



*Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté Des Nouvelles Technologies De
L'information Et De La Communication
Département D'électronique Et De
Télécommunication*



MÉMOIRE

MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Instrumentation Industrielle**

Présenté par : **KADI Ahmed Taha**

NETTARI Farouk

KHARROUBI Idriss

Thème

Modélisation Et Commande De La Génératrice Asynchrone A Double Alimentation

Soutenue publiquement le /10/2020 devant le jury :

SOURI Samira

Université Kasdi Merbah Ouargla

Université Kasdi Merbah Ouargla

Université Kasdi Merbah Ouargla

Président

Rapporteur

Examineur

Année Universitaires : 2019/2020

Remerciement

Nous tenons à remercier éternellement Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener a terme ce modeste travail.

Que messieurs S. SOURI et M.Y. RACHDI trouvent ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour nous avoir aides et suivis patiemment dans l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont à toute personne ayant contribué de prêt ou de loin a l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Nous dédions de travail :

A notre très chers parents qui nous avons toujours soutenu

A notre grands parents

A toutes nos familles

A tous notre amis.

** Et à tout le groupe Instrumentation*

Résumé

Dans cette Mémoire, nous concentrons sur le développement d'une loi de contrôle pour la puissance effective et la puissance de réverbération du stator dans le moteur asynchrone Ce qui constitue la composante de production d'énergie électrique de la série d'éoliennes à vitesse variable. , "GADA" a doublé Pour qu'une référence soit donnée à la référence de l'énergie efficace au stator pour extraire l'énergie maximale disponible du vent dans les pales Ce qui ne nécessite aucune connaissance de la vitesse de la turbine "MPPT" et ce en appliquant la méthode de suivi de la turbine de puissance maximale Vent. Les résultats de simulation obtenus ont montré qu'il est possible d'ajuster l'énergie du stator même avec des changements dans les éléments. La chaîne éolienne proposée a atteint une productivité maximale.

Mots clés :

Energie Eolienne, Machine Asynchrone à Double Alimentation, MPPT, Commande Vectorielle , Régulateurs ,GADA.

ملخص:

في هذه الرسالة ، نركز على تطوير قانون تحكم للقوة الفعالة وقوة الصدى للجزء الثابت في المحرك غير المتزامن. الذي يشكل مكون توليد الطاقة الكهربائية لسلسلة توربينات الرياح متغيرة السرعة . "GADA" بحيث يتم إعطاء إشارة مرجعية للطاقة الفعالة عند الجزء الثابت لاستخراج أقصى طاقة متوفرة من الرياح في الريش والتي لا تتطلب أي معرفة بسرعة التوربينات "MPPT" وذلك بتطبيق طريقة مراقبة الطاقة القصوى لتوربينات الرياح. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أنه من الممكن ضبط طاقة الجزء الثابت حتى مع التغييرات في العناصر. وصلت سلسلة الرياح المقترحة إلى أقصى إنتاجية.

كلمة مفتاحية:

طاقة الرياح , الآلة اللا تزامنية مزدوجة التغذية, MPPT , التحكم الشعاعي عن طريق التدفق ,المتحكمات التقليدية ,التحكم عن طريق النمط الإنزلاقي.

Symboles

SYMBOLE	DESIGNATION
β	Angle de l'orientation de pale
C_p	Coefficient de puissance
C_{pmax}	Coefficient de puissance maximal
C_t	Couple de la turbine
C_g	Couple du générateur
C_{em}	Couple électromagnétique
C_{em_ref}	Couple électromagnétique
C_m	Couple mécanique
ρ	Densité d'air
G	Gain du multiplicateur
J_t	Inertie de la turbine
J_g	Inertie du générateur
R	Longueur de pales
P_{aer}	Puissance aérodynamique
P_{aer_ref}	Puissance aérodynamique de référence
P_v	Puissance du vent
λ	Ratio de vitesse
A	Surface circulaire balayée par la turbine
λ_{optim}	Valeur optimale du ratio de vitesse
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur
V	Vitesse du vent

Symboles

V_{est}	Vitesse du vent estimée
Ω_{mec}	Vitesse mécanique du GADA
θ_s, θ_r	Angle du stator et du rotor
σ	Coefficient de dispersion
f	Coefficient de frottement
g	Coefficient de glissement
p	Constante de Laplace
T_s, T_r	Constante de temps statorique et rotorique
C_e	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d q)
$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$	Flux statoriques et rotoriques dans le repère (d q)
K_i	Gain intégral
K_p	Gain proportionnel
M	Inductance mutuelle
L_s, L_r	Inductances propres du stator et du rotor
[P]	Matrice de transformation de Park
J	Moment d'inertie
P	Nombre de paires de pôle
P_r, Q_r	Puissance active et réactive rotorique
P_s, Q_s	Puissance active et réactive statorique
ω_s, ω	Pulsation du stator et du rotor
R_s, R_r	Résistances du stator et du rotor
UC	Tension du bus continu
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$	Tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d q)

Symboles

$[i_{ar}i_{br}i_{cr}]^T$	Vecteurs des courants rotoriques dans le repère (a b c)
$[i_{as}i_{bs}i_{cs}]^T$	Vecteurs des courants statoriques dans le repère (a b c)
$[\phi_{ar}\phi_{br}\phi_{cr}]^T$	Vecteurs des flux rotoriques dans le repère (a b c)
$[\phi_{as}\phi_{bs}\phi_{cs}]^T$	Vecteurs des flux statoriques dans le repère (a b c)
$[V_{ar}V_{br}V_{cr}]^T$	Vecteurs des tensions rotoriques dans le repère (a b c)
$[V_{as}V_{bs}V_{cs}]^T$	Vecteurs des tensions statoriques dans le repère (a b c)
Ω	Vitesse mécanique

Table de Matières

Introduction Générale	1
-----------------------	---

Chapitre I

Etat De L'art Sur Les Systèmes De Conversion D'énergie Eolienne

I.1. Introduction	3
I.2. Etat de l'art sur l'énergie éolienne	3
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne	3
I.2.2. Constitutions d'une éolienne	4
I.2.3. Types d'Eoliennes	5
I.2.4. Impact sur l'environnement	7
I.2.5. Avantages de l'éolien	7
I.3. Variations saisonnières de la productivité des éoliennes	7
I.4. Zone de fonctionnement	8
I.5. La rentabilité d'une éolienne:	9
I.6. Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes à vitesse variable	9
I.6.1. Système utilisant une génératrice synchrone	9
I.6.2. Système utilisant une génératrice asynchrone	10
I.6.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation:	10
I.7. Conclusion	10

Chapitre II

La Modélisation de la chaîne de conversion D'éolienne

II.1. Introduction	13
II.2. Efficacités énergétique d'un capteur éolien	13
II.3. Modèle de la turbine éolienne	14
II.3.1. Modèle du Multiplicateur	16
II.3.2. Modèle de l'Arbre	16
II.3.3. Modèle de l'actionneur des pales	17
II.4. Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA)	18
II.4.1. Topologies de générateur	18

II.4.2. Structure de la Machine Etudiée	21
II.4.3. Les différents Modes de fonctionnement de la GADA	21
II.4.4. Modélisation de la GADA	23
II.5.Conclusion	26

Chapitre III

La commande vectorielle du générateur asynchrone a double alimentation

III.1.Introduction	33
III.2. Commande du Système Global	33
III.2.1. Commande de la Turbine avec la Stratégie MPPT (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)	33
III.2.2 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive	35
III.2.2.1 Commande Directe des Puissances Active et Réactive	37
II.2.2.2 Dimensionnement du Régulateur PI	38
II.2.2.3 Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive	39
III.2.3 Modélisation et Commande de l’Onduleur à MLI	41
II.2.3.1 Commande par Modulation Sinus-Triangle	43
III.3 Résultats de Simulation	45
III.3.1 Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte du GADA	47
III.3.1.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe	48
III.3.1.2 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte	48
III.3.1.2.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances	49
III.3.1.2.2 Commande Indirecte avec Boucles des Puissances	52
III.3.2 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte sans Boucles des Puissances à Vitesse Variable	53
III.3.2.1 Profil du Vent en Echelons	54
II.3.2.2 Profil du Vent Aléatoire	55
III.4 Conclusion	56

Liste des Figures

Chapitre I

Etat De L'art Sur Les Systèmes De Conversion D'énergie Eolienne

Figure I.1	<i>Conversion de l'énergie cinétique du vent</i>	4
Figure I.2	<i>Constitution d'une éolienne.</i>	4
Figure I.3	<i>Éolienne à Axe Vertical</i>	5
Figure I.4	<i>les deux principes de Éolienne à Axe Vertical</i>	5
Figure I.5	<i>Conversion de l'énergie cinétique du vent</i>	6
Figure I.6	<i>Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.</i>	6
Figure I.7	<i>Caractéristique Puissance-vitesse du vent</i>	8
Figure I.8	<i>Eolienne utilisant la GADA.</i>	11

Chapitre II

La Modélisation de la chaine de conversion D'éolienne

Figure II.1	<i>Caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent.</i>	14
Figure II.2	<i>Modèle de la turbine éolienne.</i>	14
Figure II.3	<i>Coefficients de puissance en fonction de Lambda et Beta.</i>	15
Figure II.4	<i>Modèle de l'arbre et de la turbine.</i>	16
Figure II.5	<i>Schéma de principe du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice</i>	17
Figure II.6	<i>Modèle et commande de système de calage de pales.</i>	17
Figure II.7	<i>Caractéristiques puissance vitesse mécanique, et puissance vitesse de la turbine.</i>	17
Figure II.8	<i>Génératrice avec vent constant.</i>	18
Figure II.9	<i>Génératrice à rotor bobiné.</i>	19
Figure II.10	<i>GADA à vitesse variable.</i>	19
Figure II.11	<i>Convertisseur en série à vitesse variable connecté à la génératrice.</i>	20
Figure II.12	<i>Principe du rotor bobiné</i>	21

Figure II.13	<i>Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une GADA</i>	22
Figure I.8	<i>Eolienne utilisant la GADA.</i>	11

Chapitre III

La commande vectorielle du générateur asynchrone a double alimentation

Figure III.1	<i>Structure du système global</i>	33
Figure III.2	<i>Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent</i>	34
Figure III.3	<i>Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent sous Matlab/Simulink</i>	35
Figure III.4	<i>Orientation du repère de Park</i>	35
Figure III.5	<i>Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA</i>	37
Figure III.6	<i>Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA</i>	37
Figure III.7	<i>Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s</i>	38
Figure III.8	<i>Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA</i>	40
Figure III.9	<i>Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink</i>	41
Figure III.10	<i>Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq}</i>	41
Figure III.11	<i>Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA</i>	43
Figure III.12	<i>Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux</i>	43
Figure III.13	<i>Schéma de principe de la commande MLI</i>	47
Figure III.14	<i>Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink</i>	47
Figure III.15	<i>Puissance active statorique de la commande direct</i>	48
Figure III.16	<i>Puissance réactive statorique de la commande directe</i>	49
Figure III.17	<i>Courants statorique de la commande directe</i>	49
Figure III.18	<i>Courants rotoriques de la commande directe</i>	49
Figure III.19	<i>Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances</i>	50
Figure III.20	<i>Puissance réactive statorique de la commande indirect sans boucles des puissances</i>	50
Figure III.21	<i>Courants statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances</i>	50

Figure III.22	<i>Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles des puissances</i>	51
Figure III.23	<i>Puissance active statorique de la commande indirecte avec boucles des puissances</i>	51
Figure III.24	<i>Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles des puissances</i>	52
Figure III.25	<i>Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles des puissances</i>	52
Figure III.26	<i>Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles des puissances</i>	52
Figure III.27	<i>puissances actives et réactives en direct à vitesse variable</i>	53
Figure III.28	<i>Courants statorique de la commande directe à vitesse variable</i>	53
Figure III.29	<i>Courants rotorique de la commande directe à vitesse variable</i>	54
Figure III.30	<i>puissances active et réactive par commande indirect sans Puissances</i>	54
Figure III.31	<i>Courants statorique de la commande indirecte sans Puissances à vitesse variable</i>	55
Figure III.32	<i>Courants rotorique de la commande indirecte sans Puissances à vitesse variable</i>	55
Figure III.33	<i>les courbes des puissances active et réactive par commande indirect</i>	55
Figure III.34	<i>Courants statorique de la commande indirecte avec Puissances à vitesse variable</i>	56
Figure III.35	<i>Courants rotorique de la commande indirecte avec Puissances à vitesse variable</i>	56

Liste des Tableaux

Chapitre III

La commande vectorielle du générateur asynchrone a double alimentation

Tableau.III.1	<i>Echelons des puissances active et réactive appliqués à chaque type de commande du GADA</i>	52
----------------------	---	----

Introduction Générale

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages. En effet, c'est une énergie complètement propre, elle n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre. Son fonctionnement ne pollue ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et, convertit en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine. [1]

De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à ces travaux, et grâce au progrès de l'électronique de puissance les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs. [2] [3].

Dans le présent travail nous voulons appliquer le système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation, l'objectif est de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs suivants :

- Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne.
- il faut donnée des résultats de simulation pour le moteur MADA et le système global étudié, ou le stator GADA est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à travers un onduleur de tension à deux niveaux et turbine.
- en fait comparissent entre la commande directe et indirecte, pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

CHAPITRE I

*Etat De L'art Sur Systèmes De
Conversion D'énergie Eolienne*

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent, elle est en partie résultante de l'énergie solaire. En effet, les grands flux de circulation atmosphérique sont en grande partie provoqués par la différence de température entre l'équateur et les pôles. Du fait de cette différence de pression, un flot d'air s'établit entre ces régions. La rotation de la terre provoque également des circulations d'air. Des différences locales de pression et de températures vont quant à elle donner des circulations particulières comme les brises de mer, les tornades[4]

La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal avec des rotors à trois pales (tripales) [3]. Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés. L'utilisation de ces aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable. Cependant le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite Impact d'éoliennes sur l'environnement et les Avantages et Variations saisonnières de la productivité des éoliennes ,. Vu La rentabilité d'une éolienne Enfin Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes à vitesse variable , elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre.

I.2. Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. [5]

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 (Figure 1.1). D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement

découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuses disciplines scientifiques et du savoir faire de la météorologie à l'écologie.

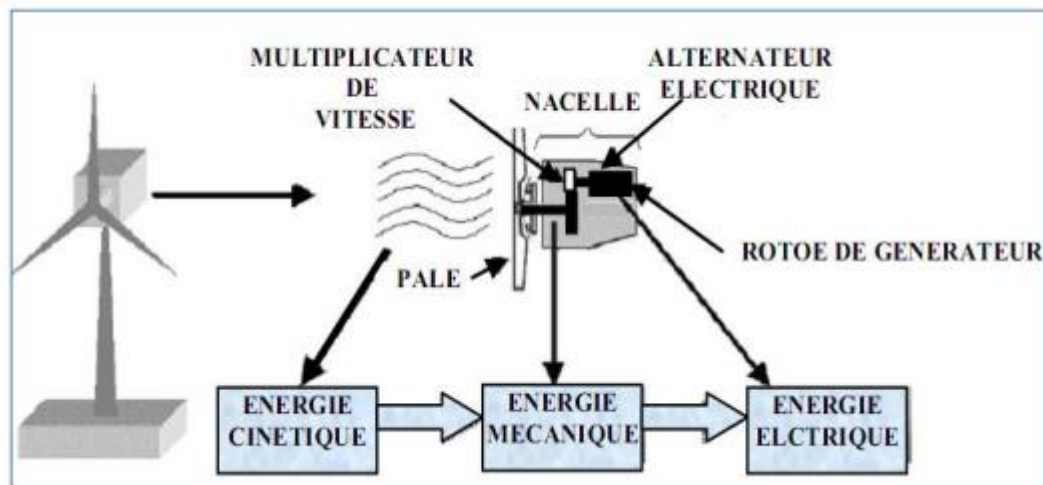


Figure I.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.2.2. Constitutions d'une éolienne

L'éolienne est constituée essentiellement [4]

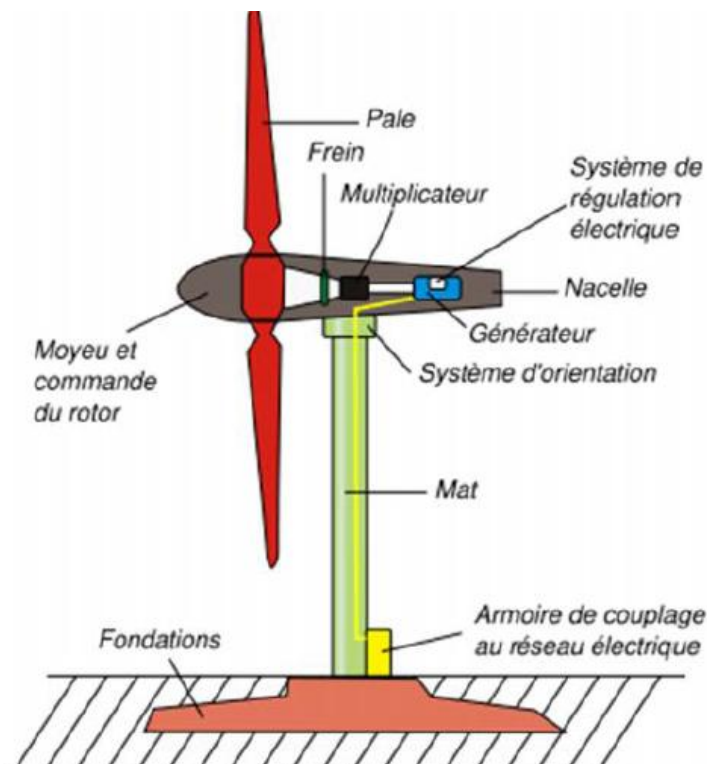


Figure I.2. Constitution d'une éolienne.

