



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



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

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

Thème

**Commande Floue De La Machine Asynchrone A Double
Alimentation Pour La Fourniture De L'Energie Electrique**

Réalisé par :

- **Soufiane BENNADJI**
- **Noureddine DEBOUB**
- **Abdeldjabar MESSAOUDI**

Encadré par :

Dr. Okba ZEGHIB

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: **Okba Zeghib**, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Ainsi, je tiens également à exprimer mon vif remerciement à Dr. **ZOUGGAR El Oualid** qui m'a apportée une aide précieuse. Je lui exprime mon gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et ces encouragements

Mes vifs remerciements vont également à **Mr. Hetiri** chef de département de Génie Electrique pour ses qualités humaines.

Je remercie très vivement tous mes Enseignants au département de Génie Electrique.

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

Dédicace

A mes très chers parents ;

A mes frères et mes sœurs ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis ;

A tous mes collègues ;

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

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

Je dédie ce travail

SOUFIANE BENNADJI

Dédicace

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

À notre famille et nos chers amis qui nous accordent leur soutien dans les instants les plus difficiles. Tous nos formateurs et toute l'équipe pédagogique et administrative de l'université de Hamma Lakhdar El Oued pour l'aide qu'ils ont toujours portée aux étudiants.

ABDELJBAR MESSAOUDI

Dédicace

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

Pour tous les membres de la famille **Deboub**

A mes collègues du département de génie électrique.

Tous mes amis.

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

Aux gens que j'aime, aux gens qui m'aiment et me respectent.

A tous les professeurs qui ont contribué à ma formation durant mes études jusqu'à ce jour.

Je dédie cet humble travail.

Noureddine Deboub

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
Liste de Figures	V
Liste de Tableaux	VIII
Liste des symboles & Abréviations	IX
Résumé	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.3 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel	5
I.3.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	5
I.3.2 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne.....	6
I.3.3 Energie éolienne en Algérie.....	7
I.3.3.a Gisement éolien en Algérie.....	7
I.3.3.b Situation actuelle et future de la filière éolienne en Algérie	7
I.4 Les différents types des turbines éolienne	8
I.4.1 Les éoliennes à axes horizontal:.....	8
I.4.1.a Inconvénient.....	9
I.4.1.b Avantages.....	9
I.4.2 Les éoliennes à axes à axe vertical.....	9
I.4.2.a Avantages	10
I.4.2.b Inconvénient	10
I.5 Constitution d'une éolienne horizontale	10

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	11
I.6.1 Avantages éolienne.....	11
I.6.2 Inconvénients éolienne.....	11
I.7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne Principe.....	12
I.7.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall".....	12
I.7.2 Système d'orientation des pales « Pitch »	12
I.8 État de l'art sur la conversion électromécanique.....	13
I.8.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	13
I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".....	14
I.8.2.a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	14
I.8.2.b Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	15
I.8.2.c Structure Back-to-back	15
I.9 Conclusion	16
 Chapitre II : MODELISATION ET COMMANDE MPPT DE LA TURBINE EOLIENNE.....	17
II.1 Introduction.....	18
II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA.....	18
II.3 Modélisation de la turbine éolienne.....	18
II.3.1 Modèle du vent appliqué au système.....	19
II.3.2 Modèle aérodynamique.....	20
II.3.3 Modèle de la partie mécanique	21
II.4 Stratégie de commande de la turbine	23
II.4.1 Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT).....	24
II.4.1.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.....	25
II.5 Résultats de simulation.....	30
II.6 Conclusion	33

Chapitre III : MODELISATION ET COMMANDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION (GADA).....	34
III.1 Introduction.....	35
III.2 Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	35
III.3 Application des machines asynchrones à double alimentation	36
III.3.1 Application moteur (MADA).....	36
III.3.2 Application génératrice (GADA).....	37
III.4 Modélisation de la générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA).....	38
III.4.1 Représentation de la GADA dans repère triphasé (abc).....	38
III.4.1.1 Équations électriques	39
III.4.1.2 Equations magnétiques.....	40
III.4.1.3 Equation mécanique	41
III.4.2 Modèle de la GADA dans le repère de Park.....	41
III.5 Schéma bloc réduit de la GADA.....	44
III.6 Commande directe.....	45
III.6.1 .Synthèse des régulateurs PI.....	46
III.7 Convertisseur MLI.....	47
III.7.1 Onduleur a deux niveaux.....	48
III.7.2 Principe de la MLI.....	50
III.8. Résultats de simulation.....	51
III.9. Conclusion.....	58
Chapitre IV: COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UN SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE BASE SUR UNE GADA.....	59
IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Définition de l'intelligence artificielle	60
IV.3 Généralités sur la théorie du contrôle par la logique floue	60
IV.3.1 Principe et definition	60
IV.4 Commande vectorielle à base de régulateur floue pour une GADA	61
IV.4.1 Commande des puissances de la GADA par la logique floue	61

IV.4.2 Choix de la structure du RLF des courants rotoriques.....	62
IV.4.2.1 Description de la conception du RLF pour la commande de la GADA	63
IV.5 Résultats de simulation	66
IV.6 Conclusion	72
CONCLUSION GENERALE	73
ANNEXE	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76

Liste des Figures

Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

Fig I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Fig I.2: Capacité éolienne cumulée dans le monde entier	6
Fig I.3 : Carte de vent en Algérie	7
Fig I.4 : Technologie des éoliennes à axe horizontale	8
Fig I.5 : Technologie des éoliennes à axe vertical	9
Fig I.6 : Principales composants d'une éolienne à axe horizontal	11
Fig I.7 : Flux d'air sur un profil de pale " Stall"	12
Fig I.8 : Variation de l'angle de calage d'une pale	13
Fig I.9 : Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS	13
Fig I.10 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	14
Fig I.11 : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur	15
Fig I.12: MADA avec structure back-to-back	15

Chapitre II : MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

Fig II.1: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine	19
Fig II.2: La relation entre C_p , β et λ	21
Fig II.3: Partie mécanique	21
Fig II.4: Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne	23
Fig II.5: Zones de fonctionnement de la turbine	23
Fig II.6: Contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation	26

Fig II I.7: Contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation	27
Fig II.8: Régulation de la vitesse mécanique en boucle fermée à l'aide d'un contrôleur flou.	29
Fig II.9: Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ et Vitesse spécifique λ	31
Fig II.10: Fig.II.10 Vitesse mécanique Ω_m	32

Chapitre III : MODELISATION ET COMMANDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION (GADA)

Fig III.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA	36
Fig III.2 : Moteur Asynchrone Double Alimentation (MADA)	37
Fig III.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique	38
Fig III.4 : Circuit électrique équivalent de la GADA	38
Fig III.5 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse (Transformation du Park)	42
Fig III.6 : Schéma bloc du système à réguler.	45
Fig III.7 : Schéma de principe de la commande direct	46
Fig III.8 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI	46
Fig III.9 : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI	48
Fig III.10 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux	49
Fig III.11 : Principe de la MLI	50
Fig III.12 : Schéma bloc de la commande de la GADA basée sur l'orientation du flux statorique	51
Fig.III.13 Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA	52
Fig.III.14 Puissances active et réactive statoriques et leurs références	53
Fig.III.15 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références	53
Fig.III.16 Courants rotoriques et statoriques triphasé	54

Fig.III.17 Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA	55
Fig.III.18 Puissances active et réactive statoriques et leurs références	56
Fig.III.19 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références	56
Fig.III.20 : Courants rotoriques et statoriques triphasé	57

Chapitre IV : COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UN SYSTEME

EOLIEN A VITESSE VARIABLE BASE SUR UNE GADA

Fig IV.1 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	61
Fig IV.2 Schéma bloc de la commande avec des régulateurs flous	62
Fig IV.3 Configuration de base d'un régulateur par logique floue.	63
Fig IV.4 Fonctions d'appartenances utilisées pour RLF pour les deux boucles des courants. (a) : Erreur, (b) Dérivée de l'erreur et (c) : La commande.	64
Fig.IV.5 Puissances active et réactive statoriques et leurs références	67
Fig.IV.6 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références	68
Fig.IV.7 Courants rotoriques et statoriques triphasé	68
Fig.IV.8 Puissances active et réactive statoriques et leurs références	69
Fig.III.9 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références	70
Fig.III.10 : Courants rotoriques et statoriques triphasé	72

Liste des Tableaux

Chapitre I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'éolienne utilisant une MAS **13**

Chapitre II : MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

Tableau II.1 : Tableau de règles pour le RLF des courants rotoriques **29**

Chapitre IV : COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UN SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE BASE SUR UNE GADA

Tableau IV.1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques **64**

Table IV.2 Table de règles pour le RLF des courants rotoriques **65**

Annexe

Tableau A.1 : Les paramètres de la turbine éolienne utilisée **75**

Tableau A.2 : Paramètres de la GADA **75**

Liste des symboles & abréviations

1. Symboles spécifiques à la turbine :

V_v	<i>Vitesse du vent</i>
$Paer$	<i>Puissance aérodynamique</i>
λ	<i>Ration de Vitesse</i>
$C_p(\lambda, \beta)$	<i>Coefficient de puissance</i>
β	<i>Angle d'orientation des pales</i>
ρ	<i>Masse volumique de l'air</i>
S	<i>Surface circulaire balayée par la turbine</i>
Ω_t	<i>Vitesse de rotation de la turbine</i>
R_t	<i>Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.</i>
C_t	<i>Couple de la turbine.</i>
J	<i>Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne.</i>
J_t	<i>Moment d'inertie de la turbine.</i>
J_m	<i>Moment d'inertie de la GADA.</i>
f_v	<i>Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.</i>
C_m	<i>Couple mécanique sur l'arbre de la GADA</i>
C_{em}	<i>Couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA</i>
G	<i>Gain du multiplicateur</i>
Ω_m	<i>Vitesse de rotation de la GADA</i>
N_r et N_s	<i>Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique</i>
g	<i>Glissement</i>
p	<i>Nombre de paires de pôles</i>
u	<i>Rapport de transformation rotor/stator</i>
ω_s et ω_r	<i>Pulsations statorique et rotorique de la GADA.</i>
R_s, R_r	<i>Résistance statorique et rotorique</i>
$i_{as}(t), i_{bs}(t)$ et $i_{cs}(t)$	<i>Courants statoriques des phases a, b et c</i>

