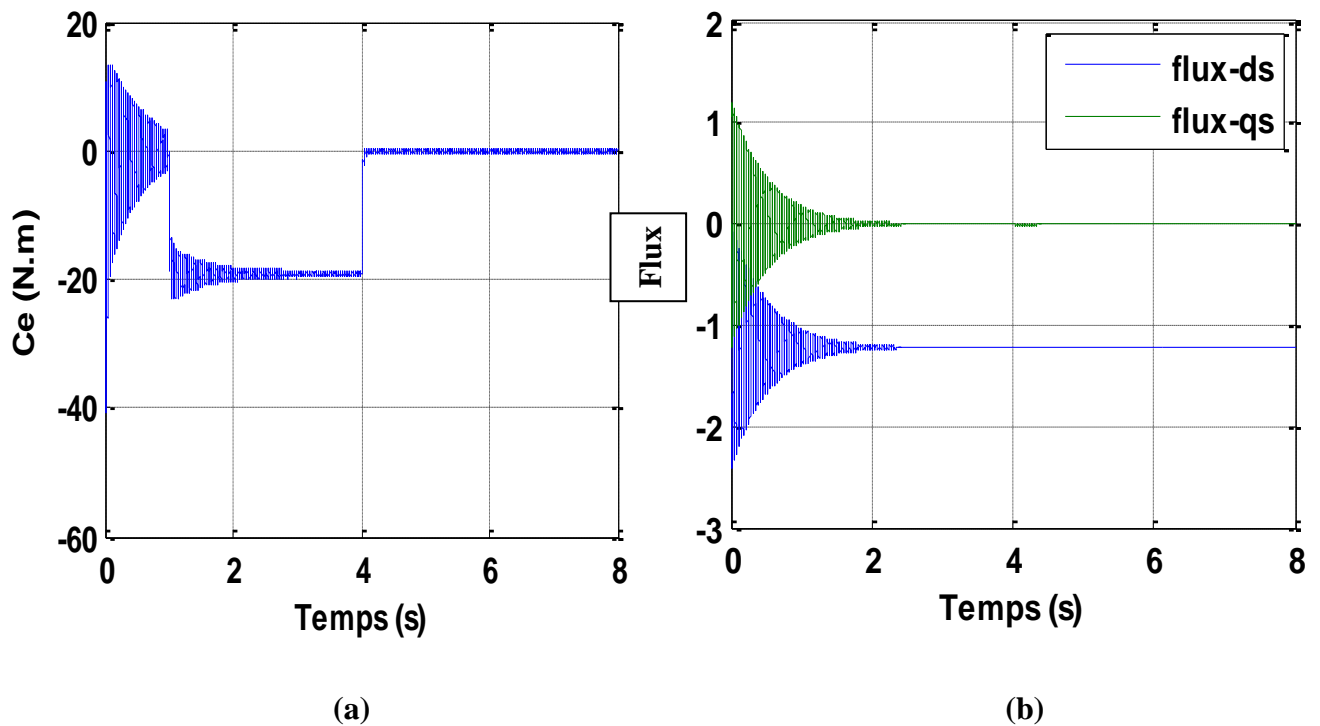


Figure (II.17): Couple électromagnétique(a) et Flux statorique(b)

II.15. Interprétations des Résultats:

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

- ✓ Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- ✓ La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA.
- ✓ La puissance réactive est nulle, à l'instante $t=[0 \ 4]$ c'est une condition de fonctionnement de la GADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.

II.16. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a exposé le principe de la modélisation et de la commande vectorielle en utilisant l'orientation du flux statorique. Cette commande est appliquée depuis quelques années à la GADA, et elle reste la méthode la plus répandue. En effet, elle nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation de la puissance active et de la puissance réactive.

Les résultats de simulation de la GADA ont permis de déterminer et d'analyser le comportement dynamique de différents régimes de fonctionnement. Moyennant des régulateurs PI, la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

La régulation des puissances statoriques se réalise en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions imposées par le convertisseur d'électronique côté rotor de la machine. Or, dans l'objectif de répondre aux exigences du gestionnaire du réseau, et afin de donner plus de flexibilité à la GADA, on doit maîtriser la puissance rotorique en tenant compte de la commande du convertisseur côté réseau. Celle-ci sera traitée dans le chapitre suivant.

Chapitre III:

Commande du système éolien à
vitesse variable basé sur

GADA

III.1.Introduction:

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée. L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance, tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

III.2.Modèle de la Turbine:

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [15]. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.48\beta - 5 \right) e^{\lambda_i} \quad (\text{III. 1})$$

$$\text{Tel que:} \quad \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

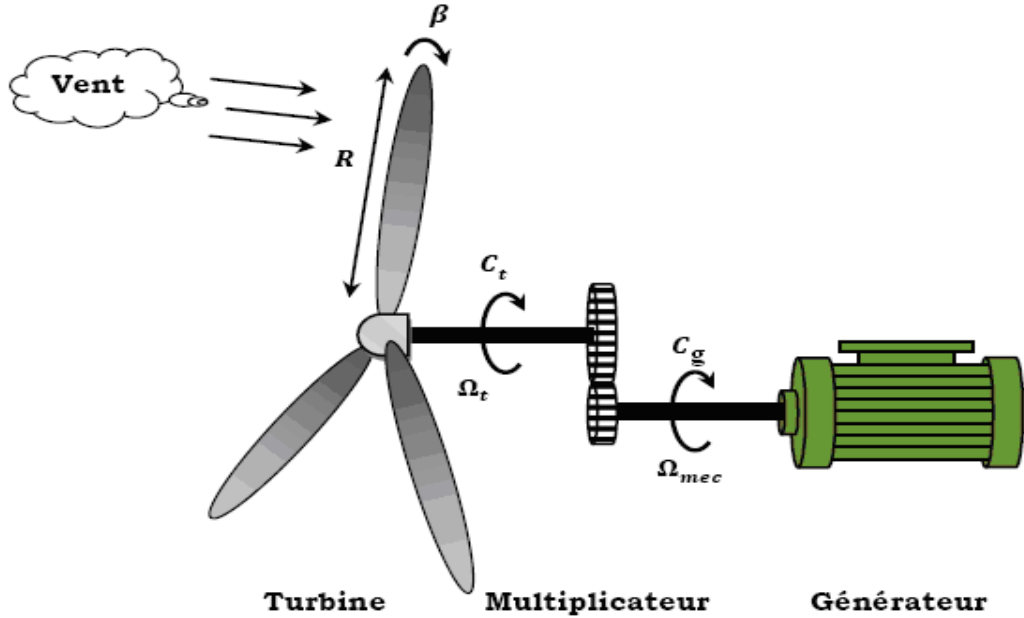
La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme:

$$P_{\text{aer}} = C_p(\lambda, \beta) \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \quad (\text{III. 2})$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_P \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 3)$$

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice Figure (III.1).



Figure(III.1): Structure du système de conversion éolien[16].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_r = \frac{C_{aero}}{G} \quad (III. 4)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 5)$$

Avec: G le gain du multiplicateur de vitesse

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_r \quad (III. 6)$$

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

$$J \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (III. 7)$$

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

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (III. 8)$$

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

f :

$$C_{mec} = f \times C_{mec} \quad (III. 9)$$

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

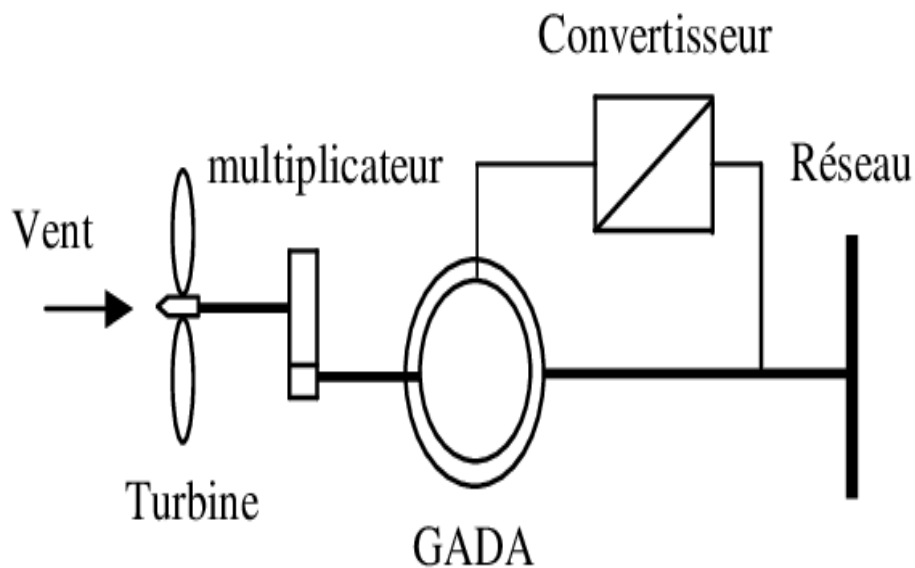
L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance [16].

Au vu de la caractéristique suivante, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

III.3.Modèle de la chaîne de conversion:

III.3.1.Architecture du dispositif de commande:

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue. La structure montrée sur la figure (III.2) comporte convertisseur l'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations.



Figure(III.2):Modèle de la chaîne de conversion éolienne[16].

Le convertisseur interposés entre le rotor et le réseau ils sont bidirectionnels en puissance, donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment. Le rotor de la GADA et entraîné par la turbine qui sera détaillée dans les paragraphes qui suit.

III.4.Filtre (côté réseau):

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Durant la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation [17].

III.4.1.Modélisation du filtre passif (côté réseau):

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [17].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res-d}(s)}{V_{res-d} - V_{red-d}} = \frac{I_{res-q}(s)}{V_{res} - V_{red-d}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III. 10)$$

III.5.Modélisation de la turbine:

III.5.1.La modélisation:

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertie en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent La surface balayée par le rotor

III.5.1.1.La surface balayée par le rotor:

La surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 600 KW est de quelque 1.500 m², le diamètre du rotor étant d'environ 43 à 44 m. L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 2 \times 2 =$ quatre fois plus d'énergie.

III.5.1.2.La densité de l'air:

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume. Où n'autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne [16].

III.5.1.3. La Vitesse du vent:

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et différent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

III.5.1.4. Puissance récupérable par une turbine:

La turbine qui comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (GADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (III.3) montre le schéma d'une turbine éolienne. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III. 11})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III. 12})$$

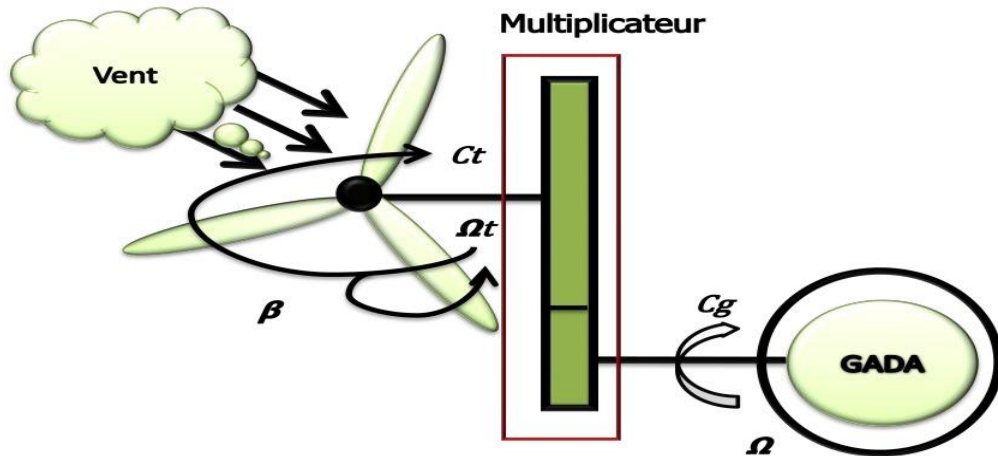
Avec:

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{vent} : est la vitesse du vent en (m/s).