- **Un mât** permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.
- **Une hélice** de trois pales généralement, montée sur l'axe horizontal de l'éolienne

- Une nacelle montée au sommet du mât et constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie.
- Une cabine située au pied de l'éolienne et qui permet de se connecter au réseau domestique dans le cas d'une utilisation individuelle.

I.2.3. Types d'Eoliennes

Il existe deux familles d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

a). Eoliennes à Axe Vertical

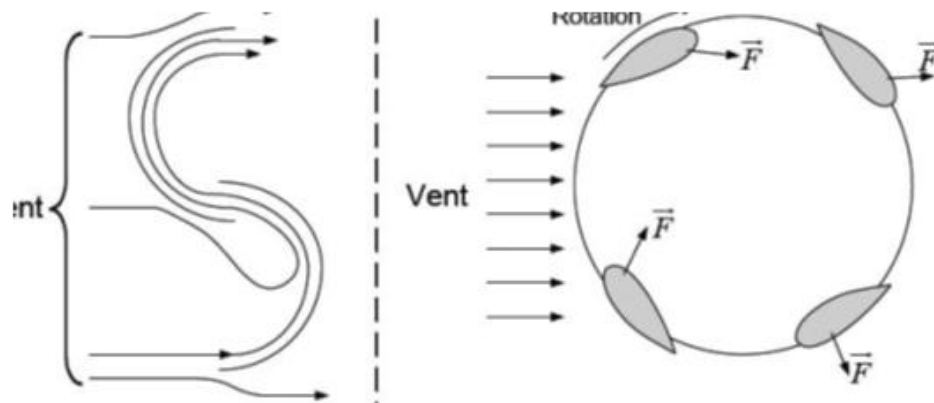


Figure 1.3. Éolienne à Axe Vertical

Ce type d'éolienne peut utiliser deux principes : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence [6].

1) Rotor de SAVONIUS (La traînée différentielle) :

Le principe de mise en mouvement de ce type d'éolienne est identique à un anémomètre. Les forces exercées par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, nous obtenons ainsi un couple moteur.

2) Rotor de DARRIEUS (La variation cyclique d'incidence) :

Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables générant ainsi un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français DARRIEUS. Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique, etc.

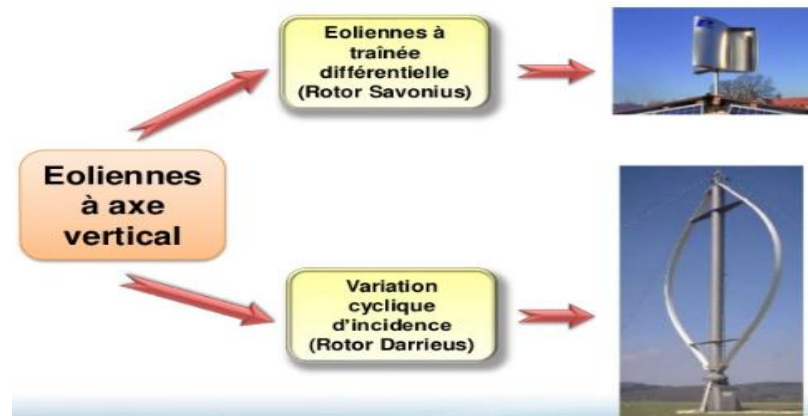


Figure 1.4. les deux principes de Éolienne à Axe Vertical

b). Eoliennes à Axe Horizontal

Il existe deux familles d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les éoliennes à marche rapide (Figure. I.2).



Figure I.5. Conversion de l'énergie cinétique du vent

1) Les éoliennes à marche lente.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. De nombreuses éoliennes de ce type ont été construites aux Etats Unis dès 1870. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée[7] (Fig. I.2).

2) Les éoliennes à marche rapide.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation [1]. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs MW. Leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement en dessous

d'une vitesse de vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques et ont un rendement énergétique un peu plus faible. Elles sont visuellement moins esthétiques. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants optent pour des aérogénérateurs tripales.

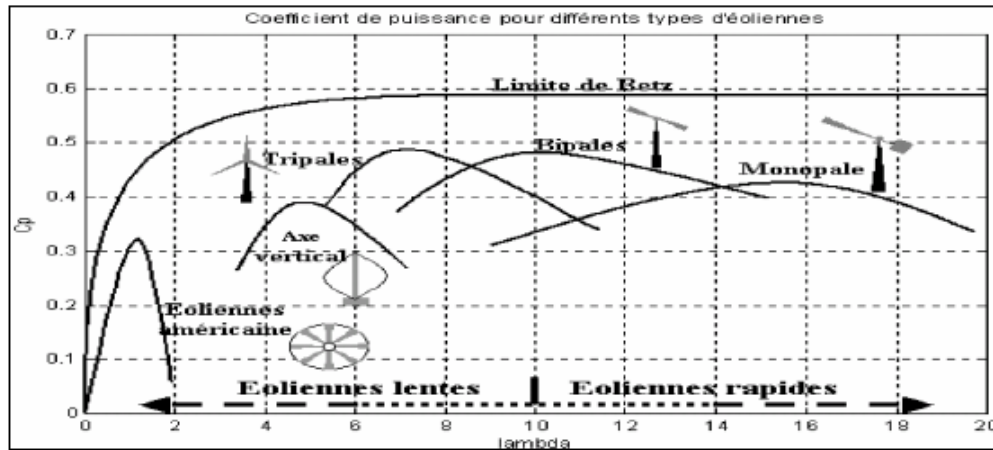


Fig. I.6. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

I.2.4. Impact sur l'environnement

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit pas, de déchet. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication. Par contre, elle a un impact sur l'avifaune, le bruit et le paysage. L'éolien a quelques inconvénients

L'impact visuel qui reste un thème subjectif. Selon les enquêtes réalisées en Europe, la perception d'une éolienne n'est pas négative et varie selon le type de paysage initial, de la disposition (la disposition en ligne est préférable), de la quantité, de la taille des machines, du nombre de pales. Dans tous les cas une étude paysagère est indispensable lors du montage du projet. [8]

Le bruit d'une éolienne a une double source : la première, d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle (génératrice, etc.) et la seconde, d'origine aérodynamique, liée à la rotation des pales. Le bruit mécanique a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. Les mesures montrent que le bruit d'une éolienne est très limité, Dans la plupart des cas, le bruit du vent couvre celui des éoliennes.

L'impact sur les oiseaux. Les éoliennes peuvent avoir un effet négatif de deux façons :

- Des collisions au niveau du mât, des pales, des câbles électriques,
- Des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

Il faut cependant noter que les dégâts provoqués par les éoliennes sont insignifiants comparés aux routes ou aux lignes à haute tension.

I.2.5. Avantages de l'éolien [6]

Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.

- Une énergie renouvelable: Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Une énergie sans risque: Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. C'est l'énergie la moins chère parmi toutes les autres énergies renouvelables.

I.3. Variations saisonnières de la productivité des éoliennes [6]

Les vents d'hivers sont en général plus forts que ceux d'été. Contrairement au cycle de production de l'énergie solaire, le cycle de production d'énergie du vent correspond à la consommation électrique.

En effet, la consommation électrique est plus élevée l'hiver que l'été à cause du chauffage. Ainsi la combinaison du chauffage électrique avec l'énergie éolienne est d'autant plus efficace car le refroidissement d'une maison augmente avec le vent. Les installations éoliennes sur un vaste territoire sont favorables à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montrent des études sur le foisonnement éolien.

Cependant le chauffage par électricité n'est pas forcément à préconiser car une centrale électrique (au combustible) perd en moyenne 1.5 unités de chaleur pour chaque unité de chaleur utilisable par les clients.

I.4. Zone de fonctionnement

La courbe de puissance détermine la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses du vent. Généralement, fournie par les constructeurs, elle permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne en fonction de la vitesse du vent[9]

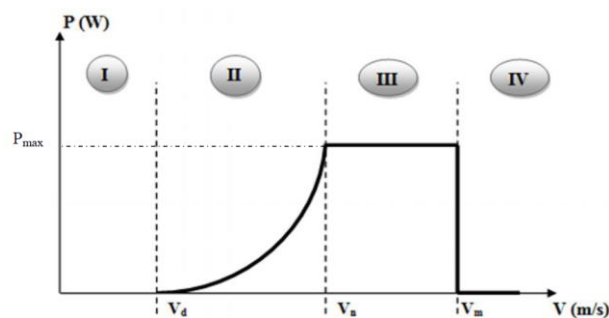


Figure 1.7. Caractéristique Puissance-vitesse du vent

V_d : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

V_n : Vitesse du vent correspondant à la vitesse nominale de la génératrice.

V_m : Vitesse du vent correspondant à la vitesse de décrochage, pour laquelle l'éolienne doit être déconnectée, pour des raisons de sécurité mécanique.

Zone I : La vitesse du vent dans cette zone est inférieure à la vitesse de démarrage V_d , la puissance à extraire est trop faible et n'arrive même pas à compenser les pertes occasionnées par la machine dans ce cas l'éolienne ne fonctionne pas.

Zone II : Un maximum de puissance est extrait pour chaque vitesse de vent et ça en enclenchement d'un algorithme de commande d'extraction de puissance maximum.

Zone III : La puissance est maintenue à sa valeur nominal et le fonctionnement est à charge partielle.

Zone IV : Afin de protéger l'installation, un dispositif d'arrêt d'urgence est actionné et cela en mettant l'éolienne en drapeau.

I.5. La rentabilité d'une éolienne

Les facteurs suivants déterminent le coût de l'énergie éolienne :

- Le coût initial de l'éolienne et de son installation;
- Le taux d'intérêt à payer sur l'investissement;
- La quantité d'énergie produite;

Toute éolienne installée dans un endroit fortement exposé au vent produit de l'électricité moins coûteuse que la même éolienne installée dans un endroit moins venté. Par conséquent, il est important d'évaluer la vitesse du vent à l'endroit envisagé pour l'installation des éoliennes.

Dans les régions éloignées, la production d'électricité à l'aide de génératrices diesel est variable par conséquent, dans les endroits exposés à un bon vent, l'électricité produite est nettement rentable. Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payé par les consommateurs, les coûts de l'énergie éolienne sont presque concurrentiels. Cependant, sur les sites moins ventés le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

Pour pouvoir comparer les sources d'énergie entre elles, la notion de coût global social a été introduit (coûts de dépollution ou de retraitement, coûts de recherche et de développement, coûts stratégiques d'approvisionnement). En coût global, l'énergie éolienne est une des énergies les moins coûteuses. [4]

I.6. Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes à vitesse variable

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation.

I.6.1. Système utilisant une génératrice synchrone

a) Exploitation dans l'éolien

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statoriques. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [10], [6]. L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares); Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur. Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement. [11]

b) Avantages et inconvénients :

1. Avantages

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Absence de boîte de vitesse.
- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.

2. Inconvénients

- Machine spécifique
- Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale
- Grand diamètre de la machine

I.6.2. Système utilisant une génératrice asynchrone

a) Exploitation dans l'éolien :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la

génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu [7].

b) Avantages et inconvénients:

Avantage

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens

Inconvénient

- Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.

I.6.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

a) Principe de la machine asynchrone à double alimentation

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotoriques La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir la tension du bus constante.

b) Avantages et inconvénients

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotoriques est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique.

Avantages

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens;
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale;
- Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).

Inconvénients

- Maintenance du multiplicateur;
- Commande complexe;
- Oscillations mécaniques.

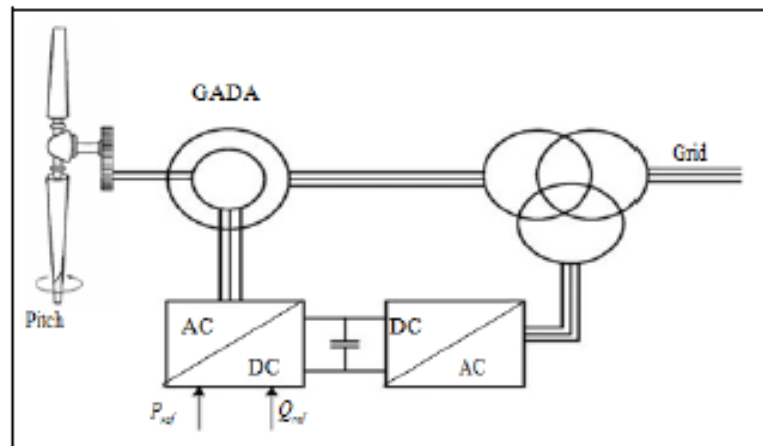


Figure. I.8. Eolienne utilisant la GADA.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

Chapitre II

*La Modélisation de la chaîne de
conversion D'éolienne*

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées.

II.2 Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne basée sur une MADA

II.2.1.Efficacités énergétique d'un capteur éolien

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace à la vitesse v pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée serait [12]:

$$P_e = 1/2 \rho A v^3 \quad (II.1)$$

Avec ρ masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$ au niveau de la mer). Mais en réalité une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e , par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation :

$$C_p = P/P_e ; C_p < 1 \quad (II.2)$$

Cette relation constitue la formule de Betz [13], [14]. Il s'en suit le coefficient de la puissance :

$$C_{pmax} = P_{max}/P_e = 16/27 = 0.593 \quad (II.3)$$

L'efficacité de la captation d'énergie, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion, est inférieure à cette limite (limite de Betz).

II.2.2.Modèle de la turbine éolienne

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure II.2.

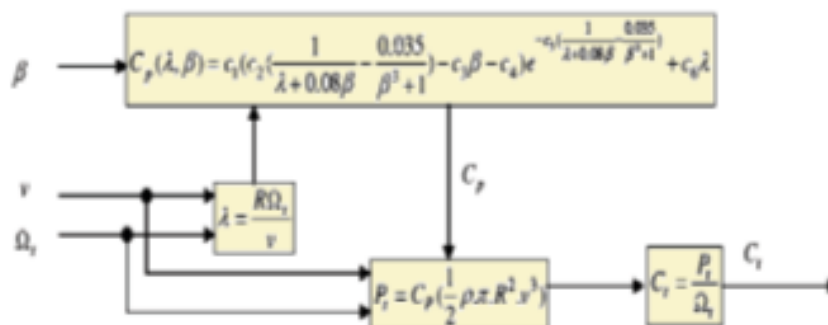


Figure II.1. Modèle de la turbine éolienne.

La turbine éolienne est caractérisée par les courbes du coefficient de puissance C_p . On introduit une variable sans dimension appelée la vitesse spécifique (2.7) pour caractériser les performances aérodynamiques d'une éolienne :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

Ω est la vitesse angulaire de rotation de la turbine

R rayon de la turbine.