$v_{as}(t)$, $v_{bs}(t)$ et $v_{cs}(t)$	<i>Tensions statoriques.</i>
$\varphi_{as}(t)$, $\varphi_{bs}(t)$ et $\varphi_{cs}(t)$	<i>Flux de stator</i>
$i_{ar}(t)$, $i_{br}(t)$ et $i_{cr}(t)$	<i>Courants rotoriques des phases a, b et c</i>
$v_{ar}(t)$, $v_{br}(t)$ et $v_{cr}(t)$	<i>Tensions rotoriques.</i>
$\varphi_{ar}(t)$, $\varphi_{br}(t)$ et $\varphi_{cr}(t)$	<i>Flux de rotor</i>
L_s , L_r	<i>Inductances propres des phases statoriques et rotoriques</i>

2. Abréviations

SCEE	<i>Systèmes de Conversion d’Energie Eolienne.</i>
GADA	<i>Génératrice Asynchrone Double Alimentation.</i>
MADA	<i>Moteur Asynchrone Double Alimentation</i>
MAS	<i>Moteur Asynchrone</i>
MLI	<i>Modulation de Largeur d’Impulsion</i>
RLF	<i>Régulateur par Logique Floue</i>
IA	<i>Intelligence Artificielle</i>
CCR	<i>Convertisseur Côté Réseau.</i>
CCG	<i>Convertisseur Côté Génératrice.</i>
TE	<i>Turbine Eolienne.</i>
PI	<i>Proportionnel- Intégral.</i>
GW	<i>Gigawatts.</i>
PE	<i>Parcs Éoliens.</i>
SCIG	<i>Générateur à induction à cage d’écureuil (SCIG).</i>
WRIG	<i>Générateur à induction à rotor bobiné (WRIG).</i>
PMSG	<i>Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG).</i>
WRSG	<i>Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG).</i>
GS	<i>Générateur synchrone (GS).</i>
CC	<i>Courant continu.</i>
CA	<i>Courant alternatif.</i>
PWM	<i>Pulse width modulation.</i>

<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i>
<i>GTO</i>	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
<i>MOSFET</i>	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
<i>MPPT</i>	<i>Maximum Power Point Tracking.</i>
<i>DFIG</i>	<i>Doubly Fed Induction Generator.</i>

RESUME

Dans ces travaux de thèse, l'objectif général est d'enrichir la base de connaissances nécessaire pour une contribution à l'étude et à la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une génératrice asynchrone double alimentation (GADA). Après avoir modélisé la chaîne de conversion d'énergie éolienne complète, nous avons proposé la conception du modèle d'un système éolien avec asservissement de vitesse, en utilisant la méthode de contrôle MPPT avec deux type du controle, l'une de type PI et l'autre par la logique floue. D'un autre côté, concernant la commande de la GADA, trois commandes sont proposées et testées afin d'assurer la stabilité en boucle fermée de l'ensemble Turbine-Machine et de générer d'énergie et l'injectée vers le réseau électrique.

Les résultats obtenus en simulation démontrent l'efficacité et les performances des méthodes proposées.

Mots clés :

Energie renouvelable, Eolienne, GADA, MPPT, Commande vectorielle, Commande non linéaires.

ملخص:

الهدف العام في هذا البحث هو إثراء قاعدة المعرفة اللازمة للمساهمة في الدراسة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس مولد غير متزامن ثنائي التغذية (GADA). بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح الكاملة، اقترحنا تصميم نموذج لنظام طاقة الرياح مع التحكم في السرعة، باستخدام طريقة للتحكم MPPT باستخدام نوعين من التحكم، أحدهما من النوع PI والآخر بالمنطق الغامض. من ناحية أخرى، فيما يتعلق بالتحكم في GADA، تم اقتراح ثلاثة عناصر تحكم واختبارها من أجل ضمان ثبات الحلقة المغلقة لتجميع مولد الطاقة والآلة وإنتاج الطاقة المحقونة في الشبكة الكهربائية.

النتائج التي تم الحصول عليها في المحاكاة، توضح كفاءة وأداء الطرق المقترحة.

كلمات مفتاحية:

الطاقة المتجددة، مولد الطاقة بالرياح، GADA، MPPT، التحكم الشعاعي، التحكم غير الخطي.

Abstract

In this thesis work, the general objective is to enrich the knowledge base necessary for a contribution to the study and the control of a wind energy conversion system based on a dual power asynchronous generator (GADA). After having modeled the complete wind energy conversion chain, we proposed the design of the model of a wind power system with speed control, using an MPPT control method based on two type of control, one of type PI and the other by fuzzy logic. On the other hand, concerning the control of the GADA, three controls are proposed and tested in order to ensure the closed-loop stability of the Turbine and Machine assembly and to product, the energy injected into the electrical network.

The results obtained in simulation, demonstrate the efficiency and performance of the proposed methods.

Keywords:

Renewable energy, Wind turbine, GADA, MPPT, Vector control, Non-linear control.

Introduction Générale

Aujourd'hui avec l'augmentation croissante de la consommation d'énergie dans le monde qui provoque la diminution des ressources énergétiques conventionnelles, et le réchauffement climatique qui devenu le centre d'attention en raison de son impact négatif sur l'environnement, il existe un besoin important d'utiliser des sources renouvelables alternatives telles que les cellules solaires, les éoliennes, l'énergie hydraulique et la biomasse, etc.

En outre, parmi les sources d'énergie renouvelables possibles, on trouve l'énergie éolienne, elle est la source d'énergie renouvelable la plus fiable et la plus développée durant ces dernières décennies. Les facteurs qui ont contribué de plus en plus au développement des systèmes d'énergie éolienne sont les progrès rapides de l'industrie de l'électronique de puissance qui sont le cœur des systèmes d'énergie éolienne, le soutien des institutions gouvernementales et la sensibilisation accrue de la population aux énergies renouvelables. En conséquence, la part de l'énergie éolienne par rapport à la puissance totale installée augmente dans le monde entier.

La production d'énergie éolienne fonctionne selon le principe de la conversion de l'énergie dans le mouvement des particules de la masse d'air avec une énergie cinétique linéaire qui est convertie en énergie mécanique puis en énergie électrique à l'aide des turbines éoliennes et de générateurs électriques.

La majorité des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne (SCEE) à vitesse variable et à pas variable utilisent une Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA). Cette dernière devient plus populaire dans l'industrie de l'énergie éolienne, en particulier pour les éoliennes de plusieurs mégawatts. Il y a plusieurs raisons d'utiliser le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes, parmi celles-ci figurent les possibilités de réduire les contraintes de la structure mécanique, la réduction du bruit acoustique et la possibilité de contrôler la puissance active et réactive [1].

Les générateurs d'énergie éolienne sont principalement des machines asynchrones qui ont l'avantage d'être moins chères, de nécessiter peu d'entretien et de convenir parfaitement aux applications éoliennes à grande échelle pour leur fonctionnement à vitesse variable, c'est-à-dire les générateurs à induction doublement alimentés.

La beauté du SCEE basé sur la GADA est sa capacité de conversion de puissance efficace à une vitesse de vent variable avec une contrainte mécanique réduite et un prix bas en raison de la taille partielle des convertisseurs de puissance nominale nécessaire pour obtenir le contrôle total de la machine. Ses caractéristiques techniques et économiques favorables ont encouragé la commercialisation rapide de cette éolienne dans l'industrie moderne de l'énergie éolienne.

Ces types d'éoliennes ont besoin d'une commande robuste en raison de la vitesse du vent variable et la nécessité de les intégrer dans le système du réseau électrique.

L'objectif principal de cette thèse est de faire la modélisation complète d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une génératrice asynchrone double alimentation et d'appliquer des techniques de commande permettant d'obtenir un système robuste et fiable.

Structure de la mémoire

La méthodologie suivante a été adoptée afin de mener à bien les travaux de recherche :

Nous allons présenter brièvement dans ce premier chapitre, la capacité éolienne installée, l'aperçu général de la production d'énergie éolienne, l'évolution du SCEE en puissance nominale des turbines et les principaux composants des SCEE's connectés au réseau. Les différentes topologies des éoliennes, leurs applications et leurs particularités. Ceci nous permet de nous positionner quant au choix du type de génératrice utilisée pour la production de l'énergie électrique.

Le chapitre II décrira la modélisation de la turbine éolienne et la présentation des commandes appropriées afin de commander la vitesse du système éolien, pour pouvoir maximiser et limiter la capture de la puissance pendant les faibles et les fortes vitesses du vent. Nous allons tout d'abord modéliser le profil du vent qui sera appliqué à la turbine éolienne. Le modèle de la turbine sera présenté également. Par la suite, les différentes stratégies d'extraction de la puissance maximale disponible dans le vent seront appliquées.

Au chapitre III, nous allons modéliser la génératrice asynchrone double alimentation et discrétiser son modèle dans le référentiel d-q lié au champ tournant statorique. Nous allons présenter également dans ce chapitre, Dans la dernière partie, la commande vectorielle serait introduite. Ces algorithmes nous permettent d'obtenir une commande des puissances active et réactive générées par la GADA d'une façon indépendante, en utilisant des régulateurs classiques du type Proportionnel- Intégral (PI). Toutes ces commandes sont validées par des résultats de simulation.

Dans le chapitre IV, nous allons discuter de la méthode et technique appliquée dans la commande d'un SCEE afin de nous aider à atteindre notre objectif de travail, qui est d'obtenir un système robuste.

La première commande c'est la commande vectorielle basée sur des régulateurs flous. Nous allons commencer par une introduction à la logique floue. Les principes de base de la commande et du réglage par logique floue seront ensuite étudiés. La commande par logique floue est finalement appliquée pour concevoir des régulateurs des courants rotoriques de la GADA.