Figure(III.3):Schéma d'une turbine éolienne

D'après la relation on remarque que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, on ne peut pas extraire la totalité de la puissance car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p , qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales.

Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne . La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta)(\rho S v^3) \quad (III. 13)$$

C_p : coefficient de puissance défini comme suit :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 + 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (III. 14)$$

β :angle d'orientation des pales.

λ :est le ratio de vitesse défini comme:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III. 15)$$

Avec:

R:Longueur de pales

Ω_t :Vitesse de la turbine.

V_{vent} : Vitesse de vent en (m/s)

Le couple aérodynamique est donné par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 16)$$

III.5.1.5. Le coefficient de puissance:

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

III.5.1.6. Modèle du Multiplicateur:

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplications de l'ordre de 100. Ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques [15].

Le multiplicateur a pour rôle d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice, et pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse G qui correspond au rapport de multiplication.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III. 17)$$

Avec:

C_g : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 18)$$

III.5.1.7. Equation dynamique de l'arbre:

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit:

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum descouples = C_{mec} \quad (III. 19)$$

Avec:

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_{mec} : Le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em}

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux

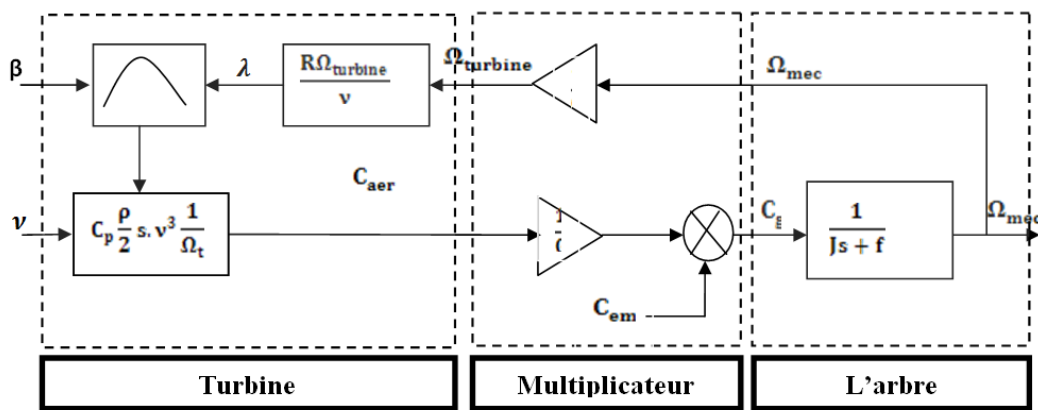
Et le couple issu du multiplicateur C_g

III.5.2.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.

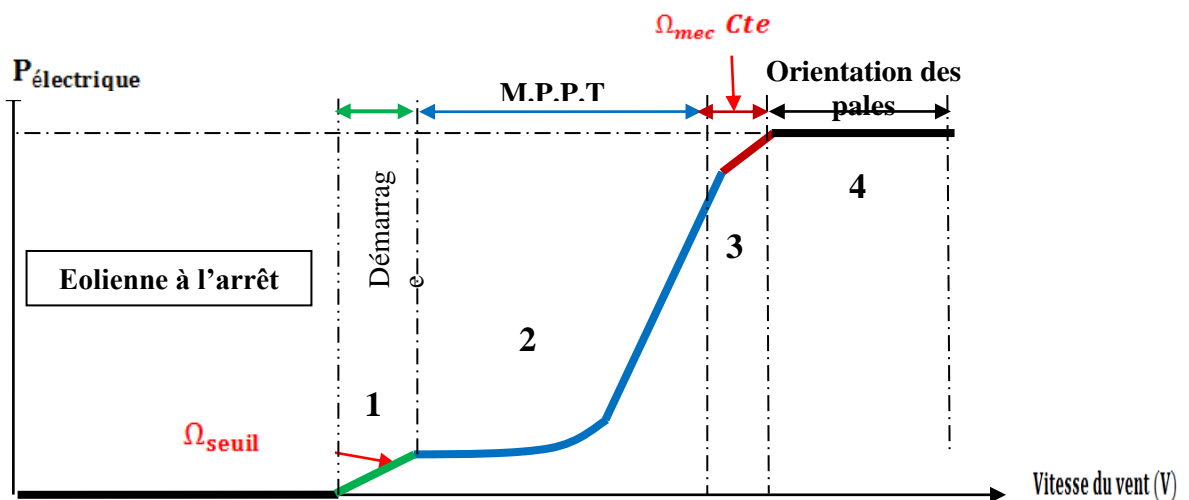
La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation Figure(III.4).



Figure(III.4):Schéma bloc du modèle de la turbine[15].

III.6.Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure(III.5)on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [17].

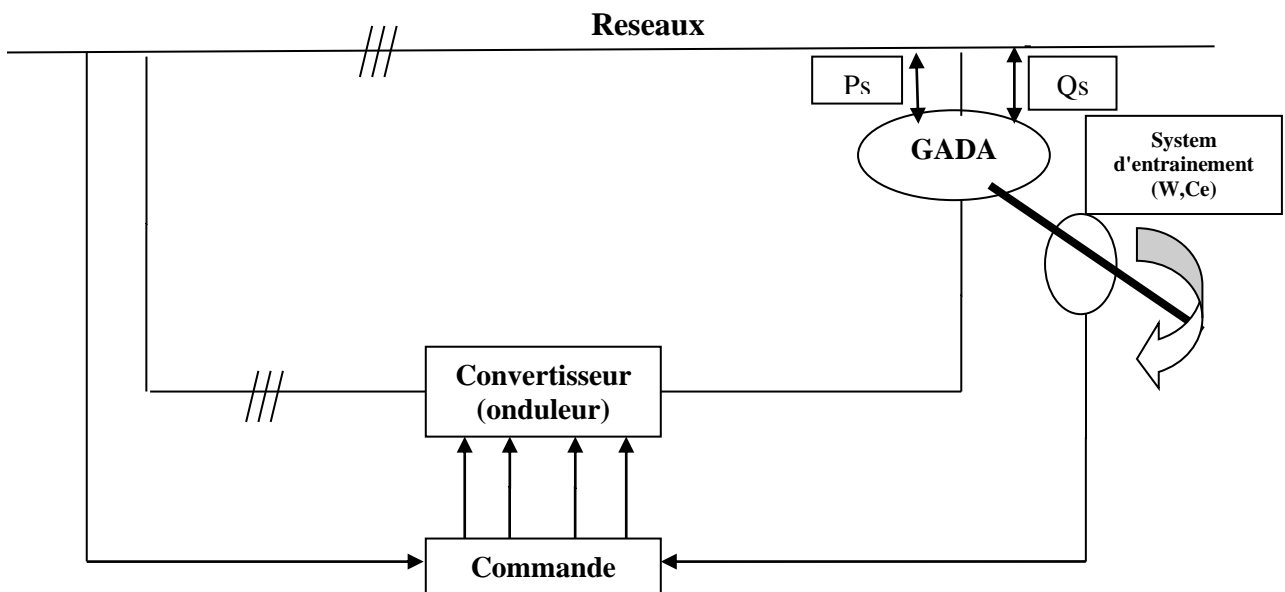


Figure(III.5):Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne[17].

- ✓ **Zone1:** C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).
- ✓ **Zone2:** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- ✓ **Zone3:** Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- ✓ **Zone4 :** 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. (angle de calage), c'est le «**Pitch Control** ».
- ✓ Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

III.7. Système de la chaîne globale:

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une GADA entraînée par une turbine éolienne et présenté sur la figure(III.6):



Figure(III.6): Structure de la chaîne global

III.8. Principe de MPPT :

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de Puissance maximale d'un générateur électrique pour une source variante (par exemple la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou générateurs éoliens. Le MPPT a été créé pour avoir la meilleure connexion possible entre la source non linéaire et le réseau et ainsi toujours extraire le maximum de puissance.

Repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent en cas de raccordement indirect de la génératrice avec le réseau[17].

On peut distinguer entre deux grandes catégories de stratégies MPPT : des stratégies ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe caractéristique et des stratégies nécessitant la connaissance préalable de la caractéristique $C_p(\lambda)$ de l'éolienne, point de vue rapidité du système facilite de commande et simplicité de mettre en œuvre.

III.9. Résultats de simulation:

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab/Simulink, Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre. Différente vitesse de vent est appliquée sur les pales de l'éolienne de 7 jusqu'a 11 m/s.

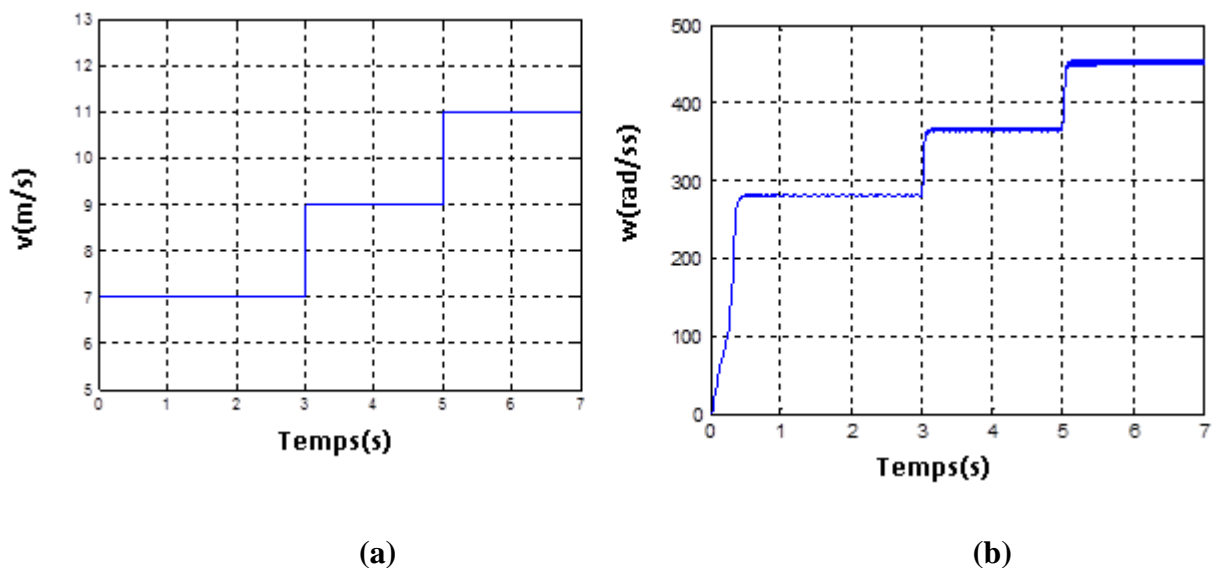


Figure (III.7): Vitesse du vent (a) et Vitesse de rotation (b)