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante :

$$P_m = 1/2 C_p(\lambda, \beta) * \rho * \pi * R^2 * V^3 \quad (\text{II.5})$$

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent [3]. On représente ce pourcentage par $C_p(\beta, \lambda)$ qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle de l'orientation de pale β .

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [4]. Il peut être décrit comme suivant [10],[14] :

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.6})$$

La figure II.2 représente la variation de ce coefficient (C_p) en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β .

D'après la figure II.2, on trouve que la valeur maximal de C_p est $C_{p_max} = 0.5$, qui correspond à l'angle de l'orientation de pale $\beta = 2^\circ$ et la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{optim} = 9.2$ [11], [13]. Pour extraire le maximum de la puissance générée, nous devons fixer le ratio de vitesse λ_{optim} et le coefficient de puissance maximal C_{p_max}

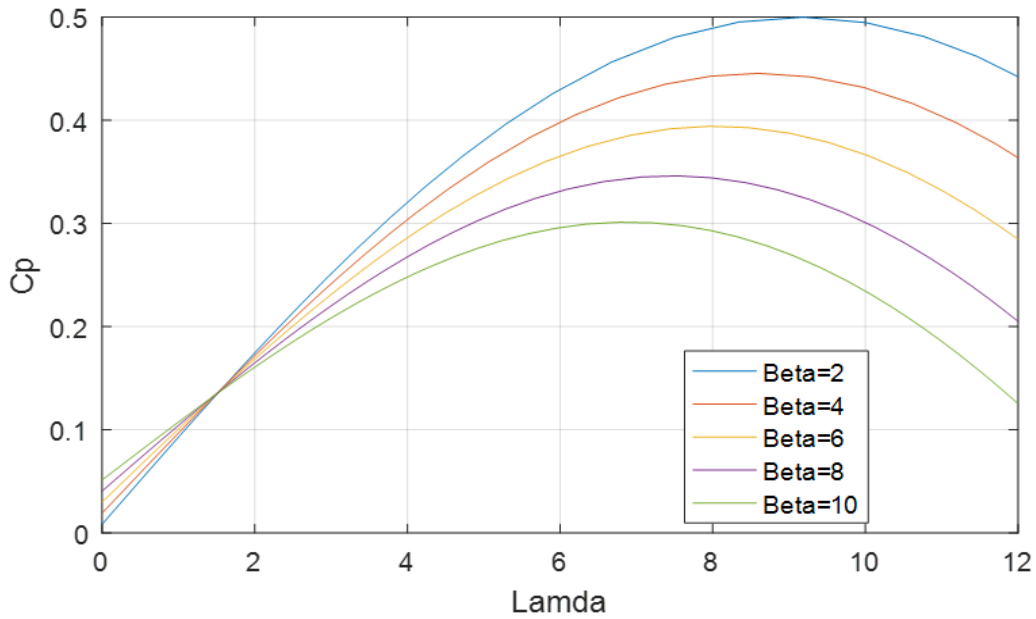


Figure II.2. Coefficients de puissance en fonction de Lambda et Beta.

Ces caractéristiques statiques sont les plus importantes d'une éolienne, nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne. Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante : [13]

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{II.7})$$

II.2.3. Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur : [14]

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{II.8})$$

Où, G est le rapport de multiplication (-) et C_{mec} est le couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur selon l'expression suivante

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.9})$$

Où, Ω_{mec} est la vitesse mécanique du générateur (rad/s).

II.2.4. Modèle de l'Arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f\Omega_{mec} \quad (II.10)$$

Où, le couple total de l'éolienne C_t est exprimé par la relation (1.17).

$$C_t = C_{mec} + C_e \quad (II.11)$$

C_{em} : couple électromagnétique du générateur en $(N.m)$;

J : inertie totale des parties tournantes $(Kg.m^2)$;

f : coefficient de frottements visqueux.

Le schéma de la figure 11 , représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.

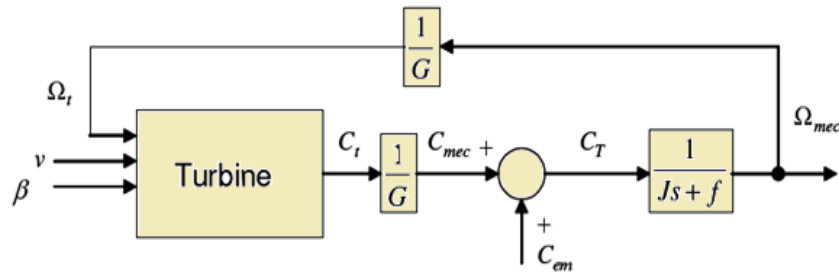


Figure II.3. Modèle de l'arbre et de la turbine.

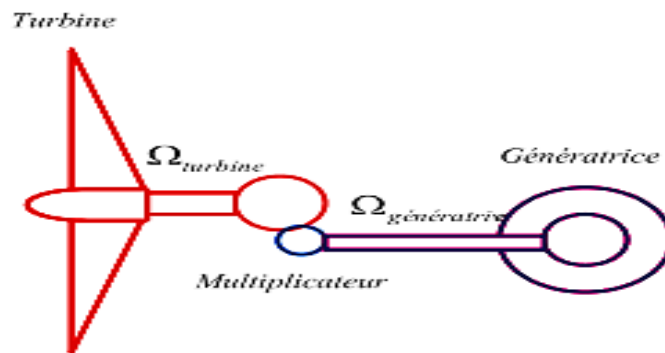


Figure II.4. Schéma de principe du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice

II.2.5. Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée avec un tel système les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch control). En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. [15]

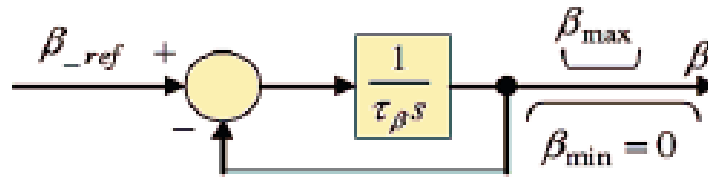


Figure II.5. Modèle et commande de système de calage de pales.

II. 3.Stratégie de Commande de la Turbine Eolienne

II.3.1.Caractéristique Puissance -Vitesse d'Eoliennes de Grande Puissance

La caractéristique Puissance-Vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones [16], comme le montre la figure II.6.

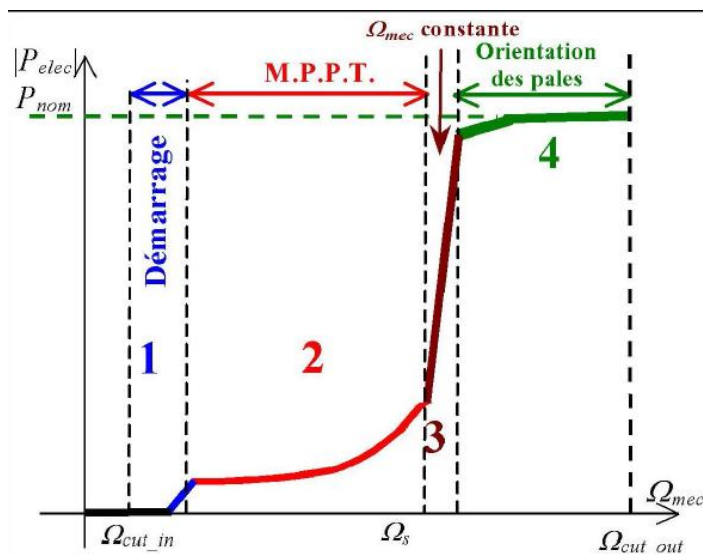


Figure II.6. Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande puissance [16]

Les quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées [16] :

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut_in}
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse du générateur atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta = 2^\circ$. Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.
- **Zone 3** : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance du générateur atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom}

➤ **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : *pitch control*. Au-delà de la vitesse Ω_{cut_out} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

II.4. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [17]. Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles [6], [6]. La figure II.8 représente l'enroulement triphasé de la MADA.

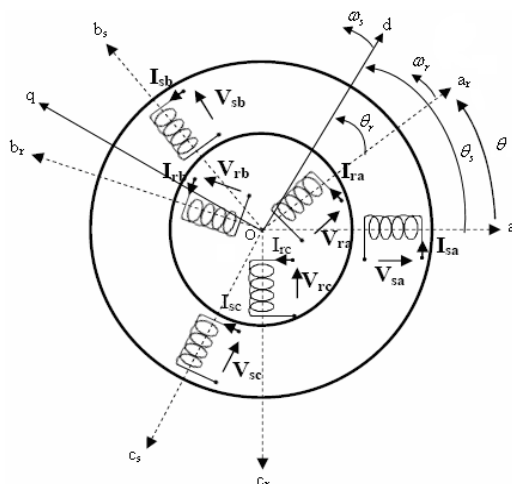


Figure II.7. Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

a_s, b_s, c_s : correspondent aux trois phases du stator.

a_r, b_r, c_r : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes O_d et O_q , sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.

" $O_{as}, O_d = \theta_s$ ", " $O_{ar}, O_d = \theta_r$ ", " $O_{as}, O_{ar} = \theta_s - \theta_r = \theta$ ".

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_r}{dt} - \frac{\theta_s}{dt}$$

Avec : $\omega = P \Omega$

Ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P est le nombre de paires de pôles.

II.4.1. Hypothèses et Conventions [18]

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Nous supposons que la machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.
- Nous supposons que l'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante.
- Nous négligeons la saturation du circuit magnétique ainsi que son hystérésis, ce qui permet de définir des inductances constantes.
- Nous supposons que l'induction dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale.
- Nous supposons que la composante homopolaire du courant est nulle.
- Nous tenons compte des fondamentaux des grandeurs alternatives seulement.
- Nous ne tenons compte que des pertes Joules dans la machine. Nous négligeons les pertes fer.

II.4.2. Equations de la MADA

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représenté schématiquement par la figure II.7 et dont les phases sont repères respectivement a_s, b_s, c_s et a_r, b_r, c_r et l'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases a_r et a_s choisis comme axes de référence [Laa 08].

II.4.2.1 Equations Electriques

La MADA est représentée par les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$[\mathbf{V}_{as} \mathbf{V}_{bs} \mathbf{V}_{cs}]^T, [\mathbf{V}_{ar} \mathbf{V}_{br} \mathbf{V}_{cr}]^T$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

$[\mathbf{i}_{as} \mathbf{i}_{bs} \mathbf{i}_{cs}]^T, [\mathbf{i}_{ar} \mathbf{i}_{br} \mathbf{i}_{cr}]^T$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

$[\Phi_{as} \Phi_{bs} \Phi_{cs}]^T, [\Phi_{ar} \Phi_{br} \Phi_{cr}]^T$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

$\mathbf{R}_s, \mathbf{R}_r$: sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

II.4.2.2. Equations Magnétiques

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor [19]:

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).

Il est clair que l'écriture de $[V_{as}]$ et $[V_{ar}]$ en fonction des courants conduit à un système d'équations dont les coefficients sont variables dans le temps; d'où la complexité de leur résolution. Pour résoudre ce problème, on a recourt à la transformation de Park qui s'impose alors comme alternative dans le but d'obtenir un modèle équivalent plus simple à manipuler

II.4.2.3 Application de la Transformation de Park à la MADA

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs d_s, q_s, d_r, q_r dont les axes magnétiques sont liés aux axes $(d-q)$ conformément à la figure II.8 [Bek 10_1]. On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes $(d-q)$ lié au champ tournant ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire :

- ❖ Direct selon l'axe (d).
- ❖ Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- ❖ Homopolaire (o).

Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

$$[I_{dqo}] = [P][I_{abc}] \quad (\text{II.17})$$

et

$$[I_{abc}] = [P]^{-1}[I_{dqo}] \quad (\text{II.18})$$

celle des tension :

$$[V_{dqo}] = [P][V_{abc}] \quad (\text{II.19})$$

et

$$[V_{abc}] = [P]^{-1}[V_{dqo}] \quad (\text{II.20})$$

la transformation des flux :

$$[\Phi_{dqo}] = [P][\Phi_{abc}] \quad (\text{II.21})$$

et

$$[\Phi_{abc}] = [P]^{-1}[\Phi_{dqo}] \quad (\text{II.22})$$

ou:

$$[V_{dqo}] = [V_{dqo} \quad V_{dqo} \quad V_{dqo}]^T \quad (\text{II.23})$$

$$[I_{dqo}] = [I_{dqo} \quad I_{dqo} \quad I_{dqo}]^T \quad (\text{II.24})$$

$$[\Phi_{dqo}] = [\Phi_{dqo} \quad \Phi_{dqo} \quad \Phi_{dqo}]^T \quad (\text{II.25})$$

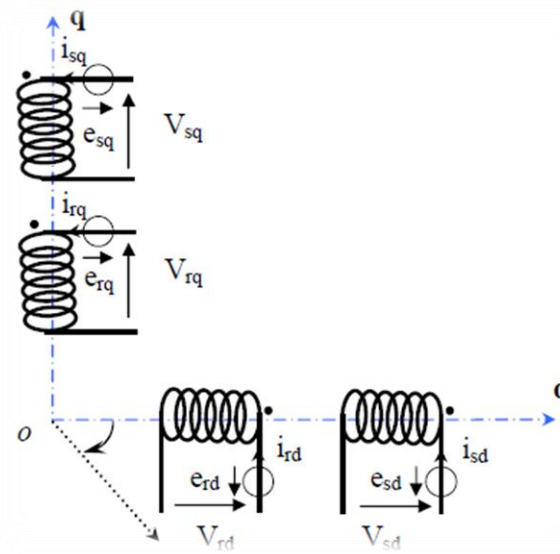


Figure II.8 Modèle de la machine après transformation de Park

Avec $[P]$ la matrice de transformation de Park qui s'écrit par [17] :

$$[P] = 2\sqrt{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

et $[P]^{-1}$. la matrice de transformation de Park inverse qui s'écrit par :

$$, [P]^{-1} = 2\sqrt{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

II.4.2.4 Choix du Référentiel [6]

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [17].

Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.4.2.5. Référentiel Lié au Stator

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{cor}=0$). Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

II.4.2.6. Référentiel Lié au Rotor

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc $(\omega_{coor} = \omega = P\Omega)$. L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

II.4.2.7. Référentiel Lié au Champ Tournant :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où $(\omega_{coor} = \omega_s)$. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

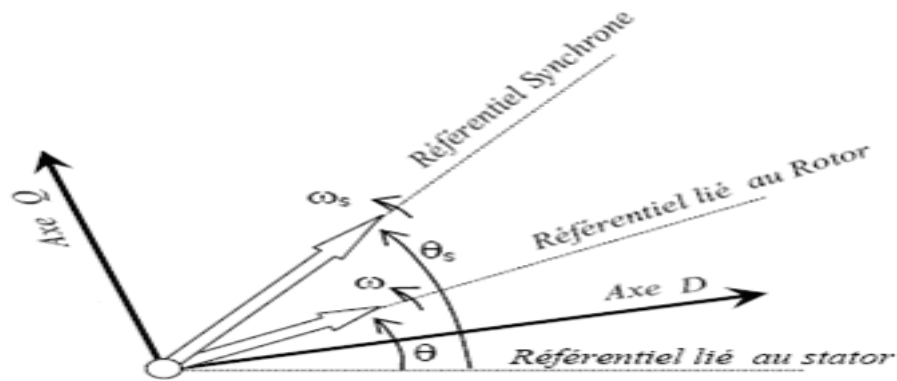


Figure II.9 Choix du référentiel [5]

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champ tournant $(\omega_{coor} = \omega_s)$ pour la modélisation et la commande de la MADA.