Une conclusion générale vient clôturer les quatre chapitres de cette mémoire. Une proposition de quelques perspectives pour les travaux futurs de recherches est également donnée.

Chapitre I :

GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.1 Introduction

La technologie des capteurs de vent n'a cessé d'évoluer depuis l'utilisation des éoliennes. Au début des années 1940, de véritables prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour produire de l'électricité. Plusieurs techniques sont utilisées pour capter l'énergie éolienne (capteurs à axe vertical ou à axe horizontal).

Dans le cadre de ce chapitre, on va présenter une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution dièse éolienne durant des dernières décennies. Dièses statistiques sont données montrant l'évolution de la production tout autant que la vente para l'énergie éolienne dans le marché de le monde, aussi que les multiple générateurs utilisés dans le marché de les systèmes éoliens. Ce chapitre est clôturé par conclusion.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Le aérogénérateur, plus pratiquement appelé éolienne, se révèle être un dispositif quel professionnel transforme l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique accessible sur un scion de transmission ensuite en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

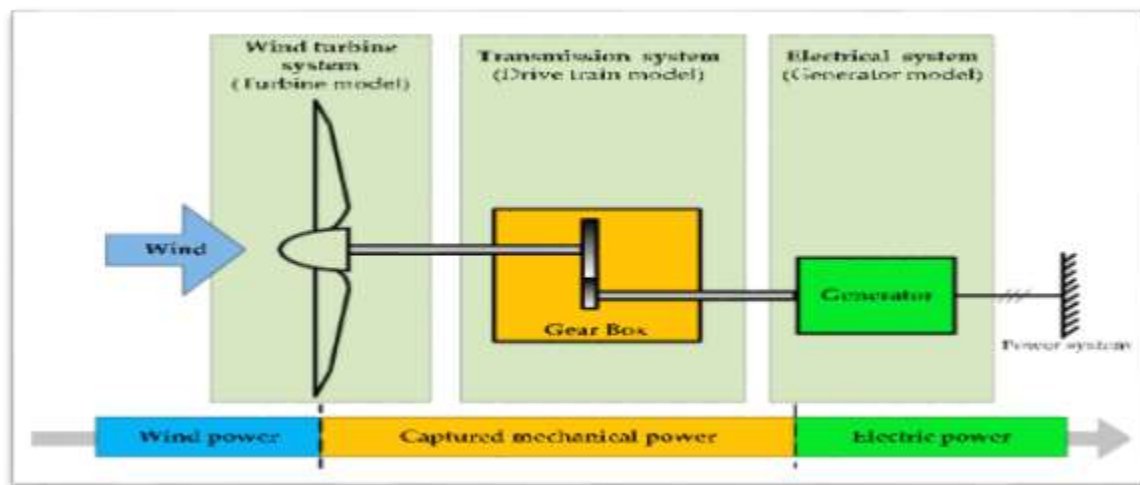


Fig I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [02].

L'énergie éolienne est votre énergie "renouvelable" not for dégradée, géographiquement dissipate, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que chicago moyenne des vitesses des vents représente la plus élevée). De plus, c'est une énergie quel professionnel ne produit négatif rejet atmosphérique national

insurance déchet radioactif. Elle est toutefois douteux dans le temperature ranges et son captage reste assez délicat, nécessitant des mâts et des pyl?ne de grandes measurement (jusqu'à 90m dump des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans le marché de des zones géographiquement dégagées pour esquiver les phénomènes de turbulences [02].

I.3 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel :

I.3.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne :

Le vent est utilisé depuis des millénaires comme source d'énergie traditionnelle non polluante pour la propulsion des navires (avant environ 3000 ans), l'entraînement des moulins (environ 200 000 éoliennes en Europe vers le milieu du 19^{ème} siècle), le pompage de l'eau et le forgeage des métaux dans industrie. La conversion de l'énergie éolienne acquise par les hélices en énergie mécanique utilisable est à la base de ces dernières applications [03].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité en tant que forme moderne de l'homme et la recherche efficace sur les générateurs électriques, que le danois Poul Una Cour construisit pour la toute première fois en 1891 une éolienne créant de l'électricité [04].

Suite à la fabrication de l'éolienne initiale, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie au cours de la 1ère bataille mondiale et des suivantes à une échelle considérable.

C'est la crise des huiles essentielles de 1974 qui a relancé les études et les tests à plus grande échelle, obligeant de nombreux pays à investir pour améliorer et moderniser la technologie éolienne. Parmi ces opportunités, on citera le tout premier grand marché en Californie entre 80 et 1986, principalement avec des turbines de moyenne énergie (55 kW), puis 144 machines (total 7 MW) en 1981 et 4 687 machines d'une énergie totale de 386 MW en 1985 [03].

Suite à ces années, le marché européen a véritablement décollé, ce qui a permis une avancée importante de cette industrie éolienne notamment dans des pays comme le Royaume-Uni, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une part importante du marché mondial, qui atteignait 10 000 MW il y a 10 ans et environ 47 000 MW en 2004 avec une moyenne annuelle de 7 500 MW.

Le coût total de l'énergie nécessaire pour produire de l'électricité à partir du vent est en fait compétitif par rapport aux options énergétiques traditionnelles telles que les combustibles précieux. Cette baisse du prix de l'électricité est le résultat d'importants progrès technologiques

utilisés dans l'industrie (amélioration de la conception des cycles, amélioration des matériaux utilisés).

Actuellement, l'énergie éolienne fait partie des autres sources d'énergie à croissance très sûre [03]

I.3.2. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

À partir de ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le lieu entier (figure I.2). Ceci reste principalement dû à deux raisons:

- ✓ Produire une énergie propre.
- ✓ Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

Le marché particulier de 2016 était de plus de 54 GW, ce qui donne une capacité totale installée globale de près de 487 GW, soit un total d'environ 12,47 %. Dirigé par l'Extrême-Orient, les États-Unis, l'Allemagne et l'Inde. L'Allemagne a continué d'être le plus grand marché du continent occidental en 2016 (5,4 GW), les installations américaines de 8 203 MW étaient presque identiques au marché fort de 2015, portant le total de TOUS les États-Unis à plus de 82 GW [04].

Le marché offshore chinois en particulier en 2016 atteint la prochaine place dans le classement mondial, après le Royaume-Uni et l'Allemagne

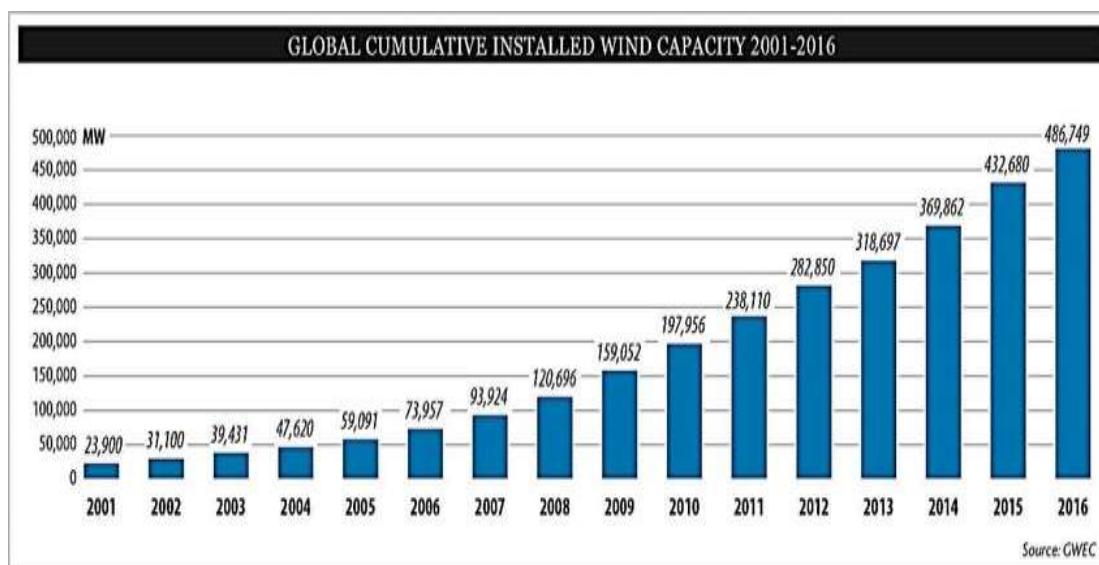


Fig I.2 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier [04]

I.3.3 L'énergie éolienne en Algérie :

I.3.3.a Gisement éolien en Algérie :

L'Algérie, comme d'autres endroits, tente de percer dans le domaine des énergies renouvelables et de l'énergie éolienne en particulier, et cela aussi en accordant beaucoup d'importance aux études menées dans ce domaine, notamment celles qui sont consacrées au cas algérien malgré de la prédominance de l'énergie solaire. Une analyse préliminaire de la progression des vacances et des vents en Algérie. Cette présentation spécifique de la vitesse sous forme de carte a deux objectifs : le premier est d'identifier les grandes régions prometteuses pour l'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde consiste à cibler la variante comparable de la ressource utile entre les pays. [05]

L'Algérie dispose d'un potentiel de flux éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'électricité, en particulier dans le sud où les vitesses de vent sont élevées et peuvent dépasser 4 m/(6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7 m/s en la région d'Adrar

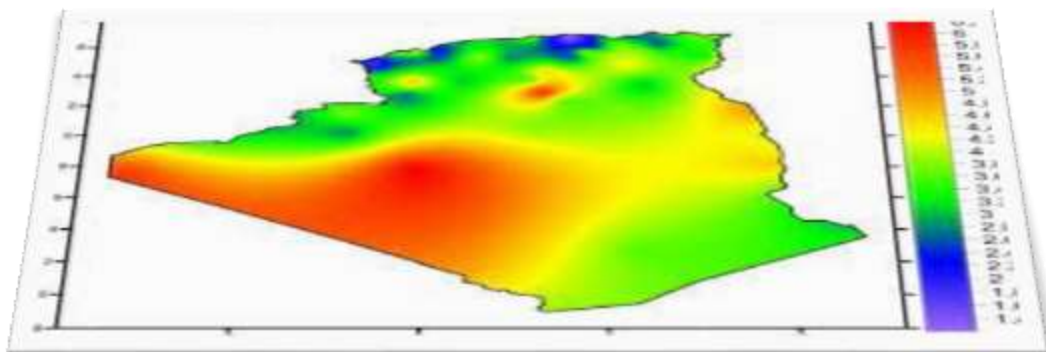


Fig I.3 : Carte de vent en Algérie [05]