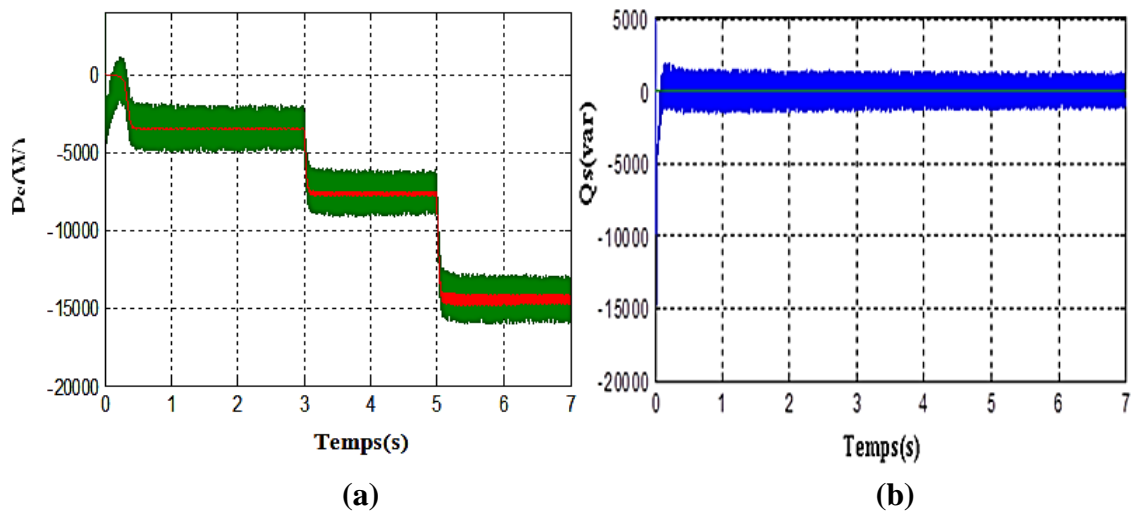


Figure (III.8):Puissance active statorique (a) et Puissance réactive statorique(b)

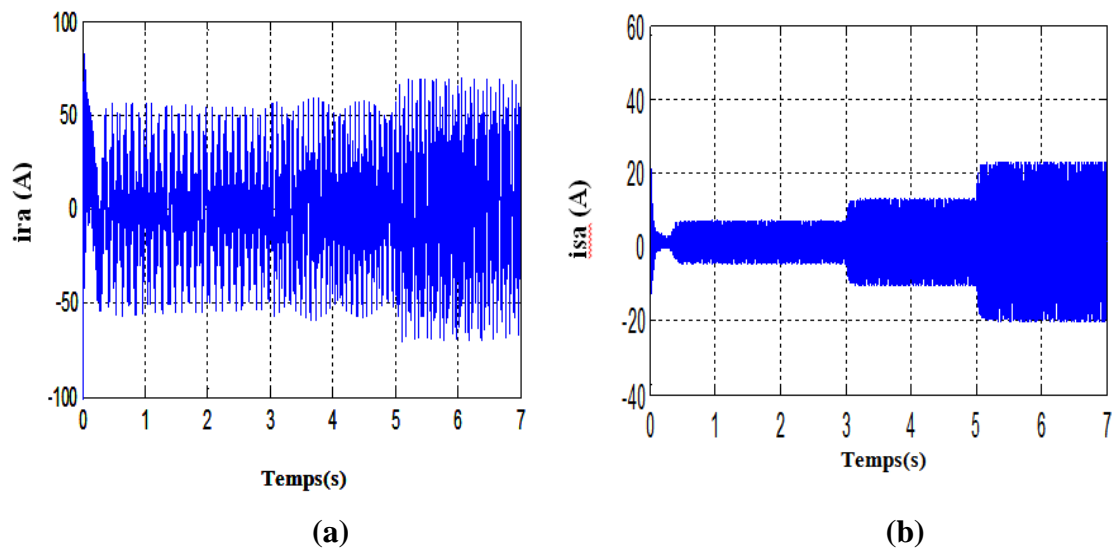


Figure (III.9):Courant rotorique d'un phase (a) et Courant statorique d'un phase(b)

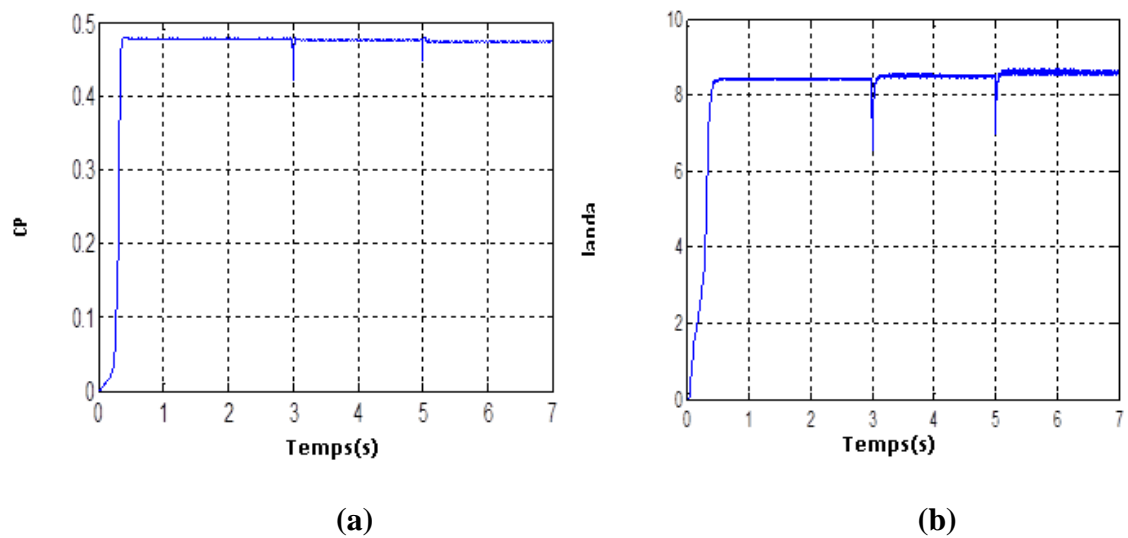



Figure (III.10):Coefficient de puissance de la turbine(a) et Vitesse relative de l'éolienne(b)

III.10. Interprétations des Résultats:

- ✓ Le courant statorique (I_s) fourni par GADA est déphasé avec la tension du réseau, et c'est parce que GADA ne pompe que de la puissance active (P_s) dans le réseau et cela indique que le courant statorique ($I_s=0$) est une constante suivant la référence ($Q_s \text{ réf} = 0$).
- ✓ Tout au long du système d'exploitation, nous constatons que la vitesse spécifique et le facteur de puissance restent constants dans les valeurs (8.1 et 0.49) avec leurs valeurs de référence maximales suivies.

III.11. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons discuté la chaîne de conversion proposée afin de comprendre le principe de fonctionnement et aussi traité de la modélisation et simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur une GADA nous avons donc centré notre étude sur la commande de la turbine éolienne dans la zone de fonctionnement optimale permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent, et les différentes techniques de maximisation de la puissance extraite de la turbine la réalisation de la stratégie MPPT se fait par deux commandes : sans et avec asservissement de la vitesse ont été explicitées .



Chapitre IV:
Commande prédictive de GADA

IV.1.Introduction:

La commande prédictive (MPC : model predictive control) est née à la fin des 1970 et s'est considérablement développée depuis, à la fois dans la communauté de la recherche en automatique et dans l'industrie. La raison de ce succès peut être attribuée au fait que la commande prédictive est peut-être la façon la plus générale de poser le problème de la commande de procédés dans le domaine temporel. En effet, sa communication intègre des concepts tirés de la commande optimale, la commande stochastique, la commande multi variable et prend en compte les références futures lorsqu'elles sont disponibles. Un avantage de la commande prédictive est que, grâce à l'horizon de commande fini et au modèle du système, les contraintes et même des processus non linéaires et /ou variant dans le temps, peuvent être considérés en pratique.

La première partie de ce chapitre a pour but tout d'abord de préciser les grandes idées communes aux méthodes prédictives, puis dans le cas particulier de la commande prédictive généralisée (GPC), pour les systèmes linéaires et sans contraintes. Ensuite développer la mise en œuvre mathématique aboutissant à la synthèse du régulateur sous forme polynomiale (RST) et enfin d'aborder le problème du choix des paramètres de réglage par application numérique sur quelques systèmes élémentaires.

La deuxième partie est consacrée à l'application sur la machine asynchrone triphasée pour l'asservissement de vitesse, pour cela, une commande prédictive généralisée cascade sera envisagée. La fin du chapitre illustre le comportement de cette loi de commande dans un model complet de l'actionneur asynchrone.

IV.2.La philosophie de la commande prédictive:

La philosophie de la commande prédictive est donc, connaissant la sortie du processus à commander de déterminer la commande permettant de lui faire rallier la consigne selon une Chapitre IV La commande prédictive directe du couple de la machine à induction Université de Biskra 2012 86 Trajectoire prédéfinie (trajectoire de référence) sur la sortie du processus en accord avec la figure (IV.1). Il s'agit donc de déterminer la séquence future de commande à appliquer à l'entrée du processus afin de réaliser le ralliement. Seule la première commande est appliquée, les autres commandes seront oubliées car à la période d'échantillonnage suivante, les séquences sont décalées, une nouvelle sortie est mesurée et la séquence d'opération est alors recommencée chaque période d'échantillonnage selon le principe de l'horizon fuyant [18].

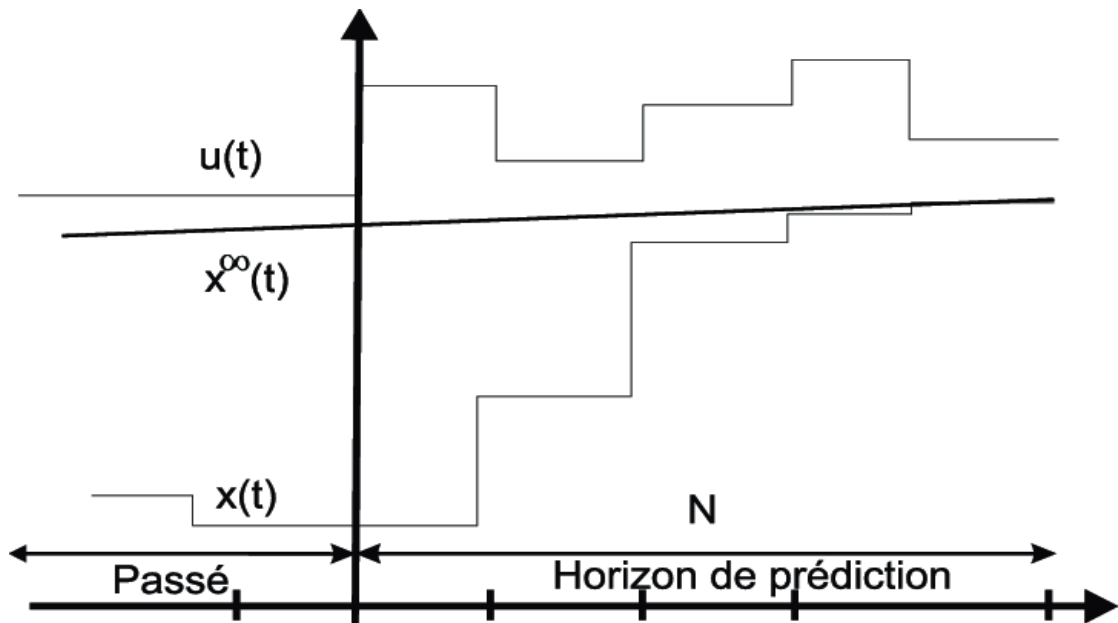


Figure (IV.1): Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini[18]

En réalité, le modèle du processus dit modèle interne (implanté dans le calculateur numérique) ne permet de prédire que l'évolution de sa propre sortie, puisque le modèle adopté est imparfait cause des erreurs d'identification des perturbations non prises en compte et des simplifications effectuées permettant une utilisation en temps réel. Il en résulte que la sortie du processus est différente de celle du modèle.

Les principaux éléments de cette technique de contrôle sont donc le modèle mathématique du système et la fonction de coût prédéfinie Figure (IV.2).