Alors, le modèle électrique général de la machine asynchrone obtenue en utilisant la transformation de Park est donné par les équations suivantes [19], [11], [13]:

Les tensions statoriques et rotoriques:

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

Les flux statoriques et rotorique :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases}$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$\begin{cases} P_{sd} = V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_{sd} = V_{sq} \cdot i_{sd} - V_{sd} \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (II.28)$$

$$\begin{cases} P_{rd} = V_{rd} \cdot i_{rd} + V_{rq} \cdot i_{rq} \\ Q_{rd} = V_{rq} \cdot i_{rd} - V_{rd} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (II.29)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = P \frac{M}{L_s} (\Phi_{sd} i_{rq} - \Phi_{sq} i_{rd}) \quad (II.30)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_R = \omega_S - P\Omega \quad (II.31)$$

Où ω_S représente la pulsation des courants statoriques en rad/s.

Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_S et ω_R .

$$\begin{cases} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt \end{cases} \quad (II.32)$$

Le schéma bloc du GADA sous Matlab/Simulink est représenté par la figure II.10

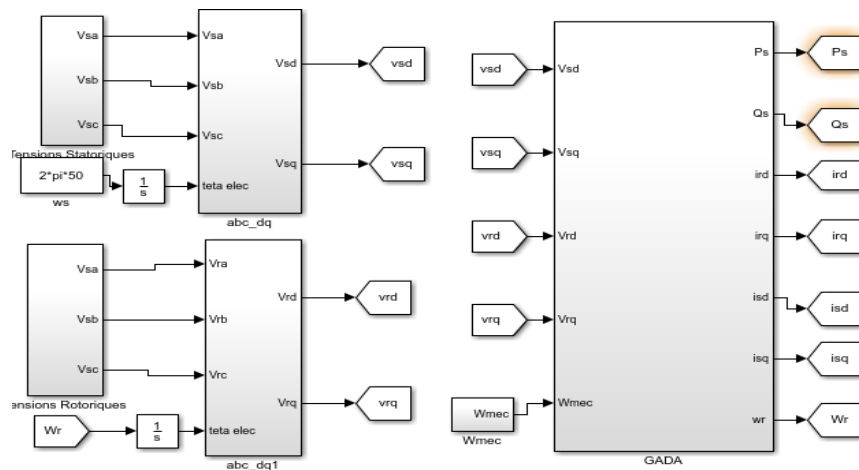


Figure II.10 Schéma bloc du GADA sous Matlab/Simulink

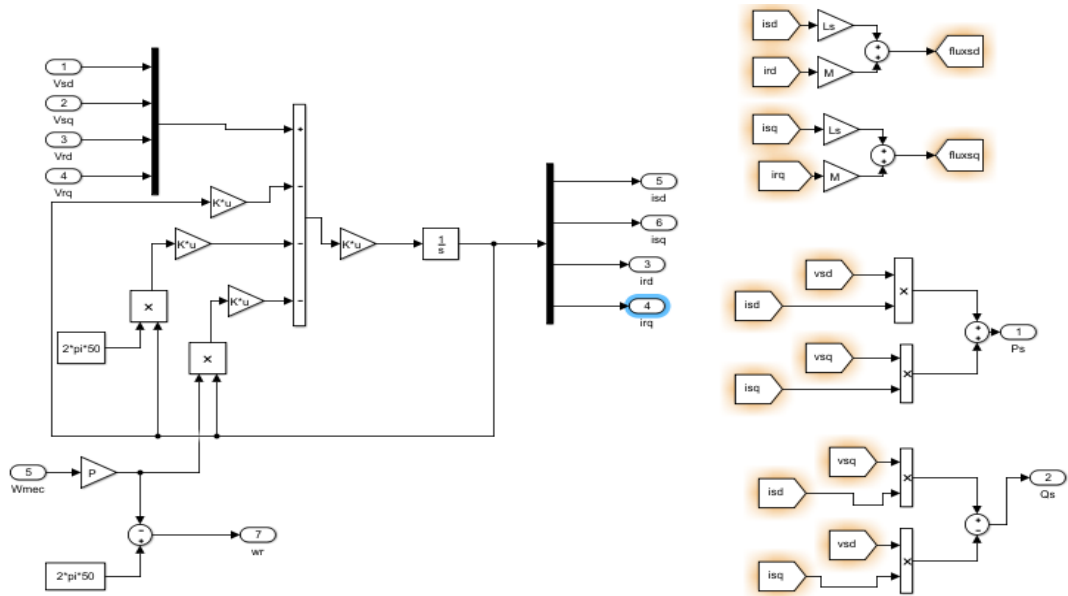


Figure II.11 Le schéma bloc interne (Subsystem) du GADA sous Matlab/Simulink

Où les Matrices **A**, **B**, **C**, **D** et **K** sont :

$$\mathbf{A} = [R_s \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ R_s \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ R_r \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ R_r];$$

$$\mathbf{B} = [L_s \ 0 \ M \ 0; 0 \ L_s \ 0 \ M; M \ 0 \ L_r \ 0; 0 \ M \ 0 \ L_r];$$

$$\mathbf{K} = \text{inv}(\mathbf{B}); \quad (\text{inv} : \text{inverse}).$$

$$\mathbf{C} = [0 \ -L_s \ 0 \ -M; L_s \ 0 \ M \ 0; 0 \ -M \ 0 \ -L_r; M \ 0 \ L_r \ 0];$$

$$\mathbf{D} = [0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ M \ 0 \ L_r; -M \ 0 \ -L_r \ 0];$$

II.5. Données utilisées

:

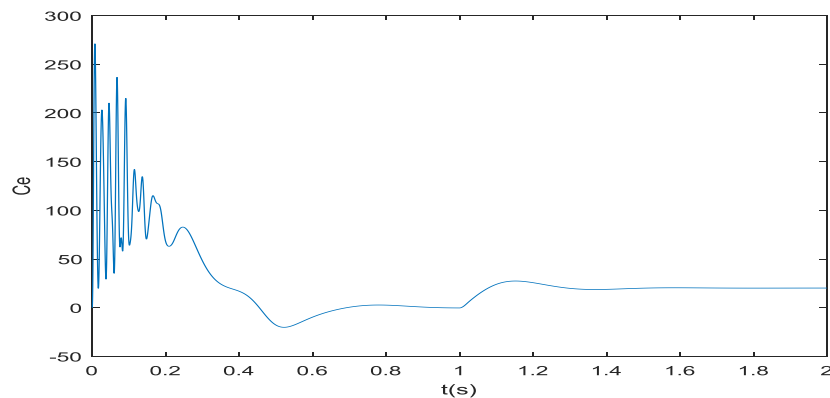


Figure II.12. Le couple électromagnétique C_e en fonction de temps

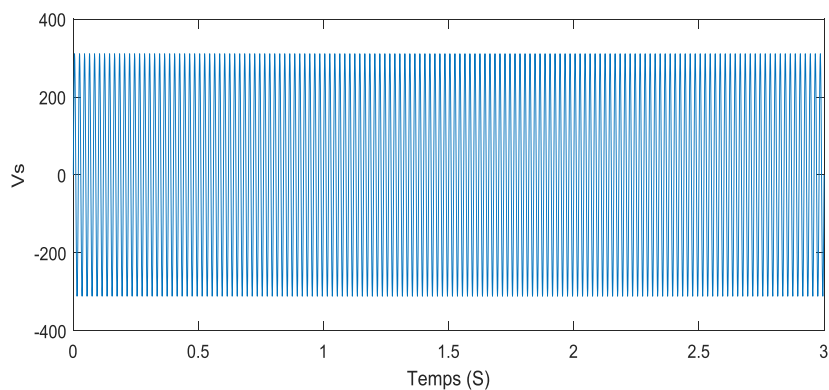


Figure.II.13. tension statoriques en fonction de temps

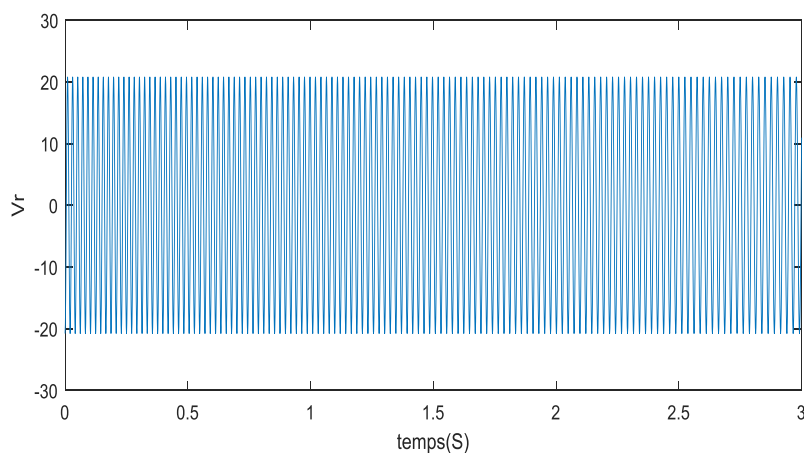


Figure.II.14.tension rotorique en fonction de temps

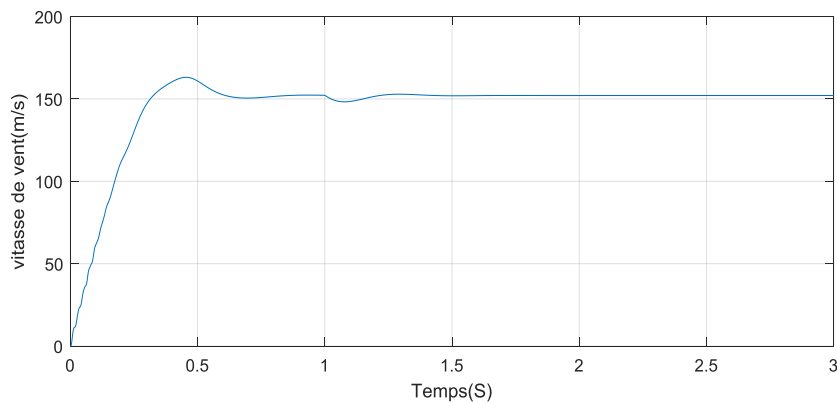


Figure.II.15. profile de vent en fonction de temps

Résultat de simulation à vitesse variable par SMC :

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des puissances référentielles actives et réactive statoriques. Les mêmes paramètres qui nous utilisent à la simulation à la vitesse constante pour la MADA.

La vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse variable proche de la vitesse de vent $V(h)$ (II.4).

II.6.Conclusion

On a détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne tenant compte des caractéristiques du profil. Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce model permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations.

Chapitre III

*La commande vectorielle direct et indirect
des Puissances Active et Réactive du
Système de Conversion Eolienne basé sur
une GADA*

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, on a appliqué la commande vectorielle de la puissance active et réactive statorique du générateur asynchrone à double alimentation (GADA) qui est entraîné par une turbine éolienne commandée par la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de la puissance produite par ce générateur. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées. Afin d'examiner la robustesse de cette commande à vitesse variable, on a soumis à la turbine une vitesse du vent variable en échelons et une autre variable aléatoire.

III.2. Commande du Système Global

Le système global étudié dans cette partie, où le stator GADA est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à travers un onduleur de tension à deux niveaux, est représenté sur la figure III.1.. La tension de cet onduleur est contrôlée par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

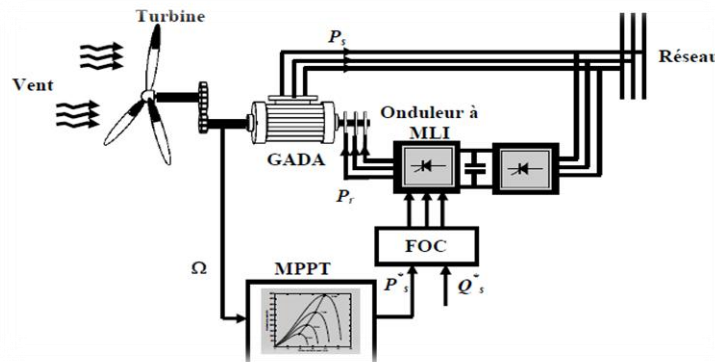


Figure III.1. Structure du système global

III.1. Commande de la Turbine avec la Stratégie MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) [20], [21], [16], et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système. Nous présenterons dans cette section la stratégie

de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent. Pour extraire la puissance maximum générée, nous devons fixer le ratio de vitesse optimal

λ_{optim} et le coefficient de puissance maximum C_{p_max} , la mesure de la vitesse du vent est difficile, une estimation de sa valeur pouvons être obtenus [11]:

$$V_{est} = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{optim}}$$

La puissance aérodynamique de référence est donc donnée par :

$$P_{aer-ref} = \frac{1}{2} C_{p-max} \cdot \rho \cdot S_w \cdot V_{est}^3$$

ou:

$$S_w = \pi R^2$$

Le couple électromagnétique de référence peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em-ref} = \frac{P_{aer-ref}}{\Omega_f} = \frac{1}{2} C_{p-max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \frac{R^2 \Omega_f^2}{\lambda_{optim}^3}$$

La figure III.2. résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent [13].

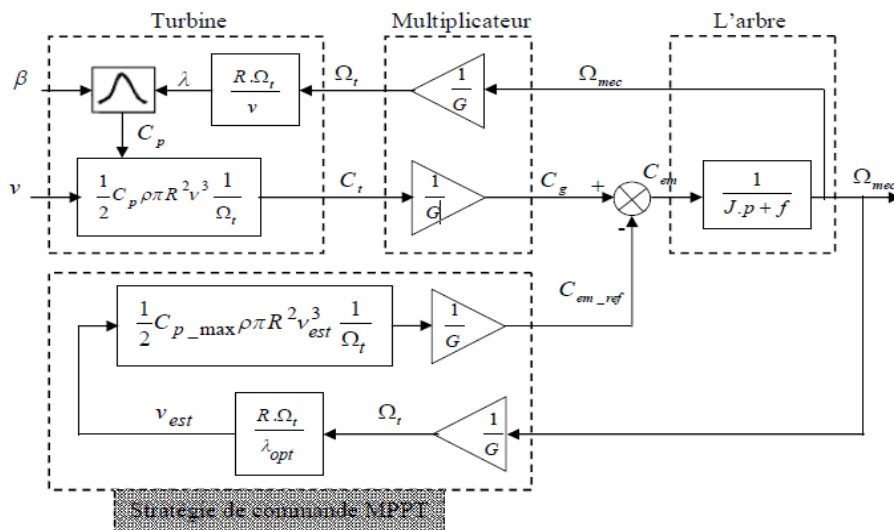


Figure III.2. Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

La figure III.3. représente le schéma l'équivalent de la figure III.2. sous Matlab/Simulink.

Conversion Eolienne basé sur une GADA

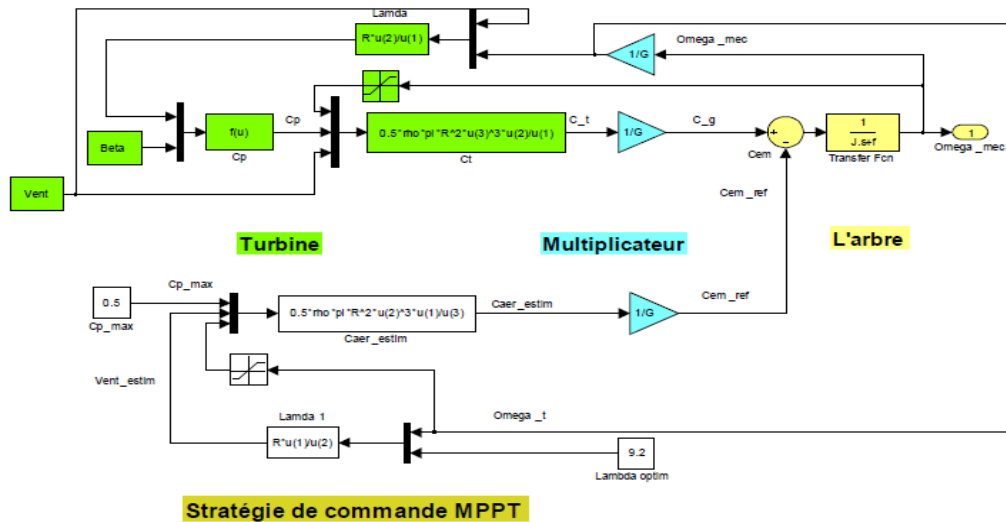


Figure III.3. Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent sous Matlab/Simulink

III.2.2 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive :

En vue de la commande vectorielle de ce générateur, il convient de choisir un référentiel lié au champ tournant, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz. Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique, dont l'axe *d* est aligné avec le vecteur de flux statorique, comme le montre la figure III.4.