I.3.3.b Situation actuelle et future de la filière éolienne en Algérie :

Selon certaines estimations [06], plus de cinq millions d'Algériens ne sont pas reliés au réseau électrique, bien que de nombreuses communautés non urbaines aient besoin d'eau potable et d'eau potable pour l'irrigation. Ces types de besoins ruraux représentent un marché potentiel pour les technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'est engagée avec persévérance sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et respectueuses de l'environnement aux défis environnementaux ainsi qu'aux difficultés de préservation des ressources énergétiques d'origine précieuse. Ce bon choix est encouragé par le formidable potentiel de l'énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe de ce programme qui consacre une part essentielle au solaire thermique et au solaire pv. Le solaire devrait atteindre plus de 37% de la production nationale d'électricité d'ici 2030. Malgré un potentiel raisonnablement faible, le programme n'exclura pas l'éolien, qui est le 2ème axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la création électrique en 2030 [06].

I.4 Les différents types des turbines éolienne

Se révèle être solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent deviennent très variées. Upon peut diviser l'ensemble des éoliennes en deux grandes familles:

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

I.4.1 Les éoliennes à axes horizontal.

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

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation. [07]



Fig I.4 : Technologie des éoliennes à axe horizontale

I.4.1.a Inconvénients :

- ✓ Coût de structure très élevé.
- ✓ Les appareils se trouvent au sommet de la structure, ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

I.4.1.b Avantages :

- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus puissante et beaucoup plus régulière que près du sol.
- ✓ Le générateur et les dispositifs de contrôle sont généralement situés dans la nacelle au sommet de la tour. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de créer un espace pour stocker le matériel

I.4.2 Les éoliennes à axes vertical:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position de récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité de la roto verticale en réalisant des études multicritères. [07]



Fig I.5 : Technologie des éoliennes à axe vertical

I.4.2.a Inconvénient

- ✓ Ils sont moins efficaces que ceux avec un axe lateral
- ✓ Les éoliennes de type verticale obligent à l'utiliser avec des vents proches du sol, et sont donc moins puissantes que les turbines horizontal

I.4.2.b Avantages

- ✓ L'axe vertical a une symétrie qui lui permet de fonctionner quelle que soit la direction du vent sans avoir besoin de diriger le rotor.
- ✓ Il est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.5 Constitution d'une éolienne horizontale

On présente les différents composants d'une éolienne à axe horizontal étant le sujet de notre étude (Figure I.6) [08].

1. Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).
2. Moyeu du rotor en fonte.
3. Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
4. Paliers du rotor à double rangée de billes.
5. Arbre lent du rotor en acier à haute résistance.
6. Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
7. Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
8. Accouplement avec la génératrice de type flexible.
9. Génératrice (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
10. Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
11. Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
12. Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
13. 13-Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
14. Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
15. Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
16. Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17. Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

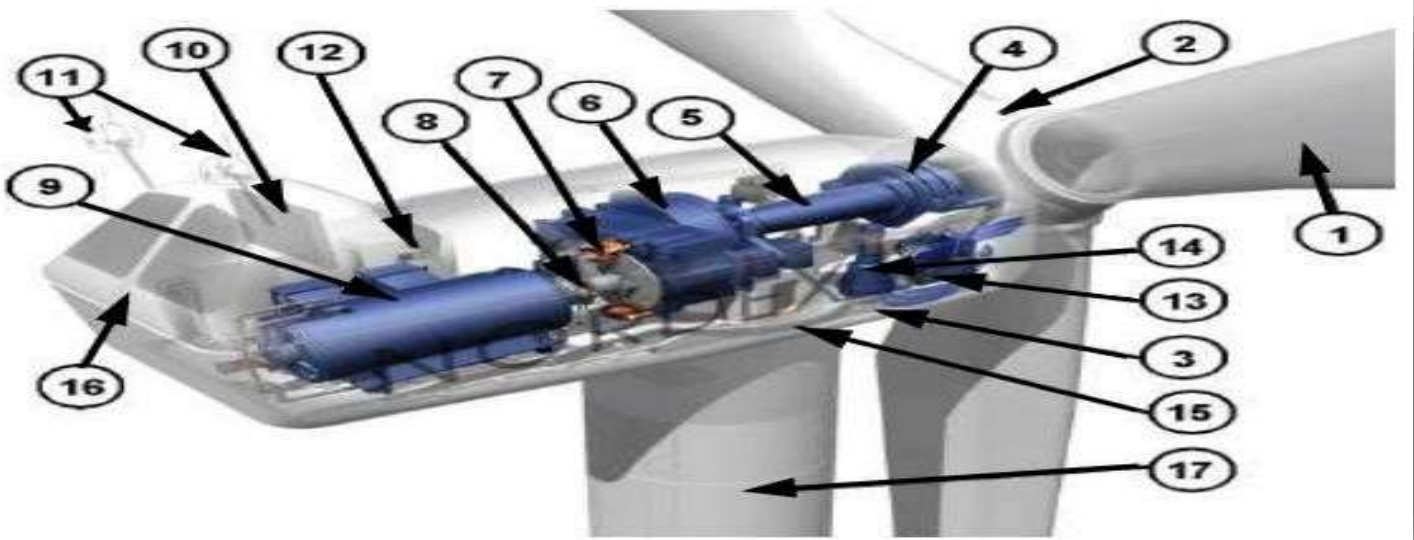


Fig I.6 : Principales composantes d'une éolienne à axe horizontal [08]

I.6 Les avantages et inconvénients de l'éolien:

L'énergie éolienne offre plusieurs avantages par rapport aux autres sources d'énergie qui lui permettent de croître et de s'épanouir, lui conférant un rôle important dans l'avenir si les répercussions négatives décrites ci-dessous sont évitées.

I.6.1 Avantages de l'éolien:

- ✓ Une énergie sans difficulté: Contrairement à l'énergie nucléaire.
- ✓ Une énergie renouvelable : Contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ Une énergie qui n'émet pratiquement pas de gaz à effet de serre.

I.6.2 Inconvénients de l'éolien

- ✓ Le bruit des éoliennes a deux sources: les sources mécaniques associées aux machines tournantes dans la nacelle
- ✓ L'impact visuel reste un sujet subjectif
- ✓ •L'impact sur les oiseaux: des collisions au niveau du mât, des pâles, dièses perturbations des secteurs de nidification et de séjour dièses oiseaux.

I.7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne Principe

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse [09]

I.7.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessite une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure. I.7) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [10].

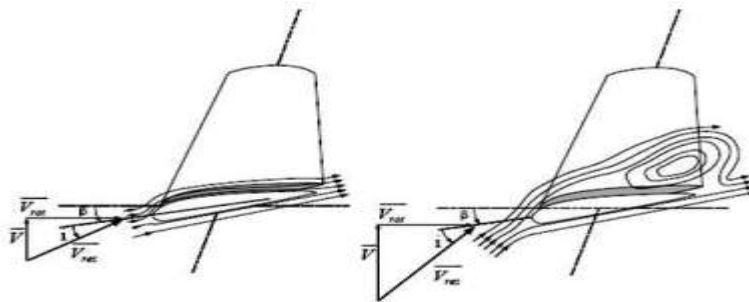


Fig I.7 : Flux d'air sur un profil de pale " Stall" [10]

I.7.2 Système d'orientation des pales « Pitch » :

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure. I.8) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. I.12) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [11].

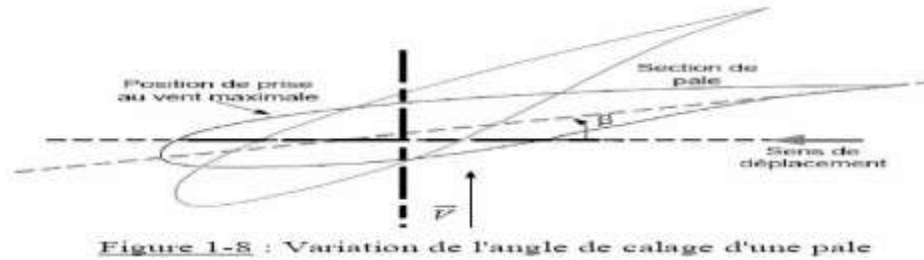


Figure 1-8 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Fig I.8 :Variation de l'angle de calage d'une pale [10]

I.8 État de l'art sur la conversion électromécanique :

I.8.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien. Une topologie consiste à relier la MAS à cage d'écureuil au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs statique, un multiplicateur est associé à la machine. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité [06].