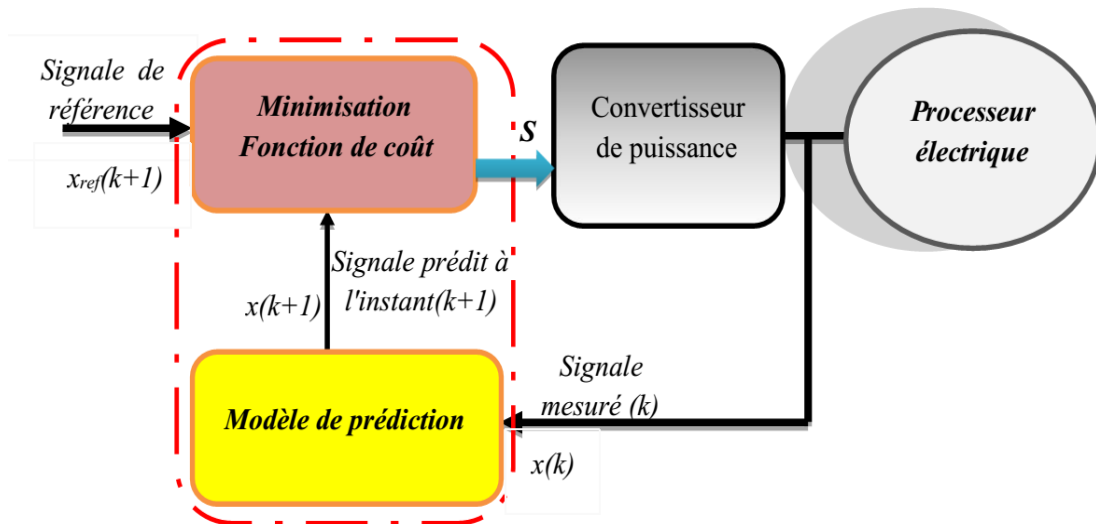


Figure (IV.2): Schéma général de la commande prédictive à états finis[18]

Le convertisseur de puissance peut avoir n'importe quelle topologie et nombre de phases, tandis que la charge représentée sur la figure peut être une machine électrique, un réseau ou de toute autre charge active ou passive. Dans ce schéma les variables mesurées $x(k)$ sont utilisées dans le modèle pour calculer les prédictions $x(k+1)$ des variables commandées pour

chacune des itérations possibles, c'est-à-dire l'état de commutation, les tensions et les courants. Ces prédictions sont évaluées en utilisant une fonction de coût qui tient compte des valeurs de référence $X_{ref}(k)$ et aussi les restrictions imposées par le type du contrôle appliqué. Ainsi, l'état optimal de commutation S est sélectionné et appliquée au convertisseur de puissance.

IV.3. Différents types de commande prédictive:

La commande prédictive, appelée aussi correction anticipatrice, désigne une large gamme de régulateurs, qui ont récemment été appliqués dans le domaine des entraînements électriques et des convertisseurs statiques. [19] Une classification des différentes stratégies de commande prédictive est représentée par la figure (IV.3).

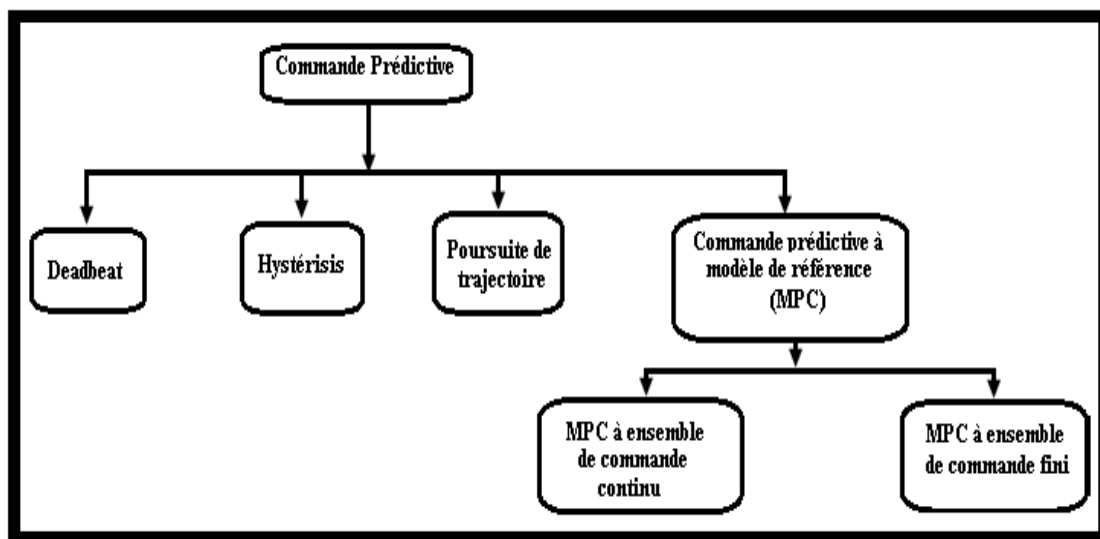


Figure (IV.3): Classification de commandes prédictives utilisées dans le système d'électronique de puissance [19]

La commande prédictive présente un certain nombre d'avantages, par rapport aux autres méthodes, parmi lesquels on trouve [19] :

- ✓ Son principe est intuitif et facile à comprendre.
- ✓ Le correcteur obtenu est une loi de commande linéaire facile à implémenter et qui requiert peu de temps de calcul.
- ✓ Permet de respecter les contraintes sur les variables commandées et manipulées.
- ✓ Autorise l'adaptation automatique du système en cas de perturbations mesurables.
- ✓ Elle est capable intrinsèquement de compenser les retards ou les temps morts
- ✓ Elle est très utile lorsque les consignes à suivre sont connues à l'avance.

Les travaux de recherche publiés dans le domaine des convertisseurs statiques et les applications de l'électronique de puissance en général, montrent que ce genre de techniques spécialement la commande prédictive à base d'un modèle MPC est souvent utilisé dans des

applications de commande de courant des onduleurs [20]. Cette commande est applicable dans les repère fixe et tournant pour des applications diverses telles que le filtrage actif parallèle et série, les systèmes connectés au réseau et des sources d'alimentation sans interruption.

IV.4. Concepts de base de la commande prédictive:

Le terme de Commande Prédictive ne désigne pas une stratégie de commande spécifique mais un ensemble de méthodes de l'automatique qui utilisent explicitement un modèle du processus à commander, afin d'obtenir le signal de commande par la minimisation d'une fonction de coût.

Ces méthodes donnent des correcteurs linéaires qui ont pratiquement tous la même structure et que se basent tous plus ou moins sur les idées suivantes [20] :

✓ Utilisation d'un modèle numérique pour prédire les sorties du procédé à des instants Futurs (notion d'horizon de prédiction). Ce modèle peut être obtenu par une discrétisation de la fonction de transfert continue du modèle (transformée en z) ou par une identification préalable hors ligne du système. Cette particularité permet de classer la commande prédictive dans la grande famille des commandes à base de modèles, dite 'MBC' (Model Based Control).

- ✓ Calcul de la séquence des commandes qui minimise une fonction du coût dans le Futur (notion d'horizon de commande) ;
- ✓ A chaque instant d'échantillonnage, l'horizon de prédiction est déplacé vers le futur, et seule la première des commandes calculées est effectivement appliquée au système (notion d'horizon fuyant).

La commande prédictive présente un certain nombre d'avantages, par rapport aux autres méthodes, parmi lesquelles on trouve :

- ✓ Son principe est très intuitif et le réglage relativement facile de ces paramètres la rendent accessible aux personnes avec des connaissances limitées en automatique.
- ✓ Elle peut être utilisée pour commander une grande variété de processus, ceux avec des dynamiques simples à ceux plus complexes, par exemple les systèmes à grand retards, les systèmes instables, et les systèmes à phase non minimale.
- ✓ Le cas multi variable se traite facilement.
- ✓ Elle est capable intrinsèquement de compenser les retards et les temps morts.
- ✓ Le correcteur obtenu est une loi de commande linéaire facile à implémenter et qui requiert peu de temps de calcul.
- ✓ Le traitement de contraintes sur le système à commander peut être inclus

Systématiquement dans la définition du correcteur.

- ✓ Elle est très utile lorsque les consignes ou les trajectoires à suivre sont connues à l'avance.

En revanche, il y a quelques désavantages de la commande prédictive. Le plus grand des inconvénients est le besoin d'un modèle approprié du système. L'algorithme de calcul du correcteur prédictif se base sur une connaissance a priori de ce modèle, il est donc évident quelles bénéfices obtenus avec la commande prédictive sont affectés par les écarts qui peuvent exister entre le processus réel et le modèle utilisé.

IV.5.Stratégie de la commande prédictive:

La stratégie de la commande prédictive est très similaire à la stratégie utilisée pour la conduite automobile. Le conducteur connaît la trajectoire de référence désirée (le tracé de la route) sur un horizon de la commande fini (celui de son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions. Noter que lorsqu'on recourt à des schémas de commande classiques, comme les PID, les commandes sont calculées à partir des erreurs passées et de l'erreur courante. Si l'on étend l'analogie de la conduite automobile, la technique PID serait alors équivalente à conduire une voiture en utilisant seulement ce qui se passe juste devant la voiture (accès à la mesure courante) et le rétroviseur (mesures passées). Mais l'analogie est un peu sévère, car la commande prédictive a besoin en réalité de beaucoup plus d'informations que le PID (la trajectoire à suivre par le système, et un modèle de ce système). Et si un point situé dans le futur sur la trajectoire de référence est utilisé comme consigne pour le PID, alors les différences entre les deux stratégies sont moins grandes [21].

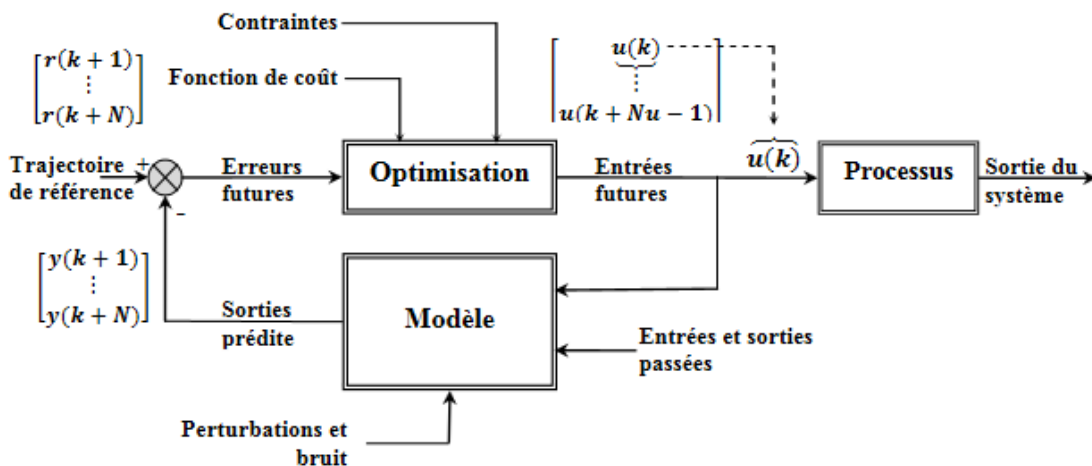


Figure (IV.4): Stratégie de la commande prédictive[21].