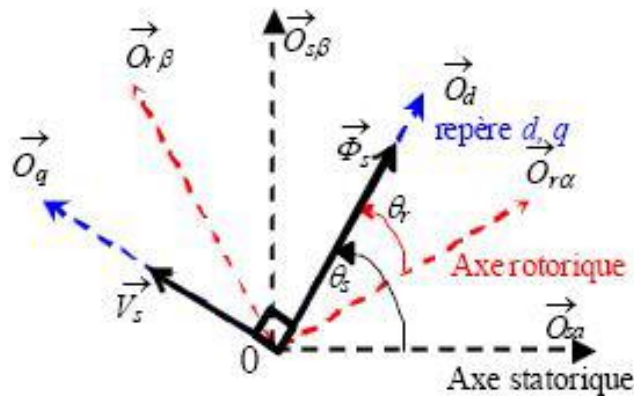


Figure III.4. Orientation du repère de Park

En adoptant l'hypothèse d'une résistance statorique R_s négligeable et que le flux statorique est constant et orienté selon l'axe *d*, on déduit :

$$\Phi_{sd} = \Phi_s = L_s i_{sd} + M i_{rd} \tag{III.1}$$

$$\Phi_{sq} = 0 = L_s i_{sq} + M i_{rq} \tag{III.2}$$

$$V_{sd} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$V_{sq} = V_s \approx \omega_s \Phi_s \quad (\text{III.4})$$

Les puissances active et réactive statoriques peuvent être écrites selon les courants rotoriques comme suit:

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \quad (\text{III.5})$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \quad (\text{III.6})$$

Si on considère l'inductance mutuelle M constante, on remarque que l'équation III.5 fait apparaître que la puissance active statorique P_s est directement proportionnelle au courant rotorique quadrature i_{rq} . De plus, la puissance réactive statorique Q_s est proportionnelle au courant rotorique direct i_{rd} , à une constante près $\frac{V_r^2}{\omega_s L_s}$ [20].

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants rotoriques [21]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{coefficient de dispersion.}$$

$$g = \frac{\omega_s \omega}{\omega_s} : \text{coefficient de glissement.}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré dans la figure III.5.

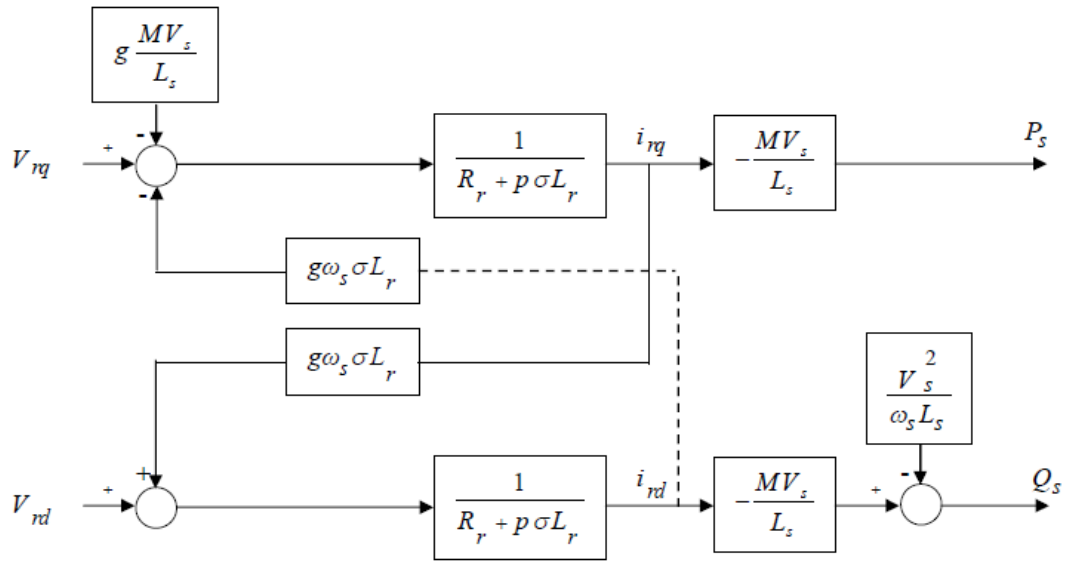


Figure III.5. Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

III.2.2.1 Commande Directe des Puissances Active et Réactive

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active P_s et la boucle de régulation de la puissance réactive Q_s .

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure III.6 [20], [18], [19].

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure III.6, [17].

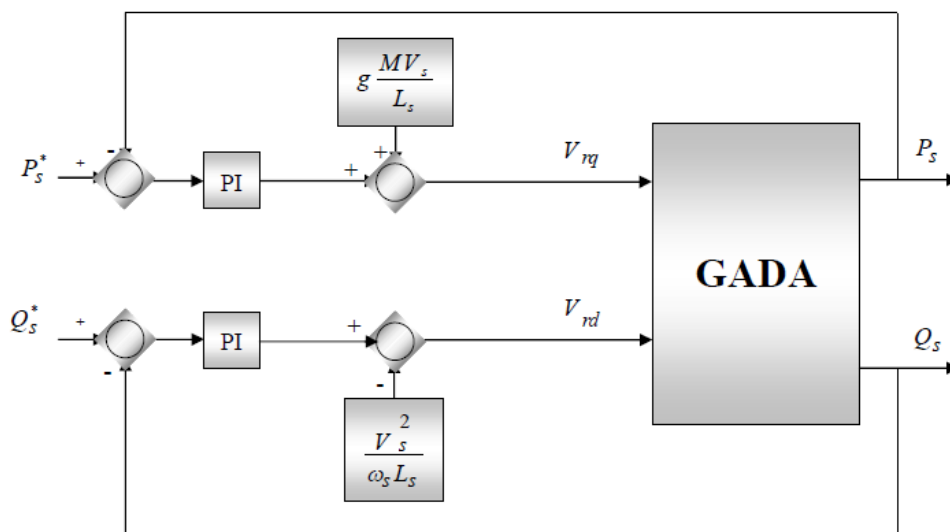


Figure III.6. Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA

II.2.2.2 Dimensionnement du Régulateur PI

Pour s'assurer que les puissances active et réactive du GADA suivent leurs consignes, un régulateur PI est indispensable. Le but d'utilisation du régulateur PI est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes.

Les boucles de régulation des puissances active P_s et réactive Q_s peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure III.7. :utilise

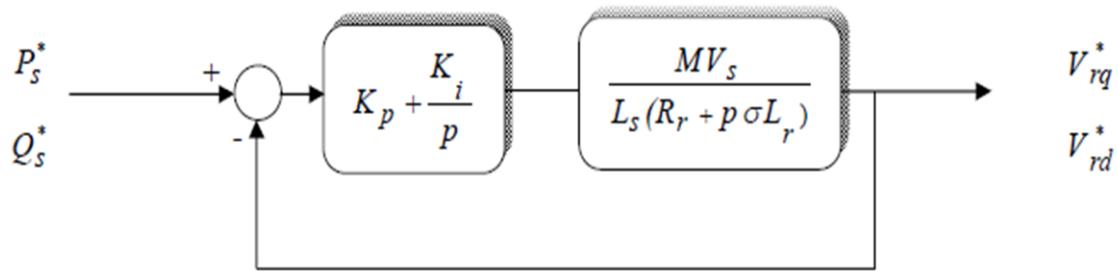


Figure III.7. Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q .

Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \quad (\text{III.8})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure III.7. sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_i}{P} \left(P \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \cdot \frac{MV_s/L_s R_r}{(P\sigma T_r + 1)} \quad (\text{III.9})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (\text{III.10})$$

ou :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i MV_s}{p L_s R_s} \quad (\text{III.11})$$

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

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (\text{III.12})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure III.7 sera :

$$FTBF (p) = \frac{1}{1 + p \frac{L_S R_r}{K_i M V_S}} \quad (III.13)$$

Par analogie l'expression (III.13) par l'expression (III.12), on trouve :

$$\tau = \frac{L_S R_r}{K_i M V_S} \quad (III.14)$$

De l'expression (III.10) et (III.14), on a :

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_S L_r}{\tau M V_S} \\ K_i = \frac{L_S R_r}{\tau M V_S} \end{cases} \quad (III.15)$$

La constante du temps électrique du système dans notre cas est $T_e = \sigma T_r = 0.0067s$, nous avons choisi $\tau = 0.001 s$, pour avoir une dynamique du processus plus rapide. Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour le dimensionnement du régulateur PI.

II.2.2.3 Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive

a). Commande Indirecte sans Boucles des Puissances

Les courants rotoriques i_{rq} et i_{rd} , sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s , doivent poursuivre leurs courants de références[11].

1). Découplage par Compensation

De l'équation (III.16), on peut voir que les équations de tension incluent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q .

Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation :

$$\begin{cases} E_{rd} = g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ E_{rq} = -g \frac{M}{L_s} V_s - g \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (III.16)$$

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont :

$$\begin{cases} V_{rd1} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (III.17)$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA et son équivalent sous Matlab/Simulink sont représentés, respectivement, par les figures III.8. et II.21.

La figure III.8. consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes ; directe et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer au GADA.

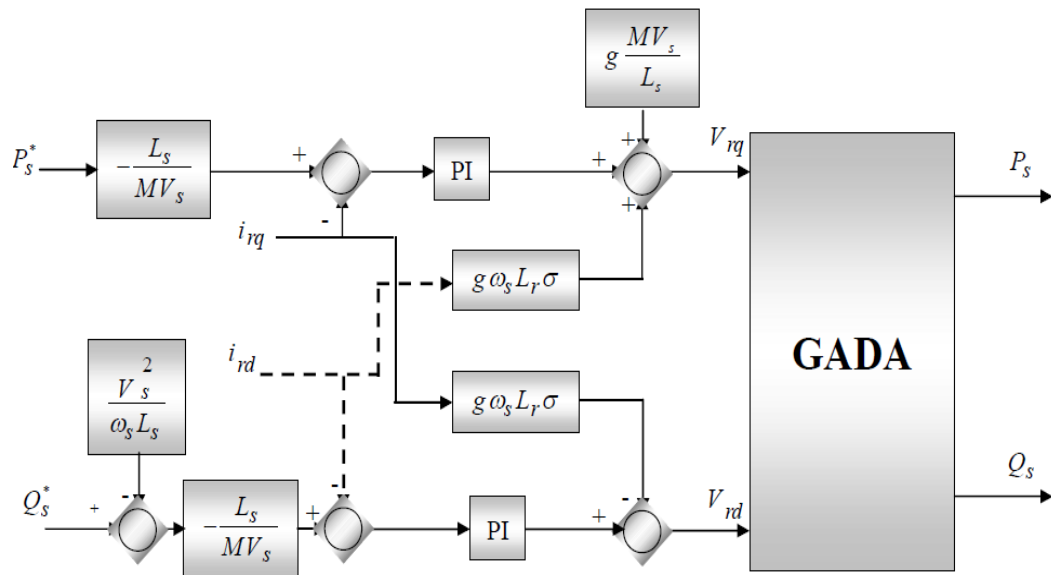


Figure III.8. Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA

Conversion Eolienne basé sur une GADA

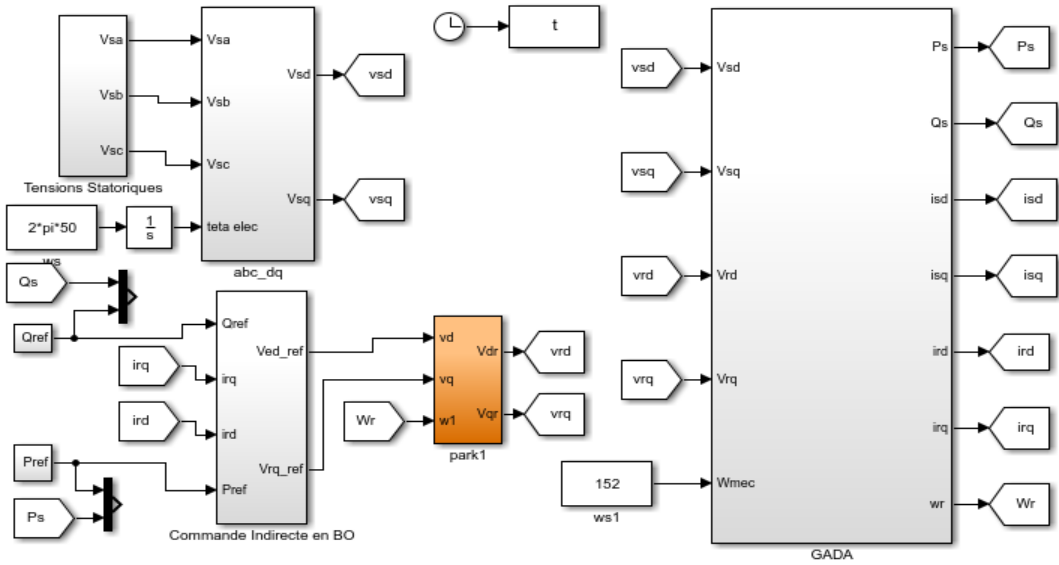


Figure III.9. Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink

2). Dimensionnement du Régulateur PI

Les fonctions de transferts des courants rotorique directe et quadrature sont obtenues à partir de l'équation (III.7) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations

$$\frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \text{ et } \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \tag{III.18}$$

La boucle de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} peut se présenter par le schéma bloc de la figure III.10

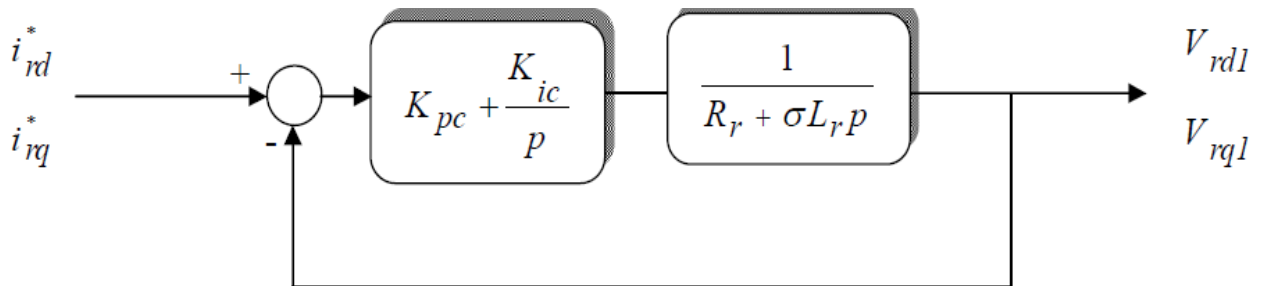


Figure III.10. Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq}

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

$$PI(p) = K_{PC} + \frac{K_{ic}}{p} \tag{III.19}$$

La FTBO de la figure III.10 sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{P} \left(p \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{R_r \left(1 + \frac{L_r}{R_r} p \right)} \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \sigma T_r \quad (\text{II.21})$$

ou:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p} \quad (\text{III.22})$$

Donc la FTBF de la figure III.10 sera :

$$FTBF(p) = \frac{\frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}}{\frac{K_{ic}}{1 + R_r \cdot p}} = \frac{1}{\frac{R_r}{K_{ic}} \cdot p + 1} \quad (\text{III.23})$$

Par analogie de l'expression (III.22) par l'expression (III.12), on trouve :

$$\tau = \frac{R_r}{K_{ic}} \quad (\text{III.24})$$

De l'expression (III.21) et (III.24) on a :

$$\begin{cases} K_{pc} = K_{ic} \sigma T_r = \frac{\sigma T_r}{\tau} \\ K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

b). Commande Indirecte avec Boucles des Puissances :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système [6]. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en

figure III.11 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

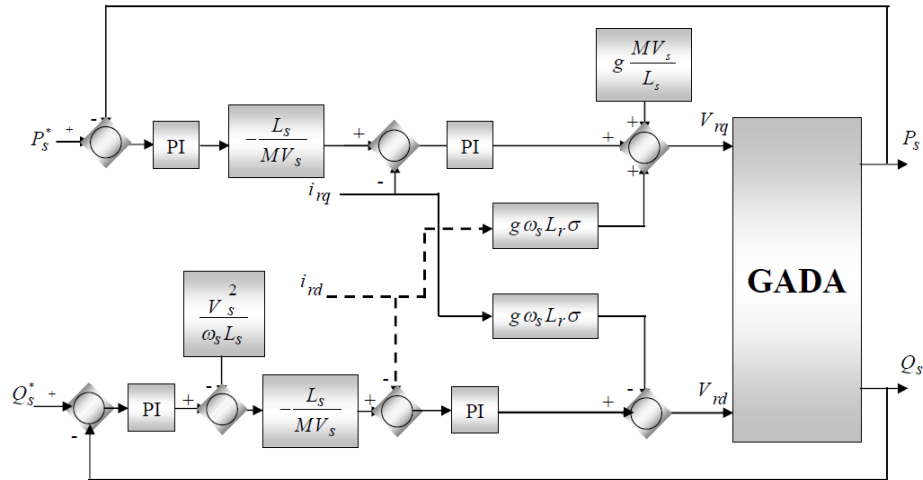


Figure III.11. Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du GADA

III.2.3 Modélisation et Commande de l'Onduleur à MLI

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure II.24, on considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu), supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m égale à $U_{dc}/2$ connectés entre eux par un point noté 0 n [10].