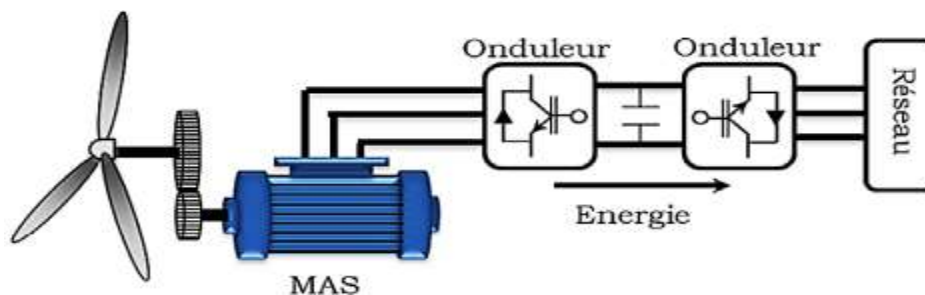


Fig I.9 : Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS

Tableau I.1: Avantages et inconvénients de l'éolienne utilisant une MAS [12]

Inconvénients	Avantages
La puissance extraite est non optimisée.	Elle possède un système électrique simple.
La magnétisation de la machine est imposée par le réseau	Elle possède une très grande fiabilité.
Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive	Elle est moins chère

I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable, le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

I.8.2.a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée:

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.16, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [13]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotoriques et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

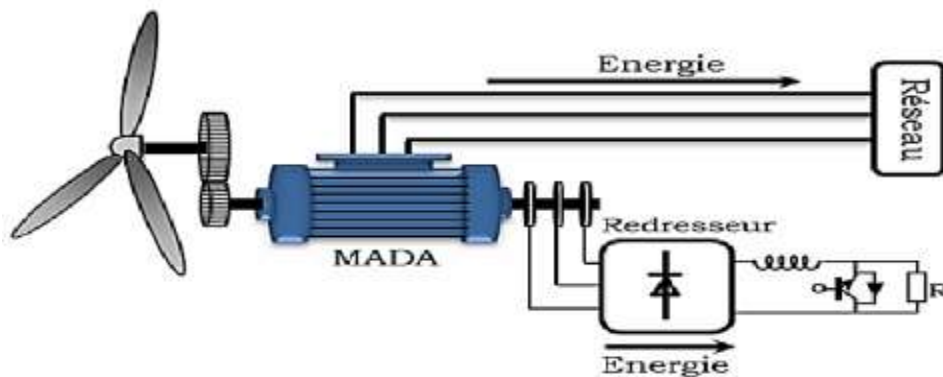


Fig I.10 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les

contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

I.8.2.b Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur:

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cyclo-convertisseur (Figure I.18) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure I.16 [14]

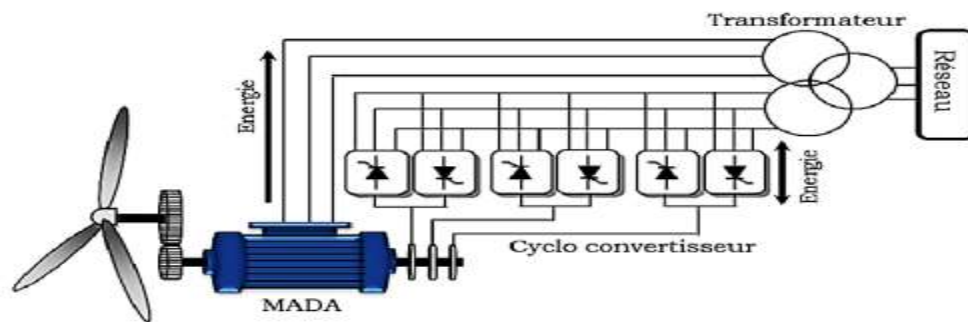


Fig I.11 : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

I.8.2.c Structure Back-to-back :

Ce choix de structure permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux magnétique et de la vitesse de la MADA du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau.

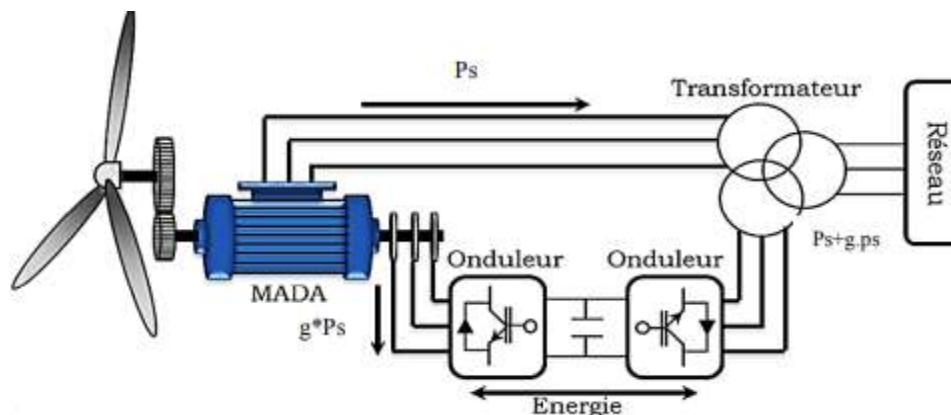


Fig I.12: MADA avec structure back-to-back.

Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants :

- ✓ Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système.
- ✓ Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat.

pâles orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 30% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans les convertisseurs sont peu importantes [15].

I.9 Conclusion :

L'énergie éolienne joue un rôle important dans l'approvisionnement énergétique futur dans de nombreuses régions du monde. Au cours des 12 dernières années, la technologie des éoliennes a atteint un niveau très fiable et sophistiqué. Le marché mondial en pleine croissance va entraîner d'autres améliorations, telles que des turbines éoliennes plus grandes ou de nouvelles applications de systèmes. Ces améliorations entraîneront de nouvelles réductions de coûts et, à moyen terme, l'énergie éolienne sera en mesure de concurrencer la technologie classique de production d'électricité à partir de combustibles fossiles.

Nous avons donné dans ce chapitre, un aperçu des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les capacités installées en puissance dans le monde.

Afin d'entamer l'étude du système éolien choisi, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la turbine éolienne et l'application de différentes commandes pour différents régimes de fonctionnement de l'éolienne.

Chapitre II :

MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

II.1 Introduction

Parmi les différentes technologies de production éolienne disponibles, les éoliennes à vitesse variable et à calage variable c.-à-d. à des pales orientables utilisant des génératrices asynchrones double alimentation sont les plus populaires dans le secteur d'énergie éolienne, en particulier pour les générateurs éoliens de grandes puissances [17], [18].

L'objet de ce deuxième volet sera dédié à la recherche de modélisation et de contrôle de l'éolienne. Dans un premier temps, nous présenterons le modèle de vent qui sera appliqué à la turbine, le modèle aérodynamique, mécanique du générateur. Ensuite, les différentes consignes appliquées afin d'extraire le maximum d'énergie électrique lors des basses vitesses et la commande pour limiter la capacité lors des fortes vitesses de vent seront également examinées. Enfin, des résultats de ruse seront présentés afin de valider les contrôles étudiés.

II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA

La GADA est une génératrice à induction à rotor bobiné dont les bornes de son stator sont connectées directement au réseau électrique et les bornes de son rotor sont connectées au même réseau par l'intermédiaire des deux convertisseurs statiques triphasés à IGBT ou à MOSFET à fréquence variable. Ces convertisseurs ne doivent traiter qu'une fraction (25 - 30 %) de la puissance totale pour assurer le contrôle complet du générateur. Grâce à la bidirectionnalité de ces convertisseurs la GADA peut fonctionner en mode hypo ou hyper synchrone [41], donc elle fonctionne sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent (Commande MPPT) et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées (pitch Control).

II.3 Modélisation de la turbine éolienne.

Le rôle principal des éoliennes est d'extraire une partie de la puissance disponible dans le vent est la convertir par ses pales en puissance mécanique agissant sur l'arbre lent du rotor de la turbine éolienne. Ensuite le multiplicateur de vitesse transforme la faible vitesse de rotation de l'éolienne en une vitesse de rotation élevée du côté du GADA afin d'atteindre une plage de vitesse appropriée pour le rotor.

Une éolienne parfaite ne peut pas extraire toute l'énergie disponible dans le vent. La puissance effectivement captée par le rotor de l'éolienne (P_{aer}) est définie par le coefficient de puissance C_p (ou le rendement) qui est le rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible dans le vent.

II.3.1 Modèle du vent appliqué au système.

Pour Turbine en sorte que la corde à vent fonctionne et produise de l'énergie utilisable, il lui fallait une source principale et fondamentale : l'énergie cinétique du vent. Le vent particulier joue un rôle essentiel pour la recherche concernant le système de conversion de l'énergie éolienne soufflante, car l'énergie éolienne est un événement de sa vitesse.

Dans cette étude, afin que notre GADA fonctionne en hypo et hyper synchrone et qu'on puisse aussi valider le contrôle d'orientation des pales (pitch control) nous avons choisi un profil de la vitesse du vent représenté par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [20], [21] :

$$V(t) = 9.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (II.1)$$

Avec : $\omega = \frac{\pi}{65}$

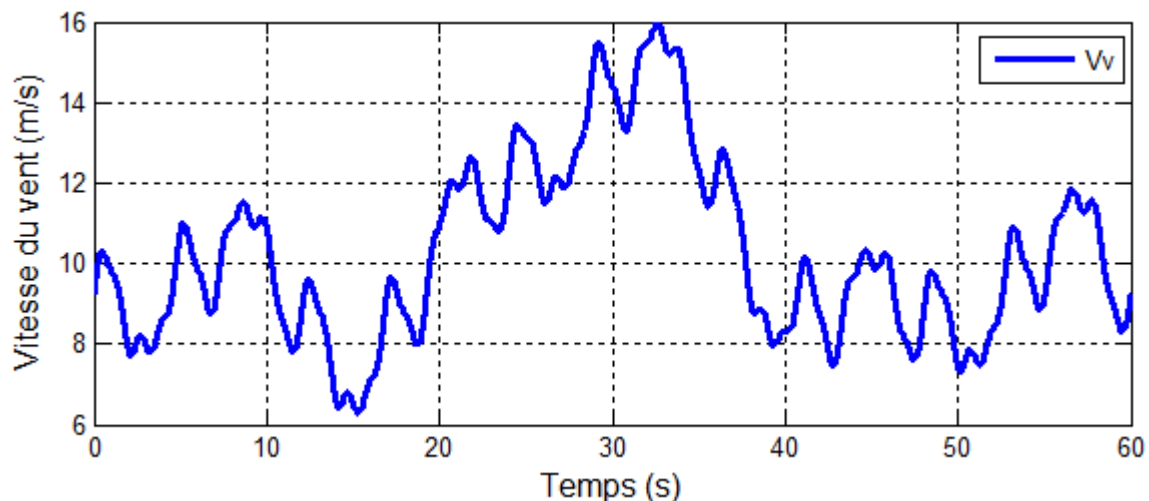


Fig II.1 : Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine

II.3.2 Modèle aérodynamique

La puissance aérodynamique d'une éolienne P_{aer} , en régime permanent selon la théorie de Betz peut être déterminée par [22]:

Où :

- ✚ ρ : Masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).
- ✚ S : Surface circulaire balayée par la turbine.
- ✚ V_v : Vitesse du vent.
- ✚ $C_p(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Le ratio de vitesse λ définit comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (\text{II. 3})$$

- ✚ Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine
- ✚ R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Généralement, le coefficient de puissance est fonction du rapport de vitesse de pointe et de l'angle de pas des pales. Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons une expression pour une éolienne de 2 MW, qui est donnée dans les travaux de recherche de [23]–[24]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{-2.14} - 13.2 \right) \cdot e^{\frac{-18.4}{\lambda_i}} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.2\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 5})$$

La figure II.2 montre la relation entre C_p , β et λ .