IV.6. Intérêts de la commande prédictive :

La plupart des régulations industrielles sont réalisées souvent avec des régulateurs PID analogiques avec une efficacité remarquable et un rapport prix/performance avec lequel il est difficile de les rivaliser. Toutefois, ce type de régulateur ne couvre pas tous les besoins et ses performances souffrent dans un certain champ d'applications dont on cite [22]:

- ✓ Les processus difficiles, notamment non linéaires, instables, non stationnaires, à grand retard purs et aussi multi variables.
- ✓ Lorsque les performances sont tendues par l'utilisateur, notamment :

Forte atténuation des perturbations, erreur de traînage nulle en poursuite, réponse en temps minimal, ce qui amène à fonctionner sous contraintes qui affectent soit les variables de commande, soit les variables internes du processus. Ces limitations ont favorisé l'éclosion de la commande prédictive base de modèle numérique puisque sur le plan technique numériques susceptibles de réaliser des traitements algorithmiques, intégrant calcul et logique qu'aux régulateurs purement analogiques. En conséquence, le régulateur prédictif va être construit sur la base d'un modèle interne, qu'il va utiliser sur le site, en temps réel. La richesse de la commande prédictive provient du fait qu'elle n'est pas seulement capable de contrôler des processus simples du premier et du second ordre, mais aussi des processus complexes, notamment les processus avec temps de retard assez long, processus instable en boucle ouverte sans que le concepteur prenne trop des précautions spéciales . Pendant les dernières années, différentes structures du contrôleur prédictif ont été développées, on peut citer la commande prédictive généralisée (GPC), qui a connu un grand essor en tant que technique de commande avancée depuis le milieu des années 80, cet essor s'est réalisé principalement selon deux axes privilégiés:

- ✓ De D.W. Clarke 1985: Commande Prédictive Généralisée (G.P.C) (Generalized Predictive Control) .
- ✓ De J. Richalet 1987: Commande Prédictive Fonctionnelle (P.F.C.) (Predictive Functional Control).

IV.7. Modélisation du système:

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures.

Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction du coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Le modèle du système joue donc un rôle central dans le correcteur. Le modèle choisi doit être

capable de rendre compte de la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures et aussi doit être simple à implémenter et à comprendre. Tous les algorithmes de commande prédictive ne diffèrent entre eux que par le modèle utilisé pour représenter le procédé et les bruits, et par la fonction du coût à minimiser. Les différentes approches se différencient par le type de modèle qu'elles utilisent, ainsi que par la forme de la fonction de coût et la prise en compte ou non de contraintes.

IV.8.Principe de la commande prédictive en courant rotorique du GADA:

Le principe de base de la commande prédictive consiste de prendre en compte, à l'instant actuel, le comportement future, par le biais d'utilisation explicite d'un modèle numérique du système dans le but de prédire la sortie dans le futur, sur un horizon fini. Un des intérêts des méthodes prédictives réside dans le fait que, pour une consigne pré calculée sur un certain horizon, il est ainsi possible d'exploiter les informations de trajectoires prédéfinies situées dans la future, étant donné que le but est de faire correspondre la sortie du système avec cette consigne sur un horizon fini [22].

La commande prédictive généralisée est basée sur quatre grandes idées [23] :

- ✓ Création d'un effet anticipatif par exploitation de la trajectoire à suivre dans le future.
- ✓ Définition d'un modèle numérique de prédiction.
- ✓ Minimisation d'un critère quadratique à horizon fini.
- ✓ Principe d'horizon fuyant.

Le principe général de tous les correcteurs de la classe prédictive se caractérise par la stratégie suivante, représentée sur la figure (IV.5):

- ✓ Les sorties futures sur un horizon déterminé de taille N appelé l'horizon de prédiction, sont prédites à chaque instant k à l'aide du modèle du processus.

Ces prédictions sont notées $y(k+j|k)$, avec $j = 1, \dots, N$, pour indiquer la valeur de la sortie à l'instant $k+j$ calculée à l'instant k . Elles dépendent des valeurs connues jusqu'à l'instant k (entrées et sorties passées) et des commandes futures $u(k+j|k)$,

$j = 0, \dots, N-1$, qui sont celles à envoyer au système et qui doivent être calculées.

- ✓ L'ensemble des commandes futures est calculé en optimisant un critère déterminé pour garder le processus aussi proche que possible de la trajectoire de référence $r(k+j)$. Ce critère prend généralement la forme d'une fonction quadratique des erreurs entre le signal de sortie prédit et les consignes futures. L'énergie de la commande est incluse dans la fonction de coût dans la plupart des cas. Une solution explicite peut être obtenue si le critère est quadratique, le modèle linéaire et s'il n'y a pas de contraintes,

sinon une méthode d'optimisation itérative doit être utilisée. Des hypothèses sont également faites sur la structure de la loi de commande future. Comme par exemple qu'elle sera constante à partir d'un instant donné (horizon de commande) .

- ✓ La commande $u(k|k)$ est envoyée au système et les autres valeurs de commande sont oubliées, parce qu'à l'instant d'échantillonnage suivant la mesure $y(k+1)$ est déjà connue et que l'étape n°1 est répétée avec cette nouvelle valeur, toutes les séquences étant mise à jour. Alors on calcule la commande $u(k+1|k+1)$, qui est différente de $u(k+1|k)$ en principe à cause des nouvelles informations prises en compte.

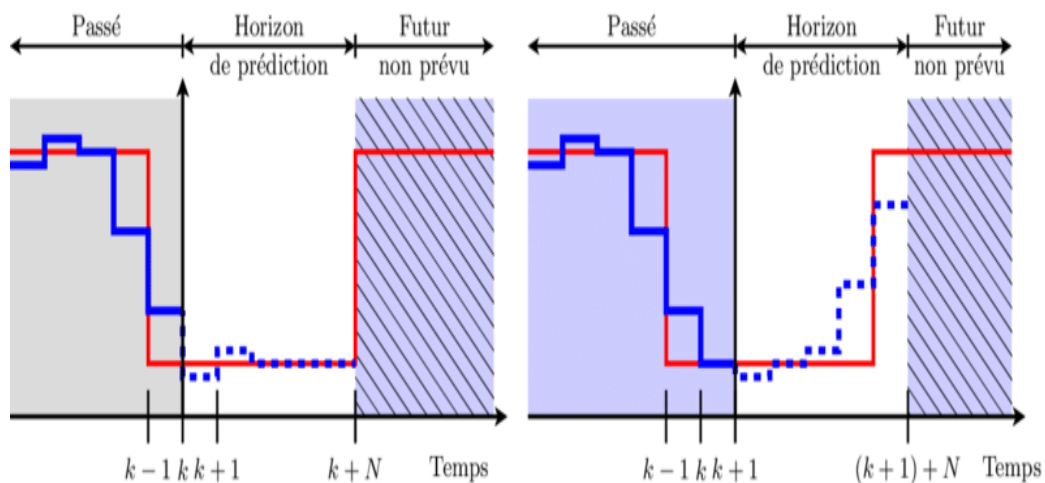


Figure (IV.5): Représentation temporelle du principe de la commande prédictive[21].

IV.9. Commande prédictive de la GADA:

IV.9.1. La commande FS-MPC de la GADA par le contrôle de l'Onduleur:

Le rôle principal du contrôle du convertisseur (onduleur) est d'assurer le transfert découplé et optimal de la puissance active et réactive statorique par le contrôle des composantes directe et quadrature du courant rotorique de la GADA. L'algorithme prédictif traite les objectifs de la commande vectorielle en fonction des courants de référence qui sont donnés par les équations suivantes :

$$i_{qr}^* = -\frac{L_s}{M V_s} P_s^* \quad \text{Et} \quad i_{dr}^* = \frac{\varphi_s}{M} - \frac{L_s}{M V_s} Q_s^* \quad (\text{IV.1})$$

La stratégie de contrôle FS-MPC peut être résumée dans les étapes suivantes :

- ✓ Construire un modèle de la GADA pour la prédiction.
- ✓ Construire un modèle du convertisseur de puissance.
- ✓ Définir une fonction de coût g en fonction des performances désirées.

IV.9.2.Modèle de la GADA:

Le modèle de la GADA est celui donné au deuxième chapitre par les équations Suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{dr} - R_r i_{dr} + \omega_r \sigma L_r i_{qr}) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{qr} - R_r i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} - \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_s) \end{cases} \quad (IV.2)$$

IV.10.Modèle de prédiction de la GADA:

Le modèle de la GADA(IV. 3)est représenté par les équations dynamiques du courant direct et quadrature du rotor. Les prédictions des courants rotoriques à chaque état des interrupteurs du IMC sont données par :

$$\begin{cases} i_{dr}^P (K + 1) = \frac{T_s}{\sigma L_r} (V_{dr} (K) - R_r i_{dr}(k) + \omega_r \sigma L_r i_{qr}(k)) + i_{dr}(k) \\ i_{qr}^P (K + 1) = \frac{T_s}{\sigma L_r} (V_{qr} (K) - R_r i_{qr}(k) + \omega_r \sigma L_r i_{dr}(k) - \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_s) + i_{qr}(k) \end{cases} \quad (IV.3)$$

Ces valeurs prédites des composantes des courant rotoriques sont utilisées pour évaluer Une fonction de coût F qui minimise l'erreur absolue entre les valeurs prédites et leurs références. L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (IV.4)$$

D'après les équations :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (IV.5)$$

IV.11.La fonction de coût pour le contrôle de l'onduleur:

La fonction de coût est définie pour satisfaire les performances dynamiques du système de contrôle, chaque terme de la fonction coût remplace un régulateur. Cette fonction de coût est calculée à chaque période d'échantillonnage pour chaque état de commutation possible du convertisseur pour sélectionner l'état optimale qui donne l'erreur la plus petite. Le vecteur de l'état de commutation optimale est alors sélectionné pour être appliqué au début de la période d'échantillonnage suivante. Grâce à la flexibilité de la commande prédictive, plusieurs objectifs peuvent être atteints en même temps en ajoutant d'autres termes dans la fonction de coût global F. Les objectifs de contrôle de la méthode de contrôle proposée sont les suivants:

- ✓ Le réglage de la puissance active et réactive statorique de la MADA

- ✓ Minimisation de la puissance réactive cotée filtre transitant entre le rotor de la MADA et le réseau afin d'assurer un facteur de puissance unitaire côté réseau. Ces deux objectifs sont résumés par le choix de la fonction coût suivante:

$$F_j = |i_{dr}^*(k+1) - i_{dr}^p(k+1)| + |i_{qr}^*(k+1) - i_{qr}^p(k+1)|$$

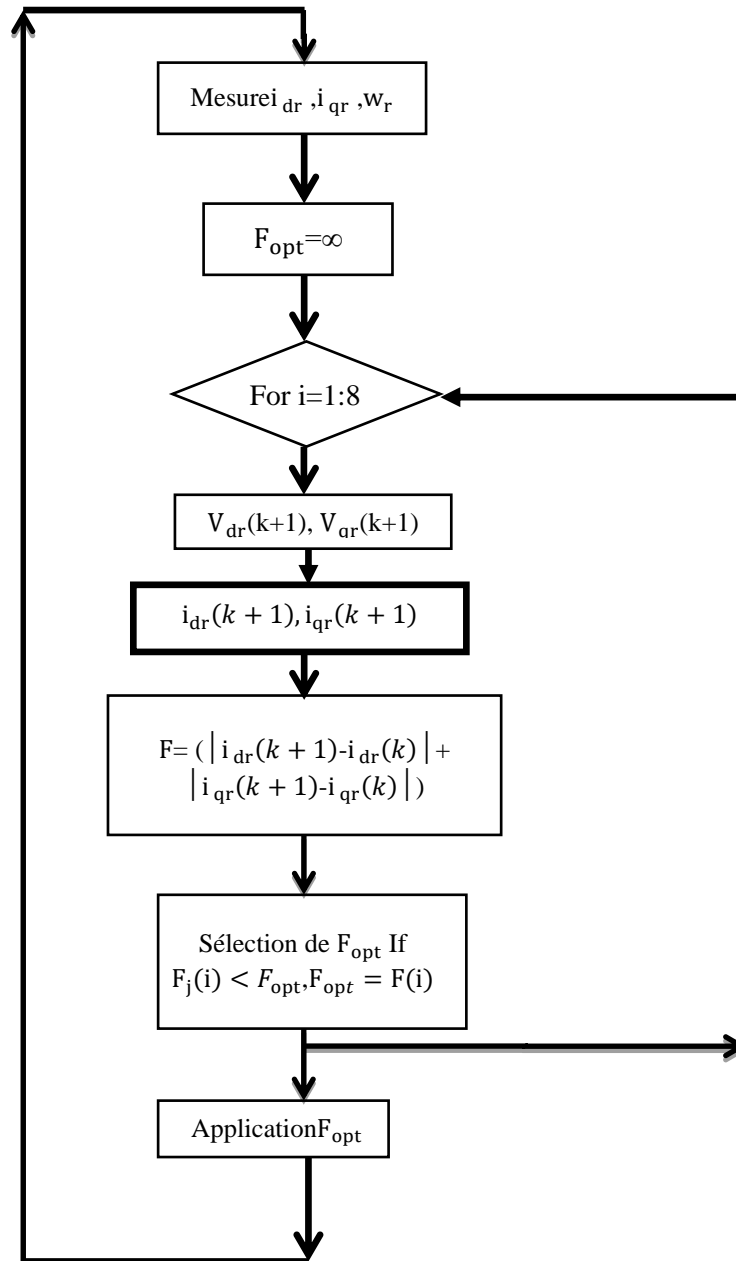
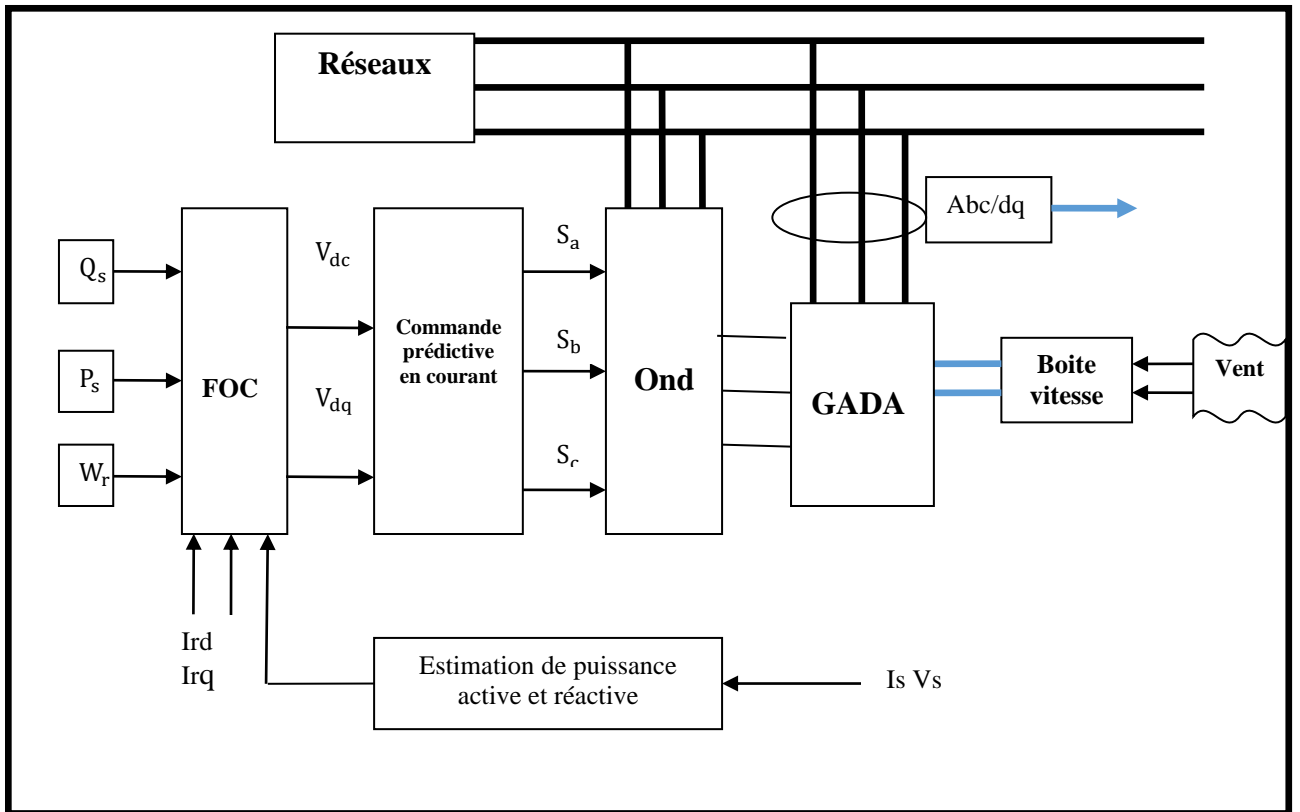


Figure (IV.6): Organigramme de la commande prédictive en courant de la GADA



Figure(IV.7): Commande prédictive de la GADA

IV.12.Résultats de simulation:

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab /Simulink, Afin de valider les commandes étudiées. La figure (IV.8) présente la variation du profil du vent appliqué sur les pales de l'éolienne.

En utilisant la vitesse comme entrée de la commande MPPT. Les résultats de simulation de système attestent une bonne poursuite comme il est indiqué par la figure (IV.8).

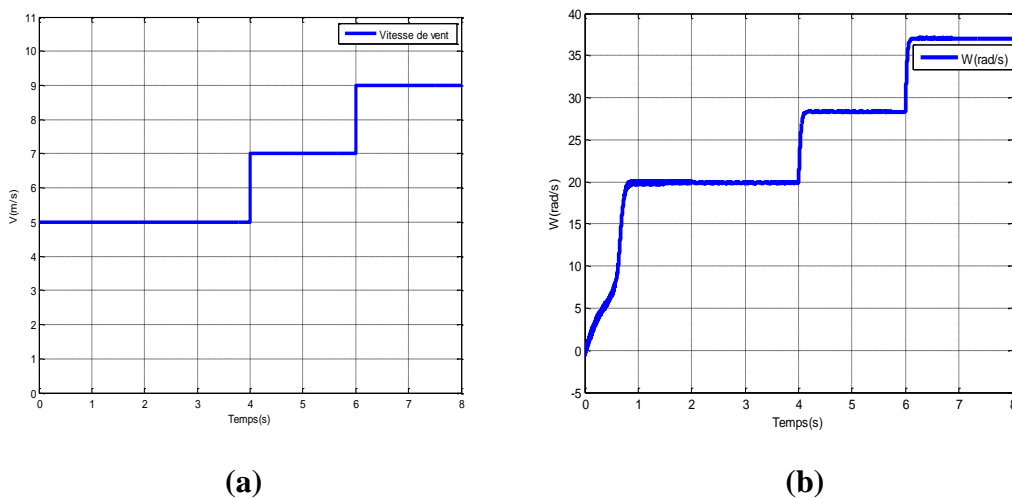


Figure (IV.8):Vitesse de vent en fonction du temps(a) et La vitesse rotorique(b)

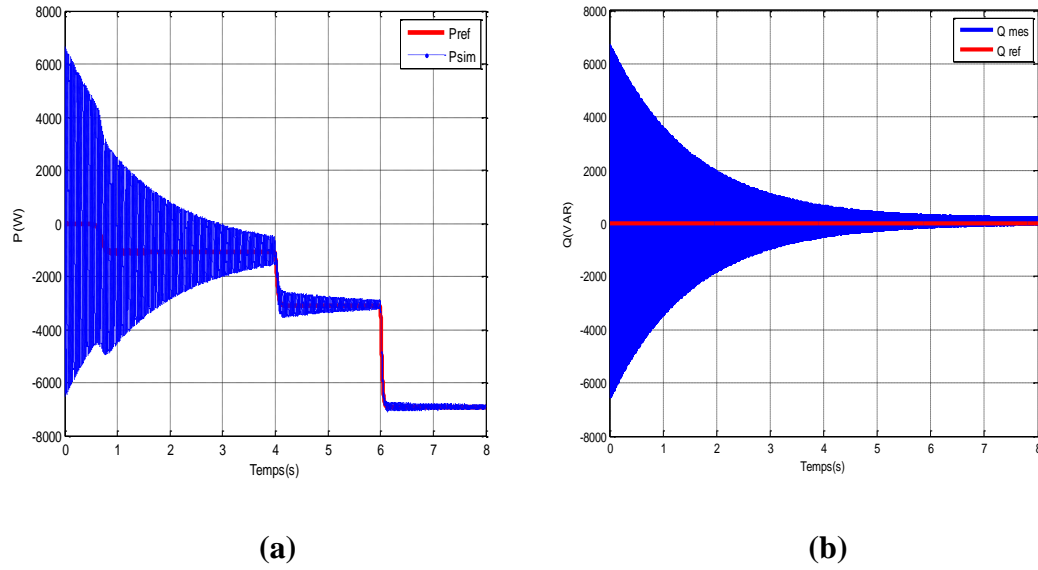


Figure (IV.9): Puissance active statorique(a) et Puissance réactive statorique et sa référent(b)

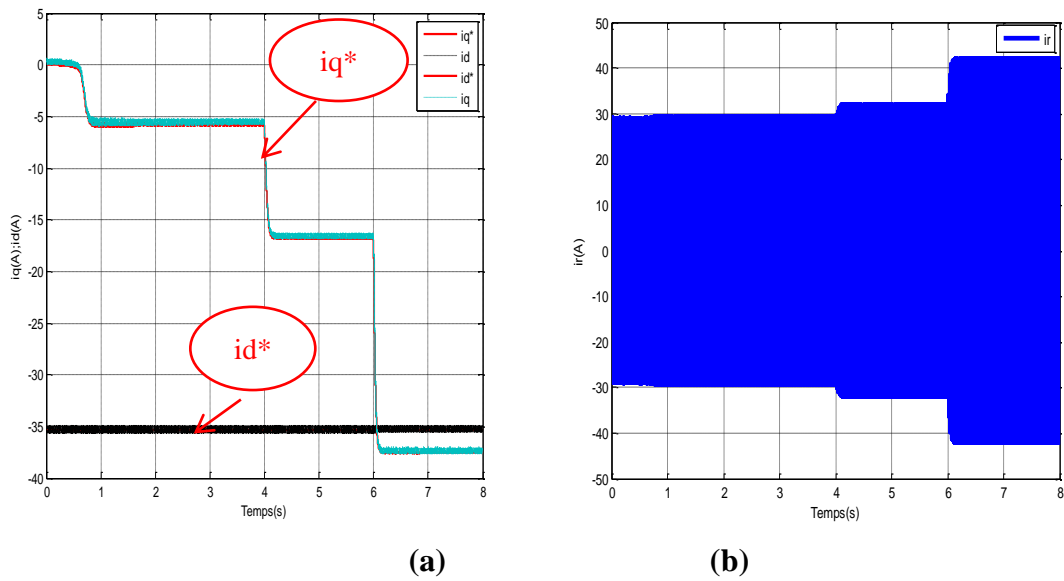


Figure (IV.10): les composantes directe et quadrature du courant rotorique(a) et courant d'une phase rotorique(b)