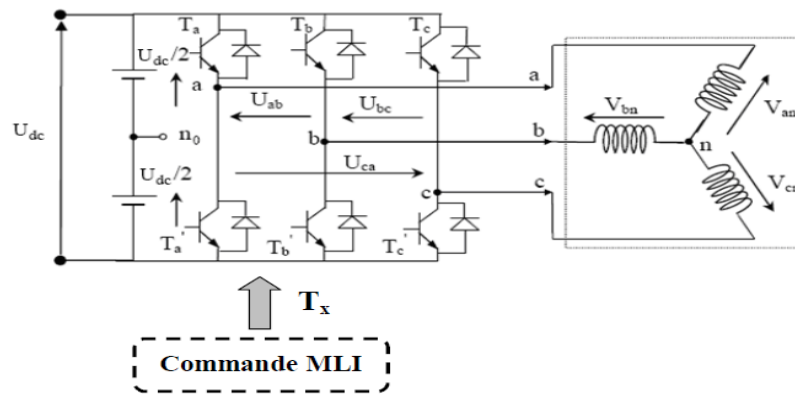


Figure III.12. Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons $V_{an}; V_{bn}$ et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T'_i les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T'_i est ouvert,
- si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T'_i est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

Conversion Eolienne basé sur une GADA

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{III.29})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits $\Leftrightarrow S_i$ ($i = a, b, c$), on a :

$$V_{in_0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (\text{III.30})$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn_0} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn_0} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

En remplaçant l'équation (III.29) dans l'équation (III.28), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} + \frac{2}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{2}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

En remplaçant l'équation (III.31) dans l'équation (III.32), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.2.3.1 Commande par Modulation Sinus-Triangle

La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [20].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{ref\ a} = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{ref\ b} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref\ c} = V_m \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} [-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Où :

$$T_p = \frac{1}{f_p}$$

f : Fréquence de la tension de référence (en Hz),

T_p : Période de la porteuse (en seconde),

V : Amplitude de la tension de référence (en V),

V_{ref} : Tension de référence (en V),

V_m : Valeur crête de l'onde de modulation (en V).

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f),

$$m = \frac{f_p}{f}$$

2. Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm}), $r = \frac{V_m}{V_{pm}}$

f_p : fréquence de la porteuse (en Hz).

Il existe différents types de modulation de largeur d'impulsion [21] :

- MLI naturelle, le calcul des instants de commutation se fait par l'intersection du signal de référence avec un signal triangulaire.
- MLI avec contrôle d'amplitude, l'amplitude crête est constante et pour la valeur efficace du fondamental, on agit sur la largeur des impulsions. Pour maintenir $U/f = Cte$, il faut modifier la valeur des angles d'amorçage de la MLI pour chaque valeur de vitesse. Ceux-ci sont donc précalculés et stockés dans une mémoire.
- MLI vectorielle : les instants de commutation sont calculés en ligne.

En ce qui nous consternons pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI naturelle consistant à comparer le signal de référence (onde modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence à un signal triangulaire (onde porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, figure III.13.

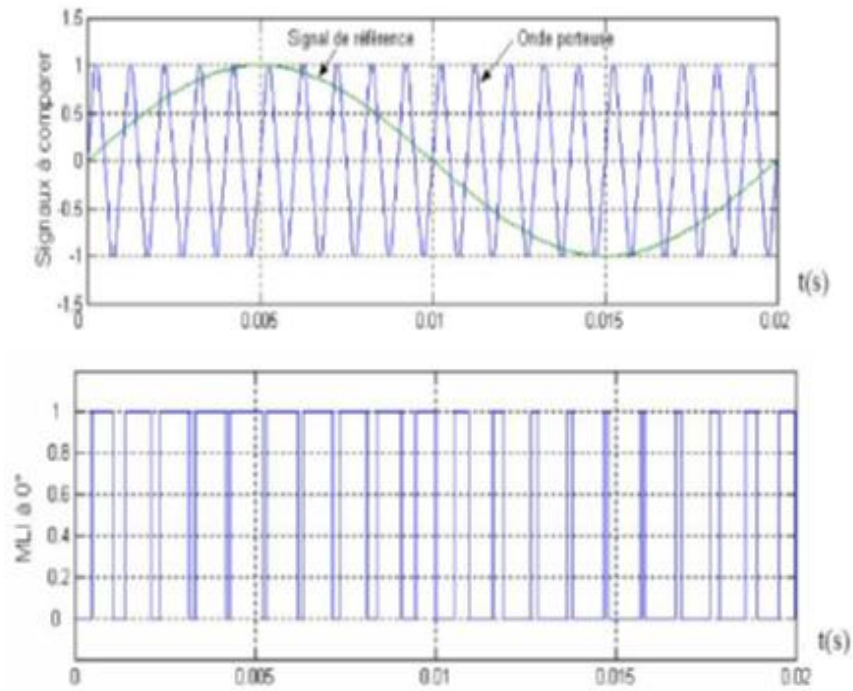


Figure III.13. Schéma de principe de la commande MLI

Le modèle de la commande de la technique MLI sous Matlab/Simulink est représenté par la figure III.14.

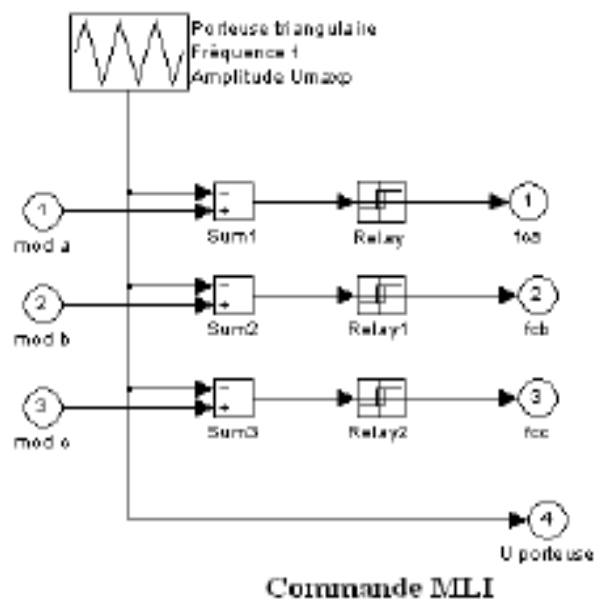


Figure III.14. Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink

III.3. Résultats de Simulation :

On note ici, dans cette partie les résultats de simulation ont été obtenus où la MADA est alimentée par un convertisseur coté rotor à partir d'une source continue.

III.3.1 Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte du GADA à Vitesse constante :

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive, statoriques.

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme qui est égale à 152 rad/s (1452 tr/mn). Les échelons des puissances active et réactive, qui sont appliqués à chaque type de commande du GADA, sont représentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Echelons des puissances active et réactive appliqués à chaque type de commande du GADA

Temps (s)	P_s^* (W)	Q_s^* (Var)
0 à 0.8	0	0
0.8 à 1.6	-1000	1000
1.6 à 2.5	-1000	-2000
2.5 à 3	-1000	-1000

III.3.1.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe

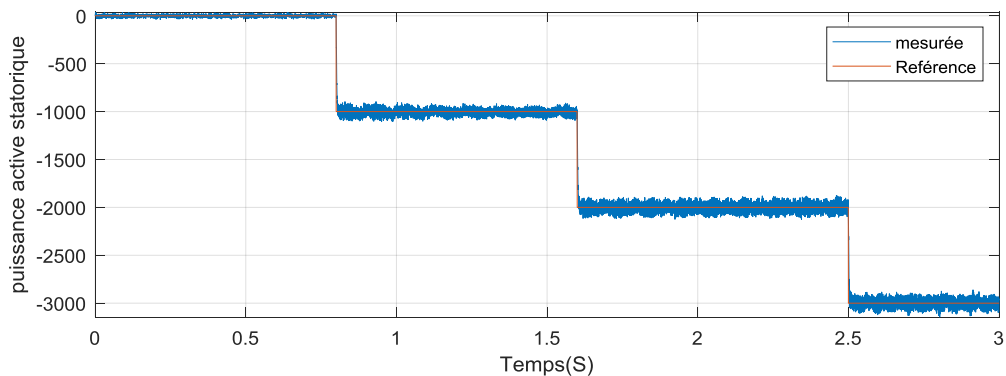


Figure III.15. Puissance active statorique de la commande direct

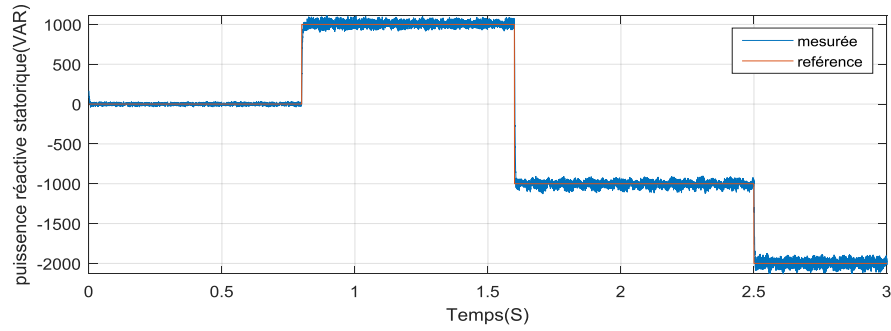
Conversion Eolienne basé sur une GADA

Figure III.16. Puissance réactive statorique de la commande directe

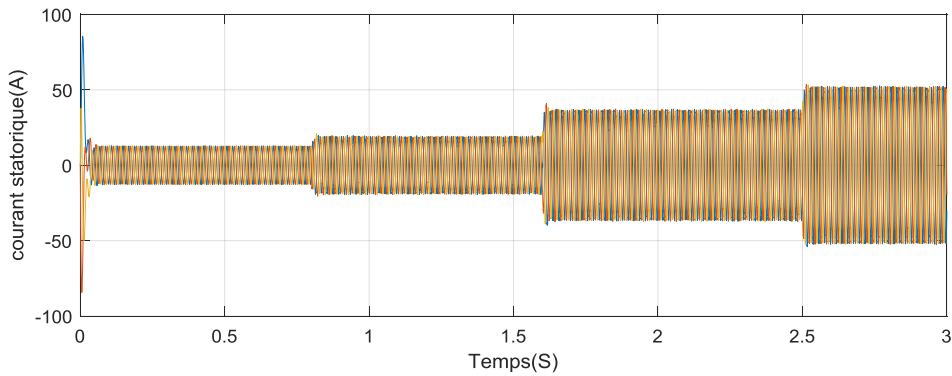


Figure III.17. Courants statorique de la commande directe

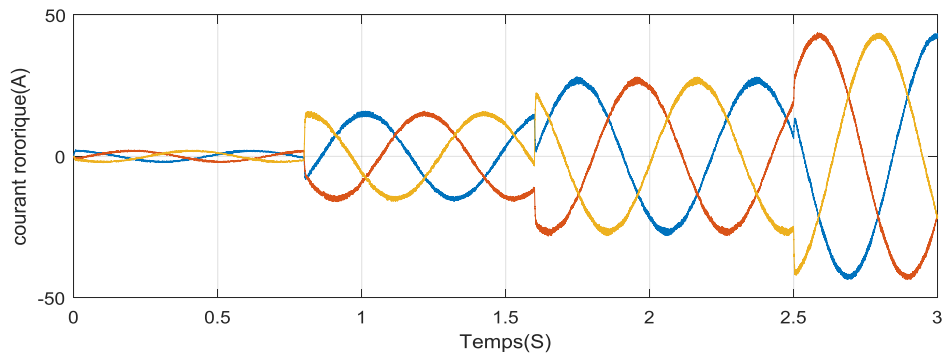


Figure III.18. Courants rotoriques de la commande directe

On peut remarquer que les échelons de la puissance active et réactive statorique sont bien suivis, rapidement et sans dépassement par le générateur. Cependant les variations des échelons on observe un bon découplage entre les deux axes de commande (d et q) avec des faibles oscillations (figures III.15 et III.16). Les (figures III.17et III.18)montrent que les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie ou absorbée par le GADA.

III.3.1.2 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte

Pour la commande indirecte sans et avec boucles des puissances, on applique les mêmes échelons de la puissance active et réactive statorique qui ont été utilisés dans la commande directe.

III.3.1.2.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirect de la puissance active et réactive sans boucles des puissances, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite (figure III.19 et III.20) avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, par conséquent une minimisation des harmoniques. Les figures III.21 et III.22 montrent que les courants obtenus au stator et au rotor sont aussi de formes sinusoïdales avec une amélioration de qualité par rapport à ceux obtenus par la commande directe.

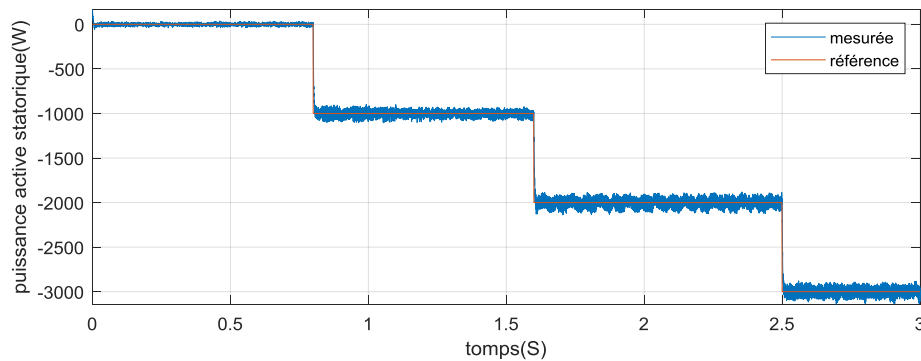


Figure III.19. Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances

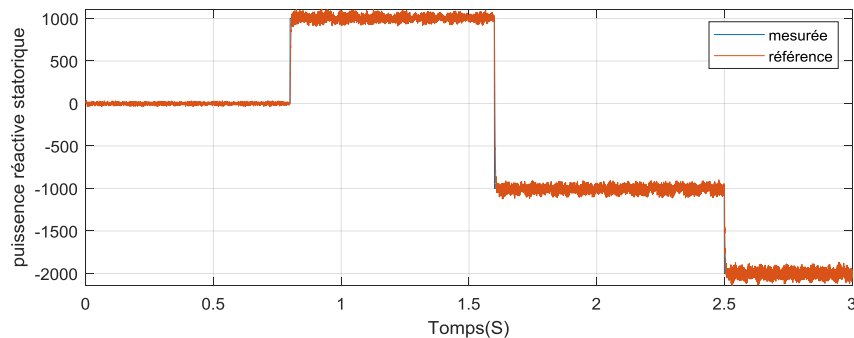


Figure III.20. Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances

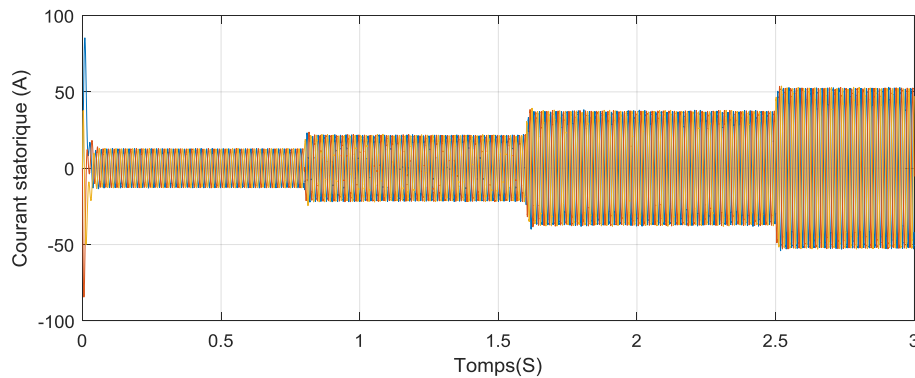


Figure III.21. Courants statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances

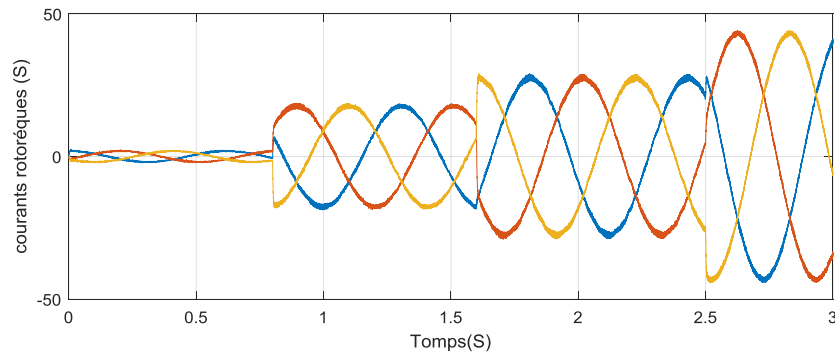


Figure III.22. *Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles des puissances*

III.3.1.2.2 Commande Indirecte avec Boucles des Puissances

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances [6].