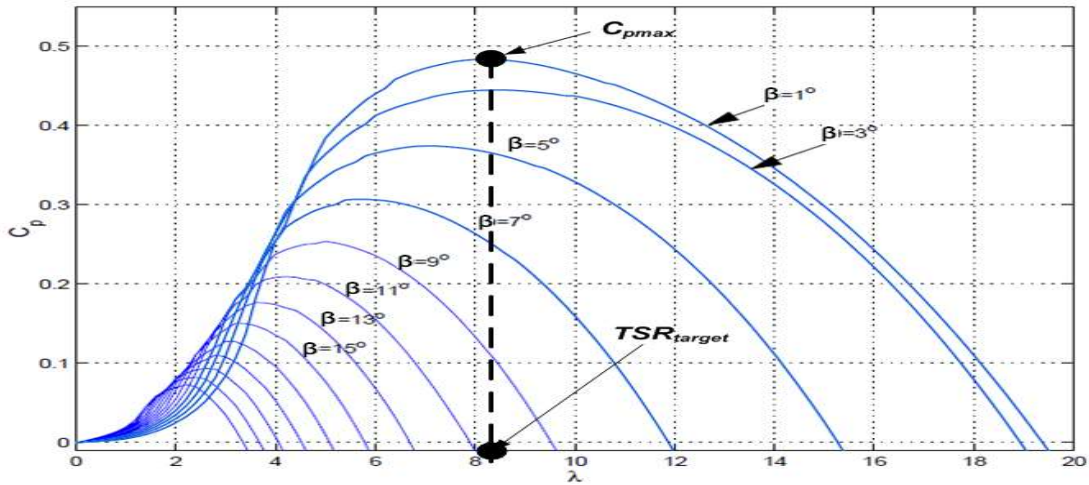


Fig II.2 : La relation entre C_p , β et λ

À partir de la vitesse de rotation de la turbine, nous pouvons définir le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine par l'équation suivante [25]:

$$C_t = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.6)$$

II.3.3 Modèle de la partie mécanique :

On considère que le système mécanique est caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques, on obtient un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.3).

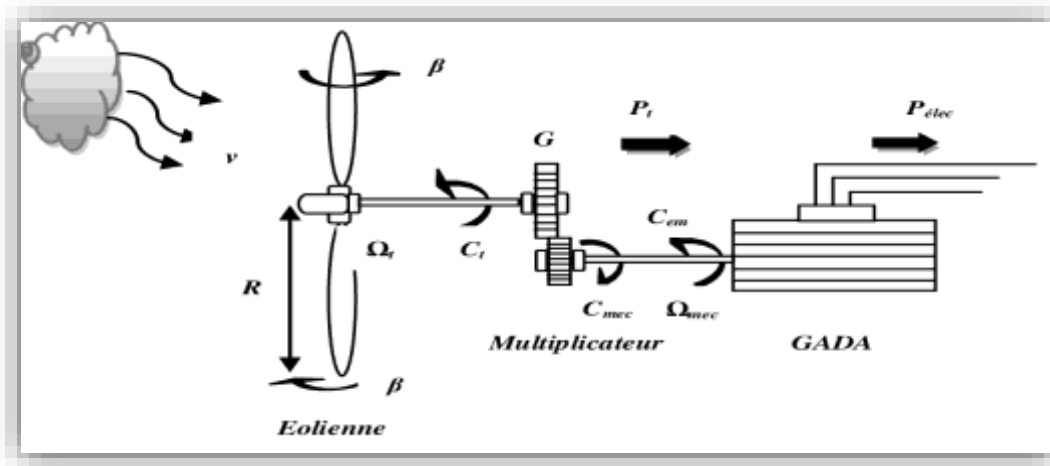


Fig II.3 : Partie mécanique

D'après la figure II.2 le multiplicateur est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II. 7})$$

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II. 8})$$

Et d'après la même figure, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la GADA peut être donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f_v \cdot \Omega_m \quad (\text{II. 9})$$

On pose : $J = \frac{J_t}{G^2} + J_m$

Avec :

- ✚ J : Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolien ;
- ✚ J_t : Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;
- ✚ J_m : Moment d'inertie de la GADA ;
- ✚ f_v : Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA ;
- ✚ C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la GADA ;
- ✚ C_{em} : Couple électromagnétique généré par la GADA ;
- ✚ G : Gain de multiplicateur ;
- ✚ Ω_m : Vitesse mécanique de rotation de la GADA ;
- ✚ $C_f = f \cdot \Omega_m$: Couple de frottement visqueux de la GADA ;

A partir des équations précédentes le schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne est représenté par la figure suivante :

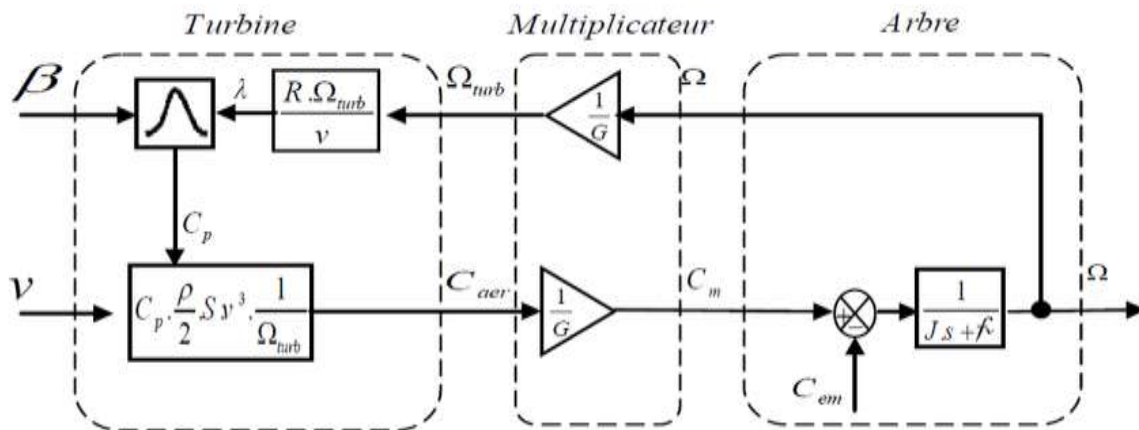


Fig II.4 : Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne

D’après le schéma bloc de la figure II.4, la vitesse mécanique de l’arbre de la GADA résulte de l’application du couple mécanique disponible à la sortie du multiplicateur auquel s’oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette vitesse peut donc être effectué soit par action sur l’angle d’orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II.4 Stratégie de commande de la turbine :

Comme il est illustré sur la figure II.5, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [25][26][27] .

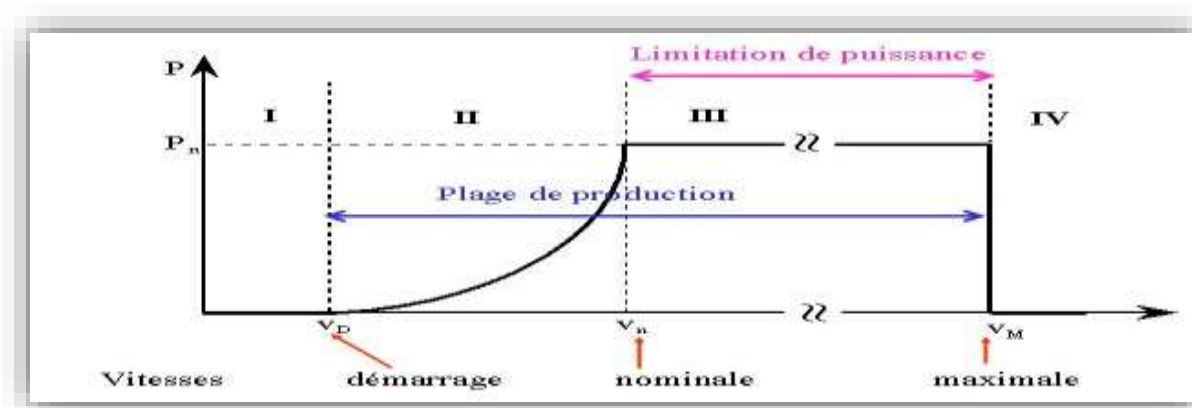


Fig.II.5 : Zones de fonctionnement de la turbine

- **Zone I :** C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- **Zone II :** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- **Zone III :** Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone IV :** Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (angle de calage), c'est le «**Pitch Control**».

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone II ou la maximisation de la puissance de la turbine extraite du vent peut être réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

II.4.1 Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT):

Pour mieux exploiter l'énergie disponible du vent, les éoliennes utilisées pour les angles de production d'électricité doivent produire un maximum de puissance. Par conséquent l'objectif principal de la commande dans le fonctionnement de la zone II est de maximiser la capture de l'énergie éolienne à différentes vitesses du vent, ce qui peut être obtenu en ajustant la vitesse de rotor de l'éolienne en contrôlant le couple électromagnétique du GADA de telle sorte que la relation optimale des angles vitesse spécifique λ_{opt} est conservée.