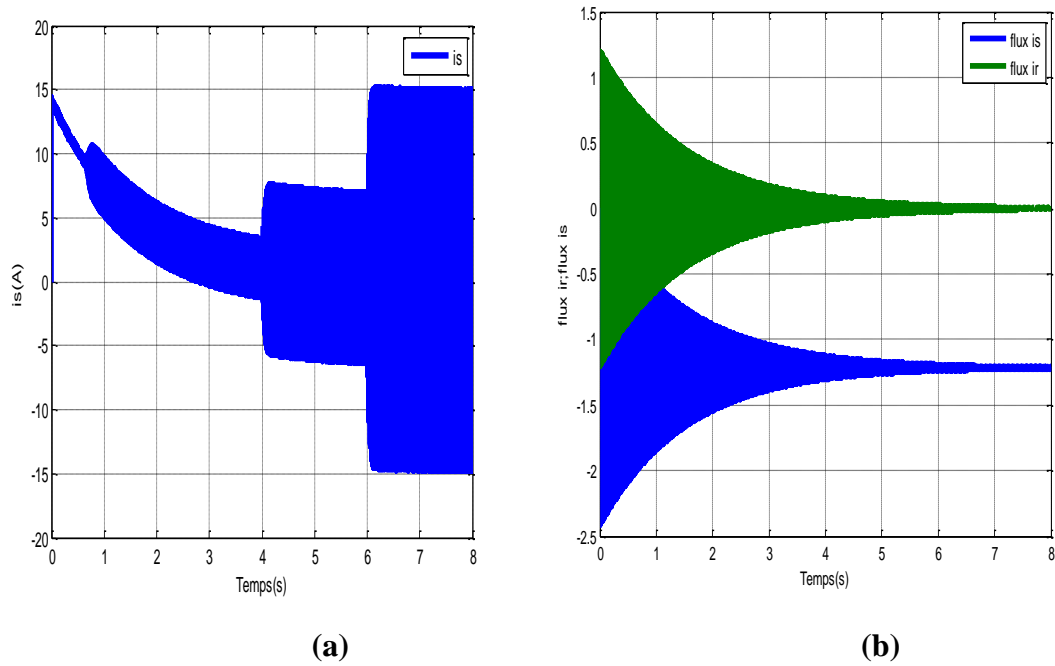


Figure (IV.11): Courant d'une phase statorique(a) et flux rotorique et statorique(b)

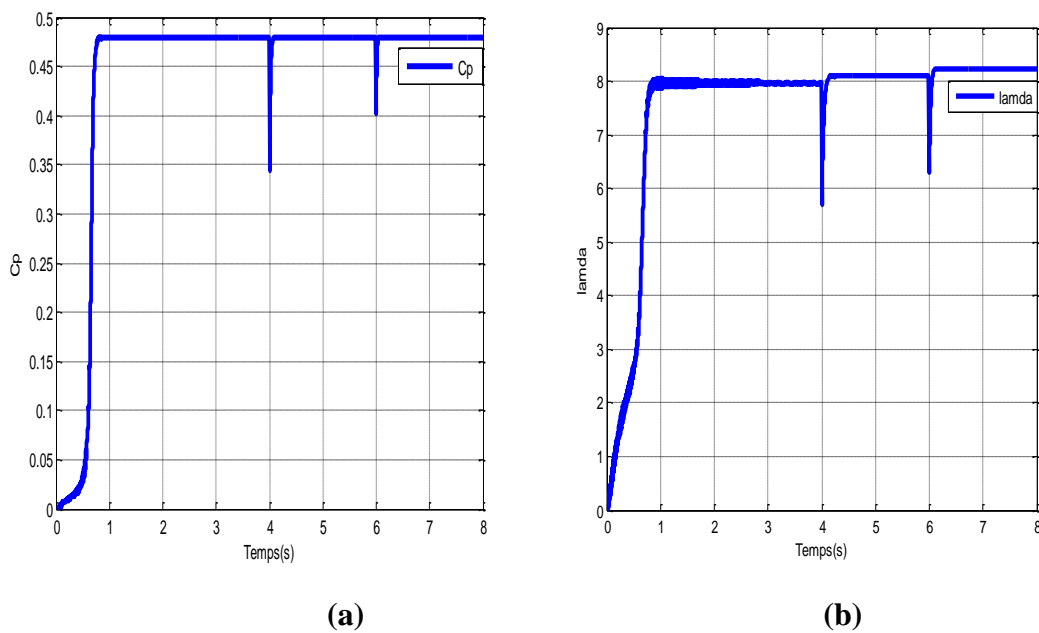


Figure (IV.12): Vitesse relative de l'éolienne(b) et Coefficient de puissance de la turbine(a)

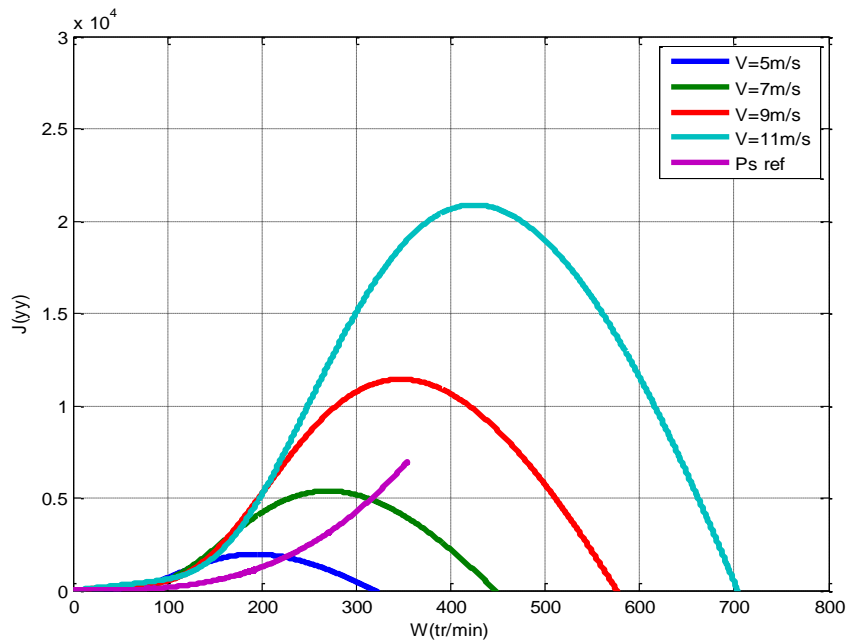


Figure (IV.13):MPPT de l'éolienne

IV.13.Interprétations des Résultats:

Les résultats de simulation permettent d'observer l'évolution de différentes grandeurs qui interviennent dans cet algorithme, où on distingue les remarques suivantes.

- ✓ Il est clair que la vitesse stable dans différentes valeurs de vent.
- ✓ Le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs et le coefficient de puissance est obtenu pour différents vents qui nous donne leurs valeurs de références optimales ($\lambda = 8.1$), les coefficients de puissance C_p restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales(0,48).
- ✓ Les variations du coefficient de puissance (C_p) correspondent aux changements de la réponse de l'angle de calage qui varie la vitesse de la turbine à la valeur optimale. Le découplage des composantes directe et quadratique des courants rotoriques de la GADA est quasi parfait. Avec une bonne poursuite les courants rotoriques des références dans les axes d-q qui doit être imposé dans l'hypothèse de la commande à flux statorique orienté, comme il est indiqué par la Figure (IV.10) ce qui indique que l'efficacité de la commande prédictive en courant pour leur asservissement.
- ✓ La puissance éolienne capturée suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil de vent appliqué, cette allure est conforme aussi par la trajectoire de puissance maximale. Cette méthode de contrôle permet de se rapprocher rapidement de la MPPT à l'aide de l'estimation de la vitesse de rotation w , c'est-à-dire sans

utilisation de capteur de vitesse et réduit considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale.

IV.14.Conclusion:

Après l'utilisation de la commande par régulation PI vectorielle nous avons utilisé la contrôle prédictif du courant rotorique du système de conversion de l'énergie éolienne à l'aide d'un DFIG, dans notre cas la puissance active et réactive commandé par les courant rotorique et l'algorithme de contrôle proposé sélectionne la l'état du convertisseur qui minimise le erreur entre les prédictions des courants rotoriques et leurs valeurs des référence pour tous les différents vecteurs de tension, donc le vecteur de tension optimal qui minimise la fonction de coût appliqué au rotor DFIG enfin .les résultats par simulation sous MATLAB donne des réponses des puissances très satisfaisants .

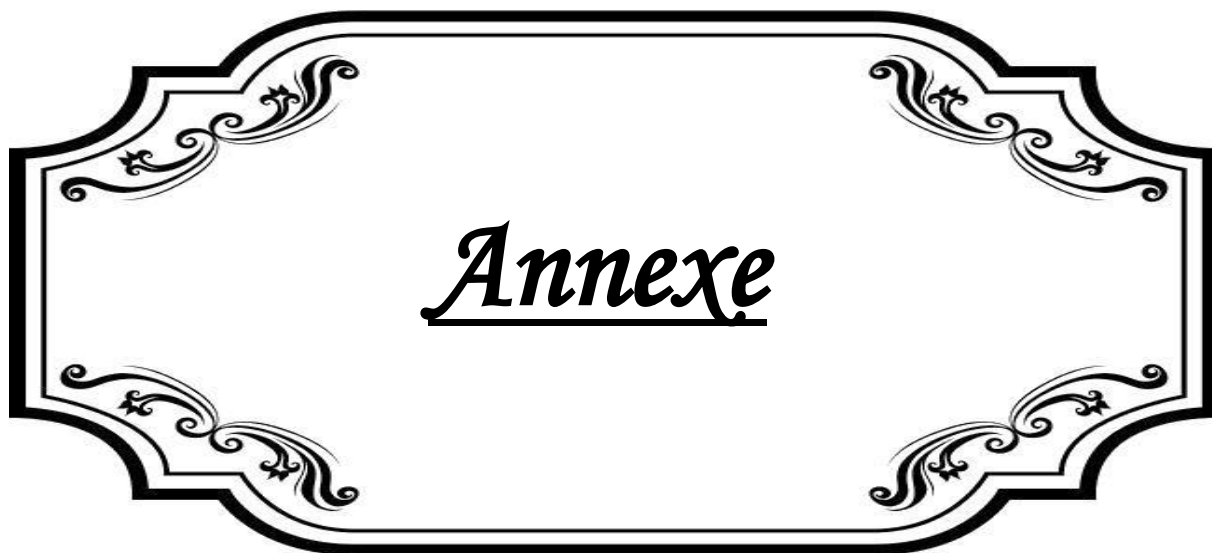


Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrones double alimentation qui peut être utilisé dans la production de l'énergie éolienne. Nous avons choisis deux stratégies de commande (la commande vectorielle et la commande prédictive).

- ✓ Le premier chapitre, nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le comportement d'une machine asynchrone à double alimentation, nous avons créé un modèle dynamique de système éolien associé à GADA pour simplifier le modèle de la machine et nous permettre également de réguler la puissance active et réactive. On voit l'intérêt du Park de conversion, qui a permis d'obtenir plus facilement un système d'équation qui facilite l'utilisation.
- ✓ Dans le troisième chapitre, Dédiée à la réalisation de la méthode de contrôle, cette méthode s'appuie sur une commande vectorielle par direction du flux du stator, nous avons également mis en relation les différentes parties étudiées (Turbine, GADA, Onduleur) et qui offre un système éolien global.
- ✓ Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié le contrôle prédictif en courant qui remplace le régulateur PI dans le but de réglage de la puissance active et réactive, Le schéma de contrôle doit être très simple et efficace qui réduit et limite l'erreur dans les courants rotoriques (dq) et donne des valeurs plus précises et des performances plus élevées.