La commande indirecte sans et avec boucles des puissances presque ont les mêmes performances, mais la commande indirecte sans boucles des puissances plus rapide que celle avec boucles des puissances parce que la commande indirecte avec boucles des puissances utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance), par contre la commande indirecte sans boucles des puissances utilise seulement deux (02) régulateurs de courant (figure III.23, III.24, III.25 et III.26).

Nous allons donc retenir la commande indirecte sans boucles des puissances pour le reste de notre étude. De plus, elle permet de pouvoir limiter simplement les courants rotoriques de la Machine en fixant une limite dans la boucle du courant rotorique.

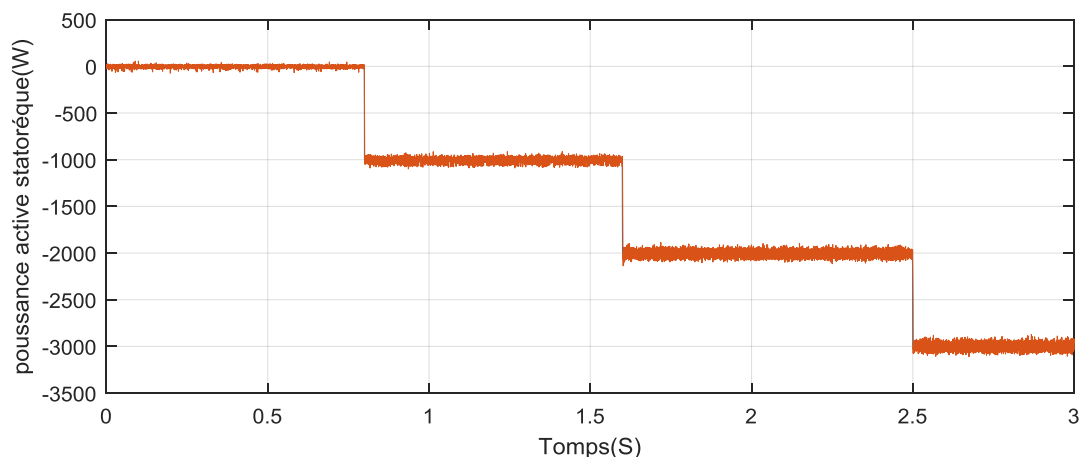


Figure III.23. *Puissance active statorique de la commande indirecte avec boucles des puissances*

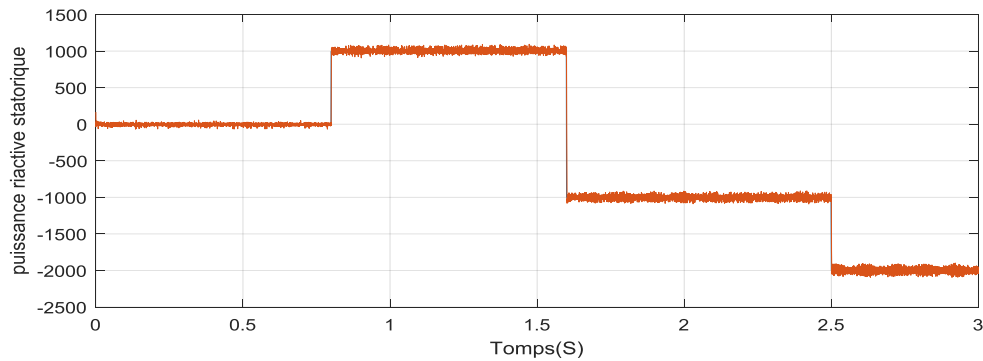
Conversion Eolienne basé sur une GADA

Figure III.24. Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles des puissances

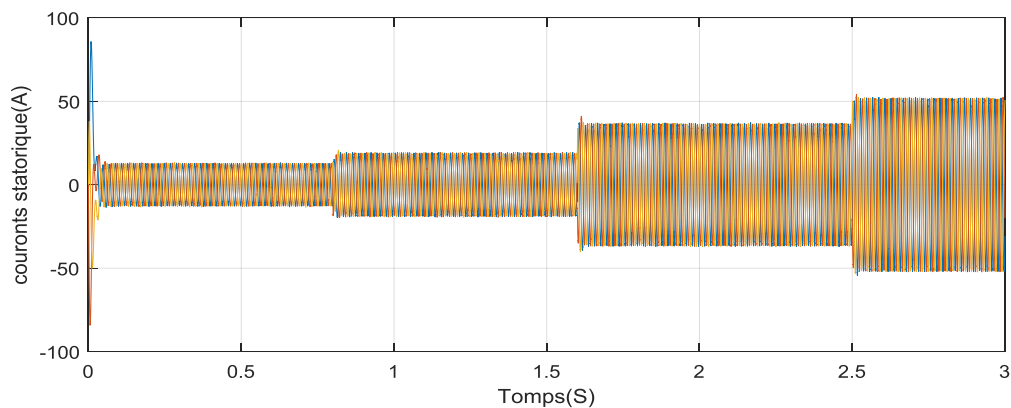


Figure III.25. Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles des puissances

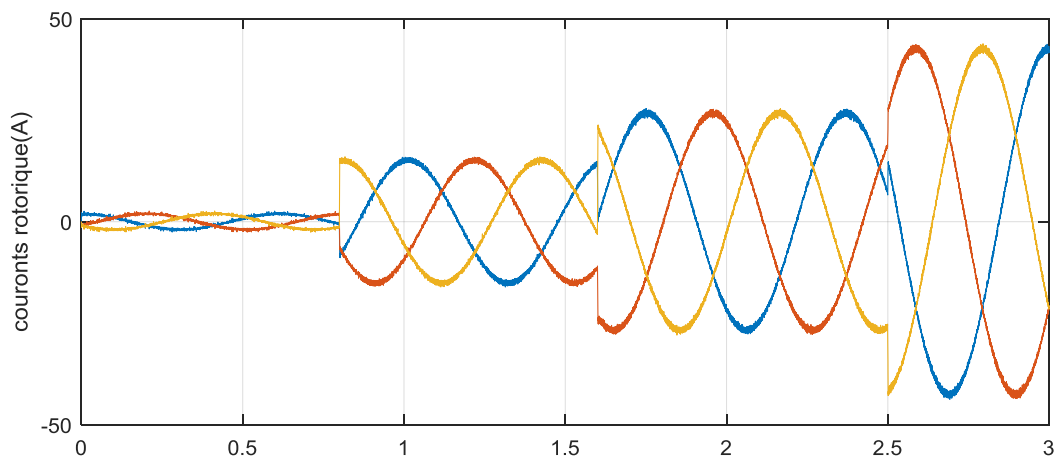


Figure III.26. Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles des puissances

III.3.2. Résultat de simulation à vitesse variable :

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des puissances référentielles actives et réactive statoriques.

Les mêmes paramètres qui nous utilisent à la simulation à la vitesse constante pour la MADA.

La vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse variable proche de la vitesse de vent $V(h)$ (II.6).

III.3.2.1. Résultats de Simulation de la Commande Directe

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle direct à vitesse variable de la puissance active et réactive, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite (figures (III.27))

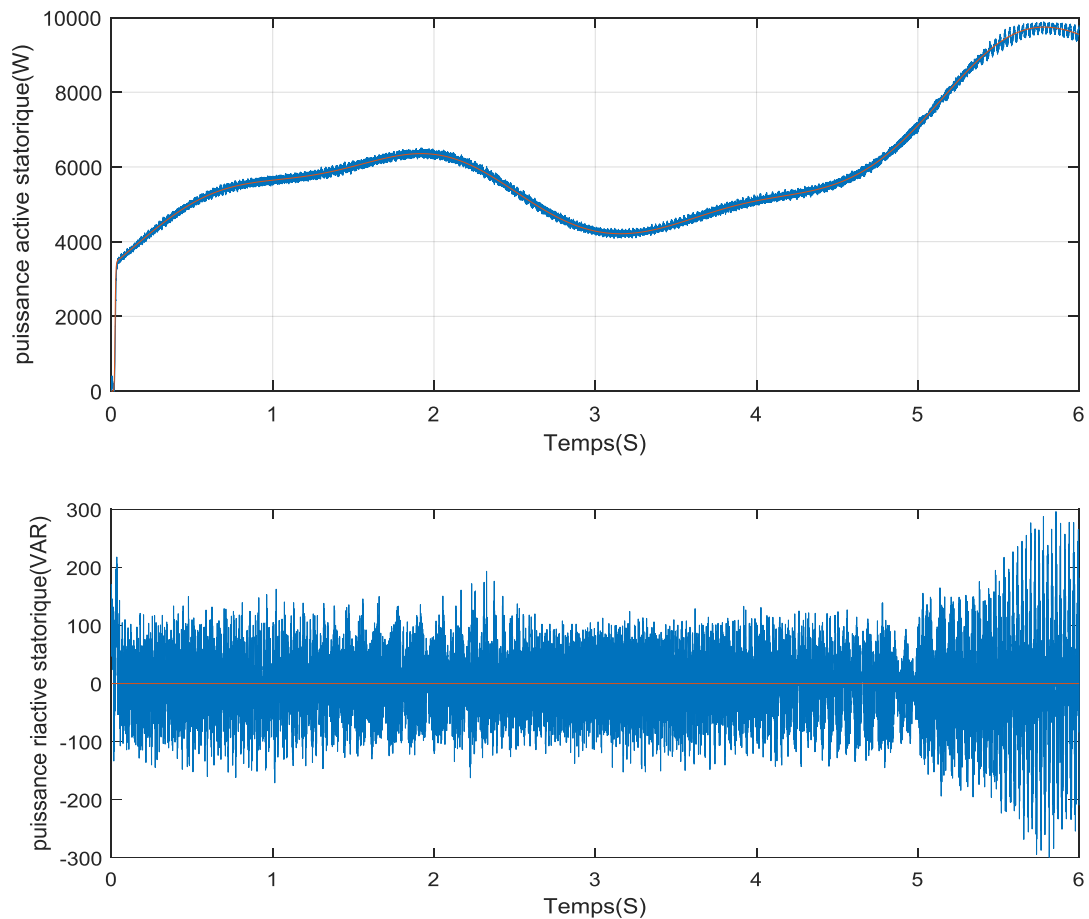


Figure III.27 : *puissances actives et réactives en direct à vitesse variable*

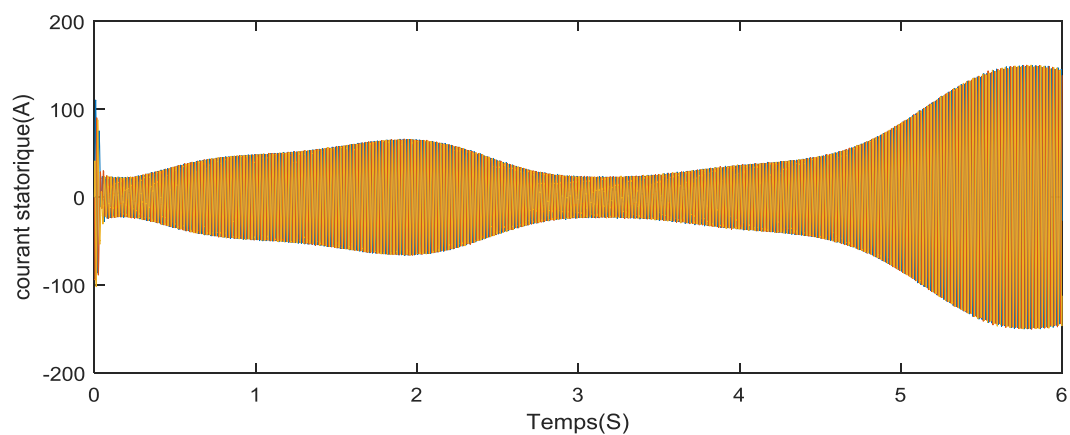


Figure III.28. *Courants statorique de la commande directe à vitesse variable*

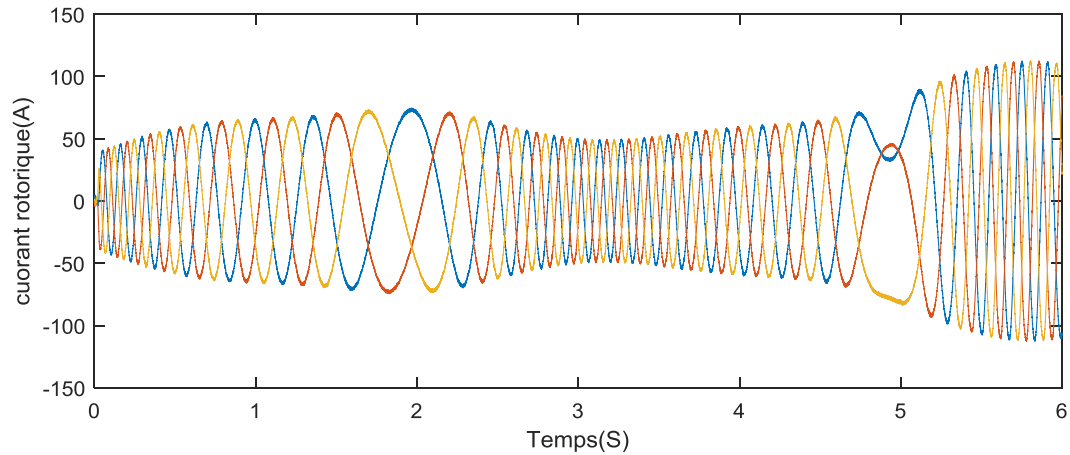


Figure III.29. Courants rotorique de la commande directe à vitesse variable

III.3.2.2. Résultats de Simulation de la Commande indirecte

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirect a vitesse variable de la puissance active et réactive, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite (figures III.30)

a) Commande Indirecte sans Boucles des Puissances

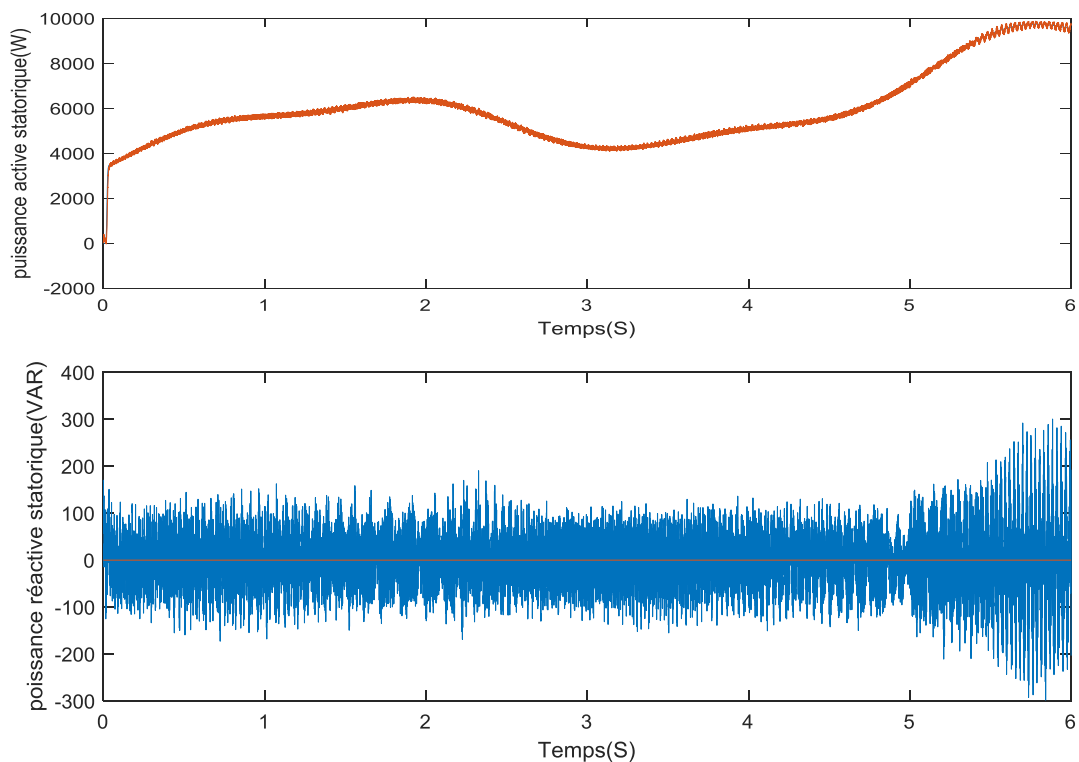


Figure III.30 : puissances active et réactive par commande indirect sans Puissances