On peut distinguer deux stratégies de contrôle d'extraction de puissance maximale (MPPT) [28], [29]–[30] :

- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.1.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation :

Dans le fonctionnement pratique, il est très difficile de mesurer les angles vitesse du vent car l'anémomètre reste situé derrière le rotor de l'éolienne et le diamètre balayé par l'ensemble des pales de l'éolienne est très crucial. Dans ces circonstances, on utilise un contrôle sans servomécanisme de la vivacité de rotation qui est basé en allant sur l'hypothèse que les angles vitesse du vent ne varient pas trop vite devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le terme d'accélération des angles turbine est probablement prévu comme nul. De plus, si l'on néglige l'effet man couple dû aux frottements visqueux. L'équation mécanique (II. 9) du principe éolien peut s'écrire comme suit [31], [32]:

$$J \frac{d}{dt} \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II. 10)$$

$$C_m = C_{em} \quad (II. 11)$$

Le principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation est basé sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice, donc à partir de cette mesure on peut estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II. 12)$$

A partir des équations (II.12) et (II.3), on estime la valeur de la vitesse du vent comme suit :

$$V_v = \frac{R \cdot \Omega_{t_est}}{\lambda} \quad (II. 13)$$

Avec la connaissance d'une estimation de la vitesse de rotation de la turbine (Eq. II.12) et l'estimation de la vitesse du vent (Eq. II.13), le couple de la turbine éolienne peut ensuite être exprimé par :

$$C_{t_est} = \frac{1}{2 \Omega_{t_est}^3} \rho \cdot S \cdot V_{v_est} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II. 14)$$

En remplaçant les équations (II.12) et (II.13) dans (II.14), on obtient une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2 \cdot G^3 \lambda_{OPT}^3} \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot V_{v_est} \cdot \Omega_m^2 \quad (II. 15)$$

Afin d'obtenir le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} pour obtenir le maximum du coefficient de puissance C_{pmax} .

Grâce au contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la GADA.

Selon les équations précédentes, Le schéma bloc présente le principe du contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation est illustré par la figure suivante [30], [31].

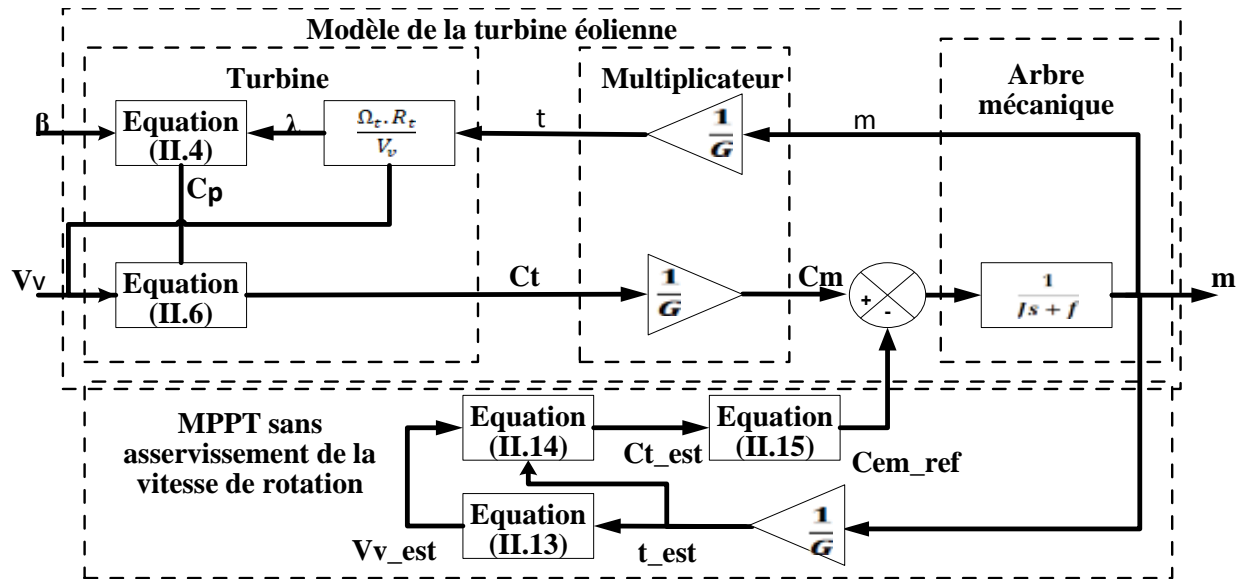


Fig II.6 : Contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation

II.4.1.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation :

Afin que la puissance mécanique soit maximale la valeur du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ doit être maximale. Celle-ci est obtenue avec la fixation de la valeur de la vitesse spécifique à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$).

Selon l'équation II.3, la vitesse de rotation de référence de la turbine est définie comme suit :

$$\Omega_{t_ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R_t} \quad (II.15)$$

En tenant compte du gain du multiplicateur, on peut déduire la référence de la vitesse de rotation de la GADA :

$$\Omega_{m_ref} = G\Omega_{t_ref} \quad (II.16)$$

Le principe de ce diagramme de commande est illustré à la Figure II.5, où la vitesse du vent est mesurée V_v permet d'élaborer la consigne de vitesse du générateur Ω_m_ref en fonction du rapport de vitesse spécifique optimal. La vitesse du générateur Ω_m est contrôlée par des transducteurs et sera égale à la référence de régime permanent, où le MPPT est atteint. Dans ce travail, et pour régler la vitesse dans ce mode de régulation, nous avons utilisé un régulateur de type : type PI

Dans l'industrie, les algorithmes de contrôle de processus les plus couramment utilisés sont sans aucun doute le contrôleur PI, en raison de sa simplicité en termes de structure, qui peut être facilement compris et mis en œuvre de manière pratique. Ce type de régulateur est une Combinaison d'action proportionnelle et intégrale. Elle a pour effet d'améliorer simultanément les états stable et transitoire [33], [34]. Ce contrôleur PI calcule une valeur "d'erreur" comme étant la différence entre une variable de processus mesurée et un point de consigne souhaité.

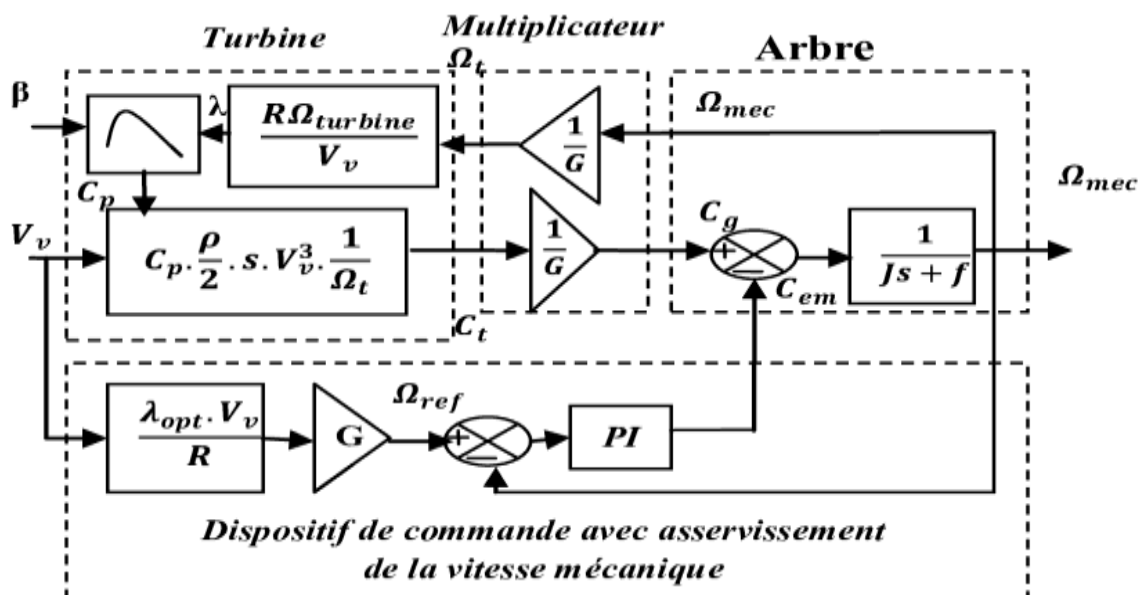


Fig II.7 : Contrôle MPPT du système éolien sans asservissement de la vitesse de rotation

Le rôle du contrôleur est de minimiser l'erreur entre la valeur de référence et la valeur mesurée de la vitesse mécanique en contrôlant le couple électromagnétique de la génératrice. Pour la synthèse du régulateur utilisé nous avons choisi la méthode de compensation des pôles.

II.4.1.3 Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs flous

La méthode de commande par logique floue permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies ou bien sans connaître exactement les paramètres du système à commander. Le Régulateur par Logique Floue (RLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais elle utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Avec les expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique donné, il est possible de construire des inférences avec plusieurs règles.

Nous allons présenter, les bases générales de la structure de la commande par la logique floue et la procédure générale de la conception d'un réglage par cette commande. Nous allons donner quelques avantages et inconvénients et on va détailler les démarches de la conception d'un RLF pour commander la vitesse de la turbine.

a) Avantages et inconvénients de la commande par logique floue

La commande par logique floue a comme les autres commandes un certain nombre d'avantages et de désavantages. Ces avantages essentiels sont :

- ❖ La non-nécessite d'une modélisation ;
- ❖ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus, en outre la maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-Linéaire et difficile à modéliser et
- ❖ L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur)

Les inconvénients de la commande par logique floue sont :

- ❖ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzication) ;
- ❖ Implémentation des connaissances des opérateurs souvent difficile ;
- ❖ L'absence d'un modèle valable pour démontrer la stabilité du circuit de réglage en toute généralité ;
- ❖ La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non linéaire et

❖ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

b) Conception des régulateurs flous pour le réglage de la vitesse de rotation

La figure II.8 montre le schéma fonctionnel du système implémenté avec le contrôleur flou. Dans ce cas, le contrôleur flou possède deux entrées et une sortie. Les deux grandeurs d'entrée sont l'erreur (E) entre la vitesse de référence et la vitesse mesurée et le changement d'erreur (ΔE) et la grandeur de sortie est le couple de référence électromagnétique.