Annexe

Annexe

Annexe(1)

1. Génératrice asynchrone à double alimentation :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.7614 (Ω)
Inductance mutuelle	0.107 (H)
Inductance statorique	0.12 (H)
Inductance rotorique	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220 V
Fréquence du réseau	50 Hz

2. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	3 m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0,5 Kg.m ²
Coefficient de frottement	0.0024N.m.s/rad

Annexe (2)

1. Calcul des paramètres du régulateur PI :

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (2.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

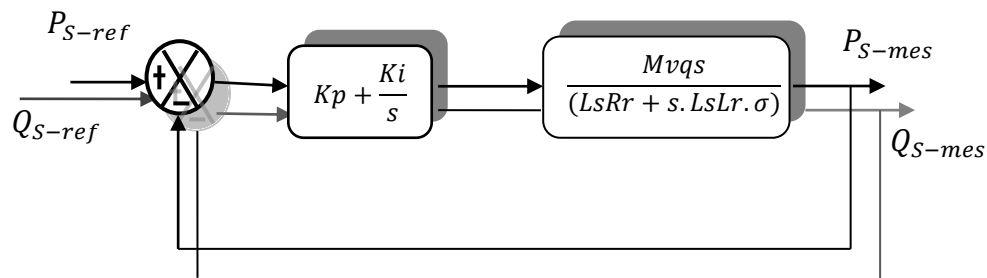


Figure (2.1) : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

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

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (2.1) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction F_{BO} suivante :

$$F_{BO} = \frac{K_P M v_{qs}}{L_s L_r \sigma \cdot s}$$

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

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

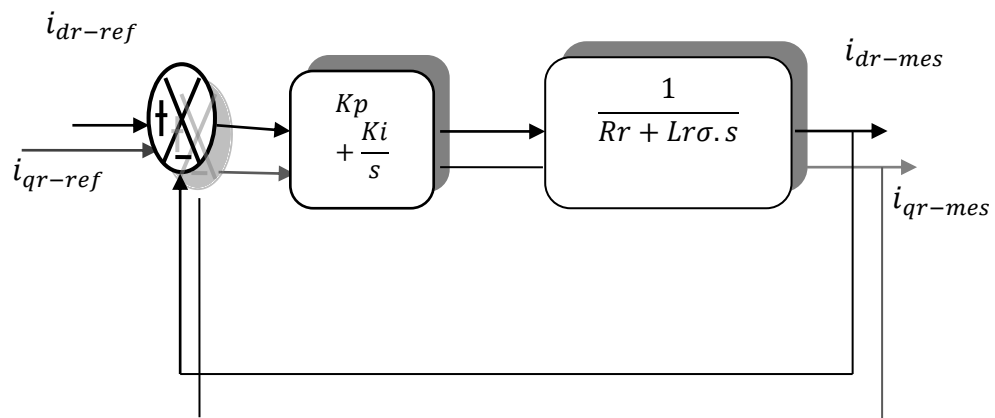
$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_p M v_{qs}}$$

τ : est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_p = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M v_{qs}} \text{ Et } K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M v_{qs}}$$

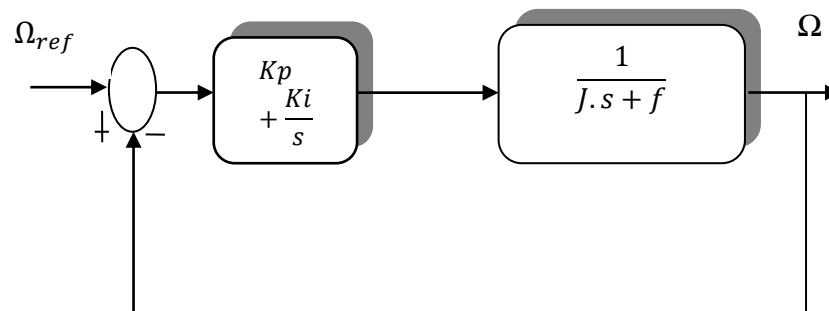
On applique la même méthode sur :

✓ Boucle des courants:



Figure(2.2) : Schéma block du système de régulation des courants rotorique .

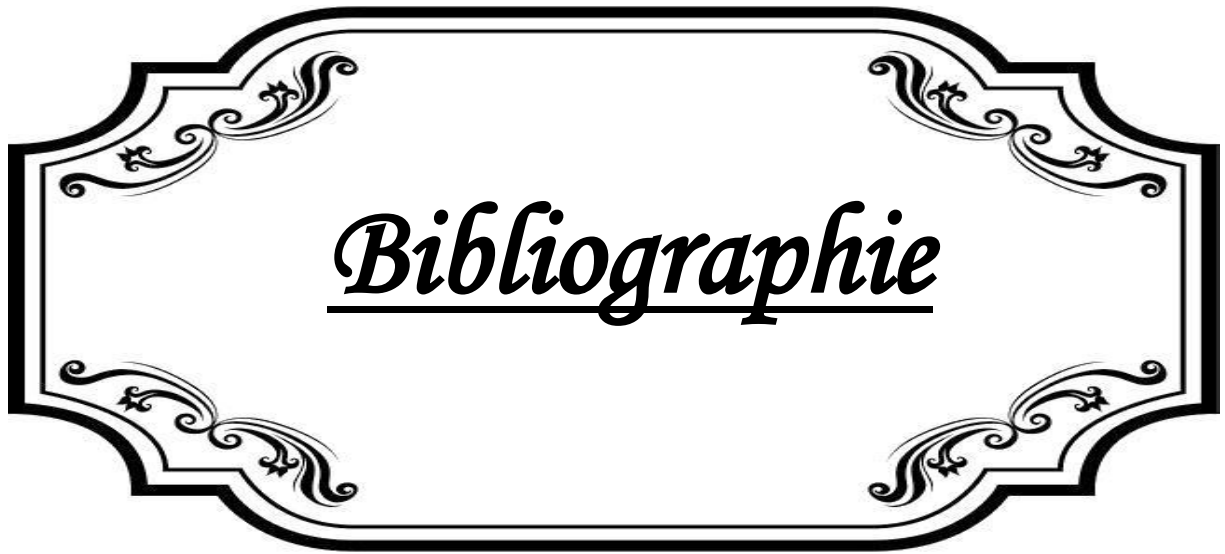
✓ Boucle de vitesse:



Figure(2.3) : Schéma block du système de régulation de vitesse.

✓ Paramètres du régulateurs PI classique :

Régulateurs des puissances	Régulateurs des courants
$K_p=710.64$	$K_p=200$
$K_i=8894.5$	$K_i=50$

A decorative frame with a double-line border and ornate scrollwork at the corners, enclosing the text.

Bibliographie

Référence

- [01] Ch.Said “Predictive current control of a wind energy conversion system based DFIG via direct matrix converter” 2015 6th International Renewable Energy Congress (IREC) University of Oum El Bouaghi.
- [02] Ch.Said “Commande FS-MPC d’une MADA alimentée par un convertisseur NPC à trois niveaux” Mémoire de Master de Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued 06/2020.
- [03] Ch.Said “Contribution à l’optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d’énergie éolienne ” Thèse de Doctorat de Université Larbi Ben M’hidi-Oum El Bouaghi Juillet 2017.
- [4] B. Beltran, “Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d’ordre supérieur,” Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2010.
- [5] F. Poitiers, “Etude et commande des génératrices asynchrone pour l’utilisation de l’énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 12/2003.
- [6] Y. Elbia, “Commande Floue Optimisée d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2009.
- [7] Paul-Etienne V, “ Commande non-Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation,” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [8] S.Drid, “Contribution à la modélisation et à la commande robuste d’une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d’alimentation: théorie et expérimentation,” Thèse de doctorat en électrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [9] M.A.HASSAD, « Influence de la commande d’une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012
- [10] M^{me} Kelkoul Bahia « Étude et commande d’une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de Magister API, Université de TLEMCEM, 2011.
- [11] Khelfat Lotfi et Maataoui Lakhdar « “Étude et Simulation d’une éolienne à base d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée » MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA, 2007.

- [12] MOUSSAOUI Taha Yacine et HADA Mounir « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued, 2015.
- [13] CHERIF, "Modélisation de Générateur Asynchrone Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [14] HARITZA CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003
- [15] T. Kruger, B. Anderson, « Advance control strategy for variable speed wind turbine », European Wind Energy conference 2001, Copenhagen, Denmark, pp.983-986.
- [16] Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani " Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer" World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug 2011, Vol. 80, p 920.
- [17] A. Boyette., "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [18] DJAGHDALI, LAKHDAR « Commande prédictive directe du couple de la machine asynchrone », Mémoire de master, Université Mohamed Khider - Biskra. 2012.
- [19] TOUATI boubaker & HAMOUGA Omar, " Commande prédictive appliquée à une machine synchrone alimentée par un onduleur triphasé", Mémoire de Fin d'Étude L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2017
- [20] Mohammed Larbi SAIDI " Commande des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires par la stratégie prédictive", thèse de doctorat Université ANNABA 2006.
- [21] P. Boucher, D. Dumur, "La Commande prédictive", Edition Technique, Paris, 2000.
- [22] Assiya Kettani, "La commande prédictive globale multivariable", Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'université Laval Canada pour l'obtention du grade de maître ès sciences 2000.
- [23] M. Maaziz, "Commande prédictive de systèmes non linéaires: application à la commande de machines asynchrones", *Thèse de Doctorat université Paris Xi Orsay, 2000.*

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 les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les tensions rotoriques. La modélisation et la commande vectorielle de la partie mécanique de l'éolienne et de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre nous avons présenté la commande du système éolien à vitesse variable basé sur la GADA associé à un système éolienne. Le quatrième chapitre été consacré à la commande prédictive en courant, Pour évaluer les performances de commande étudiée, nous avons effectué différents simulations, qui ont montré l'importance et l'efficacité de ce commande.

Mots clés: System éolien ; Modélisation ; GADA ; Commande Vectorielle ; commande prédictive en courant.

Abstract

In this thesis, we present the study of a control of the Doubly Fed Induction Generator (DFIG) which can be introduced into a wind power system. The first chapter presents the different power supply structures and the deferent type of generator used. We opted for the asynchronous machine with double power supply controlled through the rotor voltage. The modeling and vector control of the mechanical part of the wind turbine and of the double-fed asynchronous machine is detailed in the second chapter. In the third chapter we presented the control of the variable speed wind power system based on DFIG in wind power system. The fourth chapter was devoted to the current predictive control, to evaluate the studied control performances, we carried out various simulations, which showed the importance and the efficiency of this control .

Key words: Wind system: Modeling: DFIG: Field oriented control. Predictive Current Control

ملخص:

في هذه الأطروحة، نقدم دراسة التحكم في المولد غير المتزامن ثنائي التغذية والذي يمكن إدخاله في نظام طاقة الرياح. يعرض الفصل الأول هياكل الإمداد بالطاقة المختلفة ونوع المولد المستخدم، وقد اخترنا الآلة غير المتزامنة مع مصدر طاقة مزدوج يتم التحكم فيه من خلال متغيرات الدوار. تم تفصيل النمذجة والتحكم في ناقلات الجزء الميكانيكي لتوربين الرياح والآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة في الفصل الثاني. في الفصل الثالث قدمنا التحكم في نظام طاقة الرياح متغيرة السرعة على أساس GADA المرتبط بنظام طاقة الرياح. تم تخصيص الفصل الرابع للتحكم التنبئي الحالي لتقييم أداء هذا التحكم، قمنا بإجراء عمليات محاكاة مختلفة، والتي أظهرت أهمية وكفاءة هذا التحكم التنبئي .

مفتاحية كلمات: نظام طاقة الرياح - النمذجة - GADA - التحكم التنبئي بالتيار