Conversion Eolienne basé sur une GADA

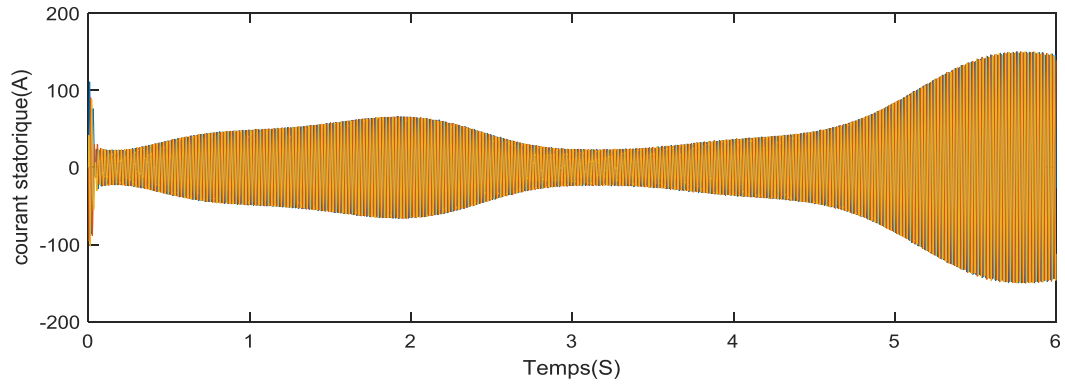


Figure III.31. Courants statorique de la commande indirecte sans Puissances à vitesse variable

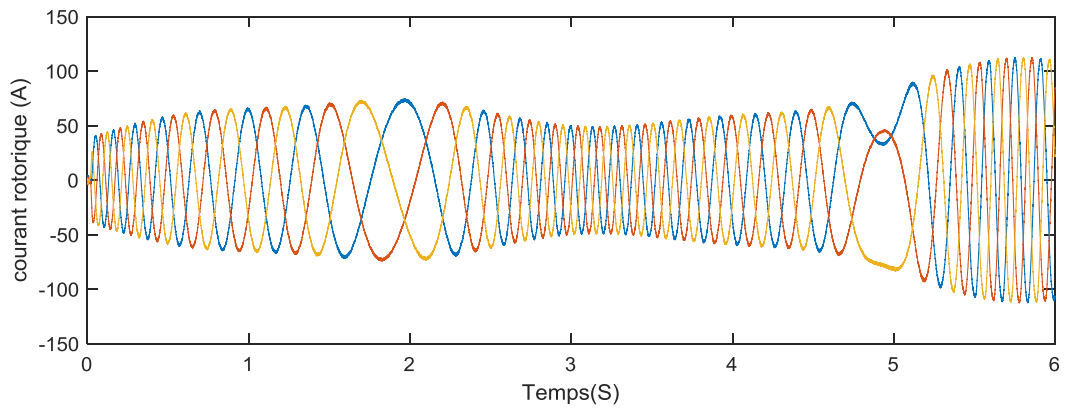


Figure III.32. Courants rotorique de la commande indirecte sans Puissances à vitesse variable

b) Commande Indirecte avec Boucles des Puissances

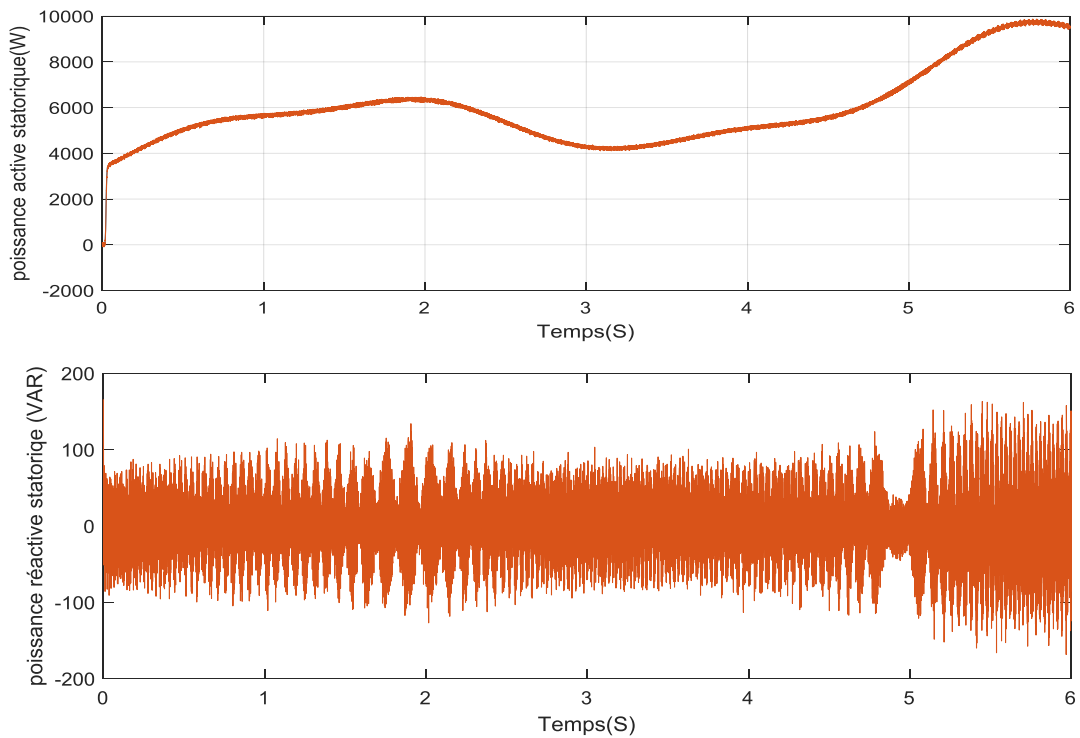


Figure III.33 : les courbes des puissances active et réactive par commande indirect

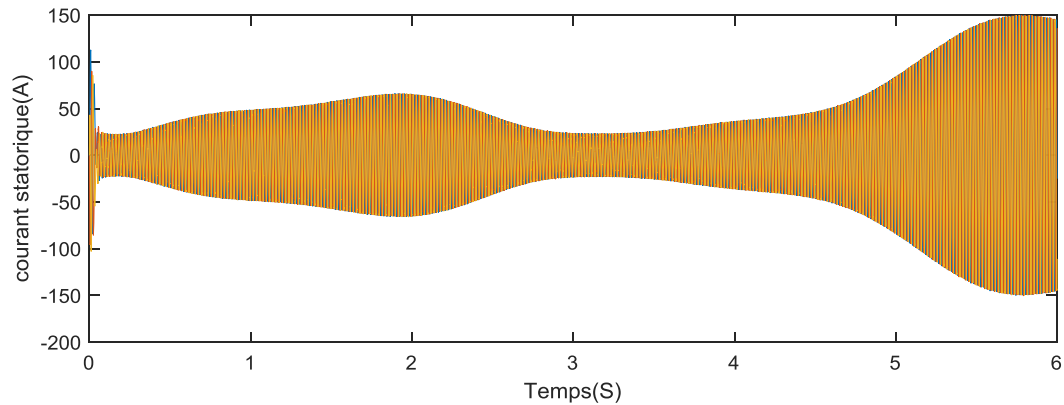


Figure III.34. Courants statorique de la commande indirecte avec Puissances à vitesse variable

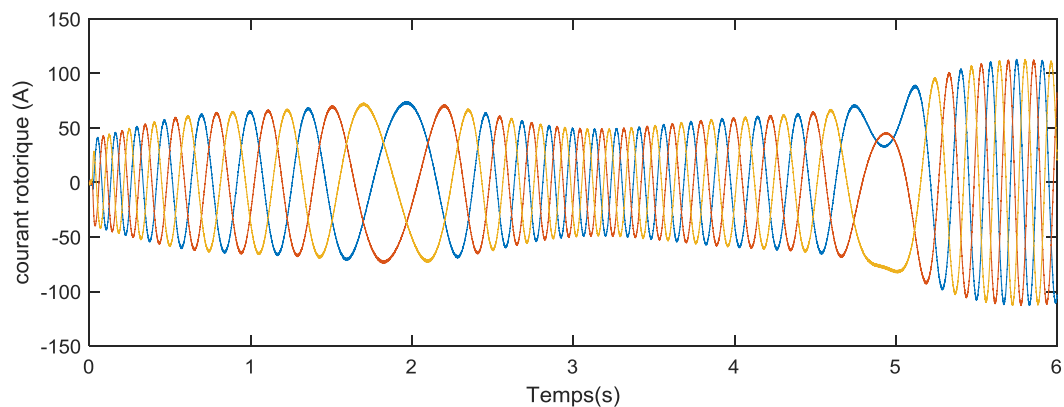


Figure III.35. Courants rotorique de la commande indirecte avec Puissances à vitesse variable

III.4. Interprétation des résultats a Vitesse variable

On remarque qu'il y'a un grand dépassement au début d'exécution à cause du régime de démarrage de la génératrice, à cause des puissances mécanique référentiel, les puissances actives et réactives a la commande direct et indirect sont devenir bien suivis, rapidement et sans dépassement. Cependant la variation de puissance mécanique référentielle, on constate un bon découplage entre les deux axes de commande (d et q) avec des faibles oscillations.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Un fonctionnement stable du système éolien a été obtenu avec l'application de la stratégie d'extraction de maximum de puissance (MPPT). La commande découplée des puissances active et réactive a été élaborée dans l'objectif de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies et d'imposer au

système éolien de fonctionner avec un facteur de puissance unitaire. Le fonctionnement global du système de l'aérogénérateur et sa commande ont été illustrés par les réponses à la commande en puissance, en régimes transitoire et permanent. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de ce mode de contrôle.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier la chaîne de transmission de l'énergie éolienne à axe horizontal basée sur un générateur asynchrone avec double alimentation et contrôle des principaux paramètres.

L'étude a commencé par une explication du développement et de l'exploitation de diverses formes d'énergie renouvelable.

Nous avons passé en revue les différentes technologies utilisées pour produire de l'énergie éolienne et leur capacité à influencer les réseaux.

Pour la partie mécanique, des calculs aérodynamiques ont été utilisés pour déterminer les relations entre la vitesse du vent, le couple et la vitesse de la turbine.

Au terme de nos recherches, nous avons conclu que les chaînes éoliennes sont généralement équipées de générateurs asynchrones. Ces éléments représentent la principale composante de la chaîne, pour laquelle nous avons mené une étude commande vectorielle par contrôle direct et indirect. La simulation de l'ensemble de la chaîne est rendue avec la maintenance MPPT.

Les résultats de simulation présentés dans les différents chapitres confirment le choix des modèles utilisés et la précision des résultats obtenus.

Compte tenu de l'importance du sujet et de l'importance du développement technologique dans le domaine de l'énergie éolienne, nous avons apporté une modeste contribution au classement de GADA en élargissant le champ des recherches et des solutions pratiques pour permettre l'exploitation de ces systèmes.

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M.E.H.Benbouzid et al., —The state of the art of generators for wind energy conversion systems, *Electromotion*, vol.14,n°4,pp.163-172, Octobre-December 2007
- [2] N. Kasbadji Merzouk, " Carte des Vents de l'Algérie - Résultats Préliminaires - " Laboratoire d'évaluation du Potentiel Énergétique, Centre de Développement des Énergies Renouvelables B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.
- [3] Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/>.
- [4] M. Rapin Ph. Leconte " Éoliennes ", Éditions T.I. BM 4 640v2.
- [5] C. Vauge, " Froid, Énergies nouvelles B2,II ", Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME).
- [6] A. G. Abo-Khalil, D.C. Lee, "MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR," *IEEE Transaction on industrial electronics*, Vol.
- [7] Mme L. Hamane, " Les ressources éoliennes de l'Algérie ".
- [8] M. Pluviôse, " Conversion d'énergie par turbomachines : éolienne turbine à gaz " Paris elipse.2005.
- [9] Y. Bekakra, D. Ben attous, "A sliding mode speed and flux control of a doubly fed induction machine," *Electrical and Electronics Engineering*, IEEE Conference, pp. I-174 - I-178, 2009.
- [10] Y. Bekakra, "Étude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées," *Mémoire de Magister*, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.
- [11] V. Pradeep Mahadanaarachchi " Fault Analysis and protection of doubly fed induction generator-based wind farms ", *Master of science* May, 2009, Oklahoma State University, Sri Lanka.
- [12] N.D. Tleis, " *Power System Modeling and Fault Analysis* ", Elsevier, 2008.
- [13] S. Heier and R. Waddington, " *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems_* ", 2nd Edition, John Wiley, 2006.
- [14] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu and N. Jenkins, " *Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generators* ", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18,No.2, May 2003.
- [15] A. Boyette, " *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* ", Thèse de doctorat de l'université de Henry Poincaré, Nancy I.
- [16] F. Poitiers, " *Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne* ", école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.

- [17] **A. Boyette, Shahrokh Saadate, “ Éolienne avec génératrice à double alimentation et unité de stockage d’énergie pour production d’électricité ”, EPF Grenoble (CD rom S7-2) juillet 2006.**
- [18] Frédéric Poitiers, “ Étude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne”, école polytechnique de l’université de Nantes, 2003.
- [19] Janaka B. Elkanayake, Lee Holdsworth, XueGuang Wu, and Nicholas Jenkins, “Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine”, IEEE Transactions on power systems, Vol. 18, NO. 2, May 2003.
- [20] J. Morren¹, S.W.h. de Haan¹, P. Bauer¹, J.T.G. Pierik², J. Bozelie³), “Comparison of complete and reduced models of a wind turbine with Doubly-Fed Induction Generator ” , Toulouse, ISBN: 90-75815-
- [21] EPE 2003.] H. Akagi, S. Ogasawara, H. Kim, “The theory of instantaneous power in three phase four wire systems and its applications” , electrical engineering in Japan, ol.135, n 3, PP.74-86, 2001.