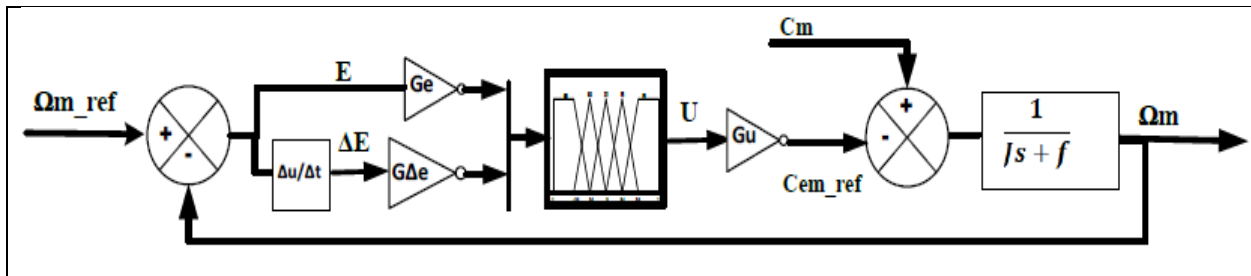


Fig II.8 : Régulation de la vitesse mécanique en boucle fermée à l'aide d'un contrôleur flou.

D'après le schéma bloc de régulation de vitesse, G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u sont des gains associés à E , ΔE et U respectivement. Ces gains jouent un rôle d'assurer la mise en échelle, la stabilité et établir les performances dynamiques et statiques désirées.

Dans ce travail nous avons mené pour les variables d'entrées et la variable de sortie un régulateur flou de trois ensembles, dans le but de trouver les bonnes performances souhaitées pour le réglage, représenté ainsi par des fonctions d'appartenance comme le montre le tableau II.1.

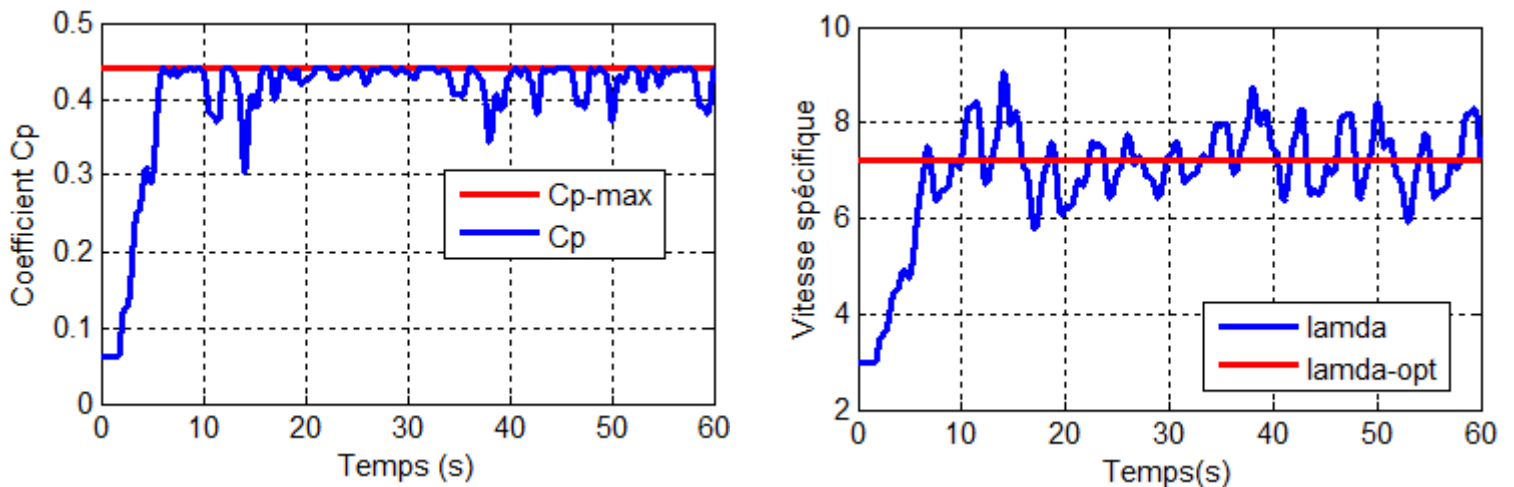
Tableau II.1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques.

Commande		Erreur		
		N	EZ	P
Dérivée de l'erreur	N	N	N	EZ
	EZ	N	EZ	P
	P	EZ	P	P

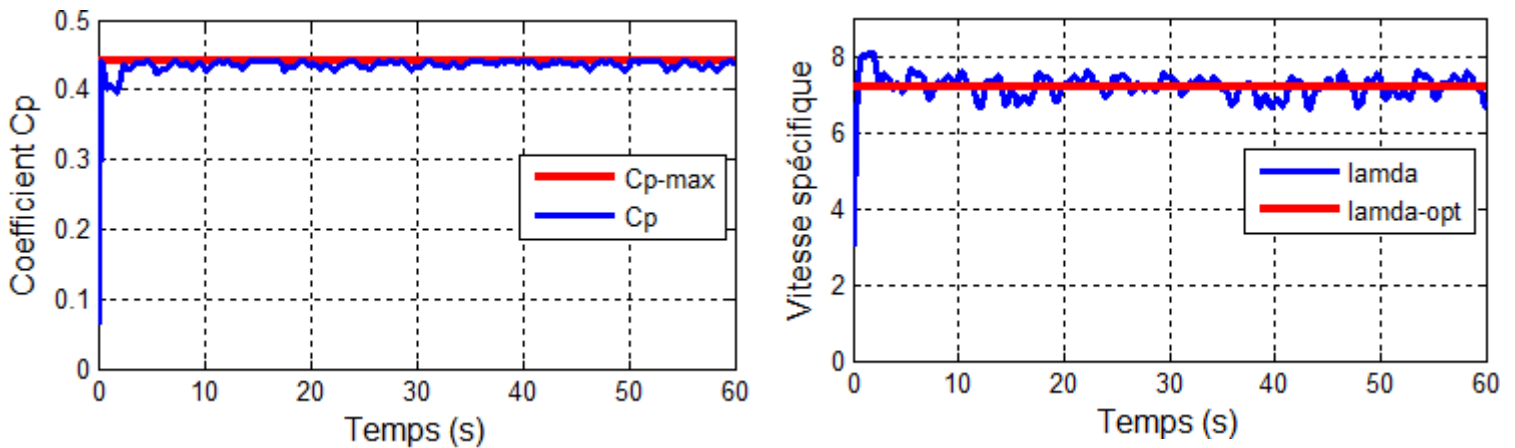
II.5 Résultats de simulation :

Pour vérifier l'efficacité et la fiabilité des méthodes de contrôle proposées pour une éolienne de 2 MW dont les paramètres sont donnés dans l'annexe, nous les avons simulées sous Matlab/Simulink en considérant le profil de vent de la figure II.1. Les résultats obtenus par les trois stratégies de commande MPPT seront exposés (sans asservissement de la vitesse, avec asservissement de la vitesse et commande par logique floue).

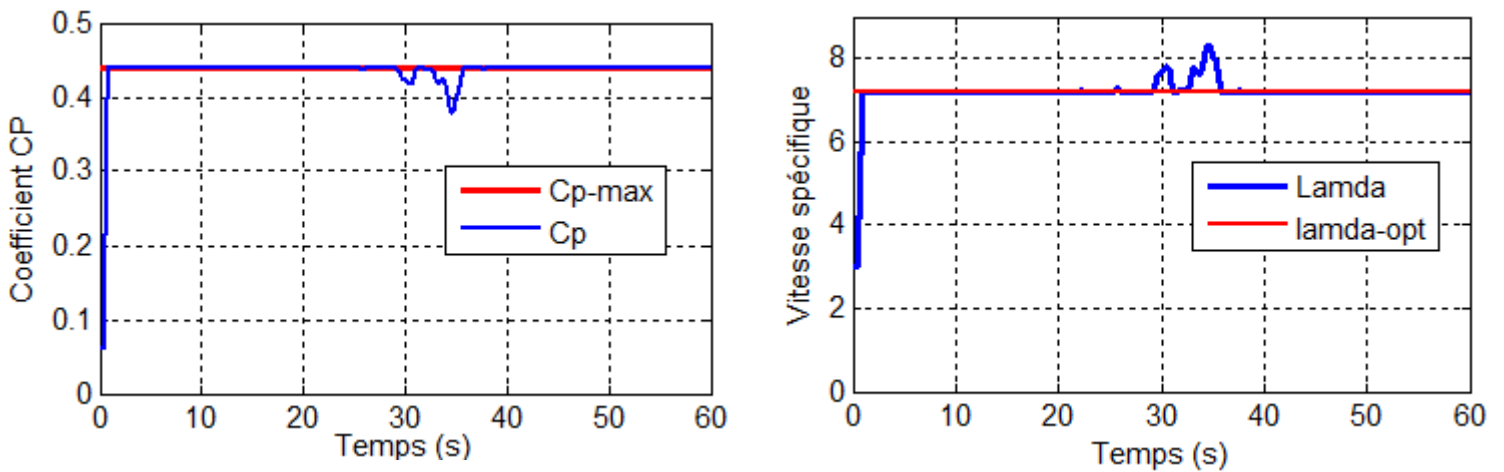
La figure II.9 illustre l'évolution du coefficient de puissance et la vitesse spécifique en fonction du temps pour les trois commandes. D'après les résultats de simulation, on constate que le coefficient de puissance et le rapport de vitesse de la méthode indirecte basée sur la logique floue sont ajustés à leurs valeurs optimales et moins fluctuant par rapport aux autres méthodes ou il y a une fluctuation entre les valeurs de références et les valeurs désirées. Et on constate aussi que la valeur du C_p ne dépasse pas la valeur maximale donnée par le constructeur qu'est égale 0.44 pour les trois commandes.



(A) Commande MPPT sans asservissement de la vitesse



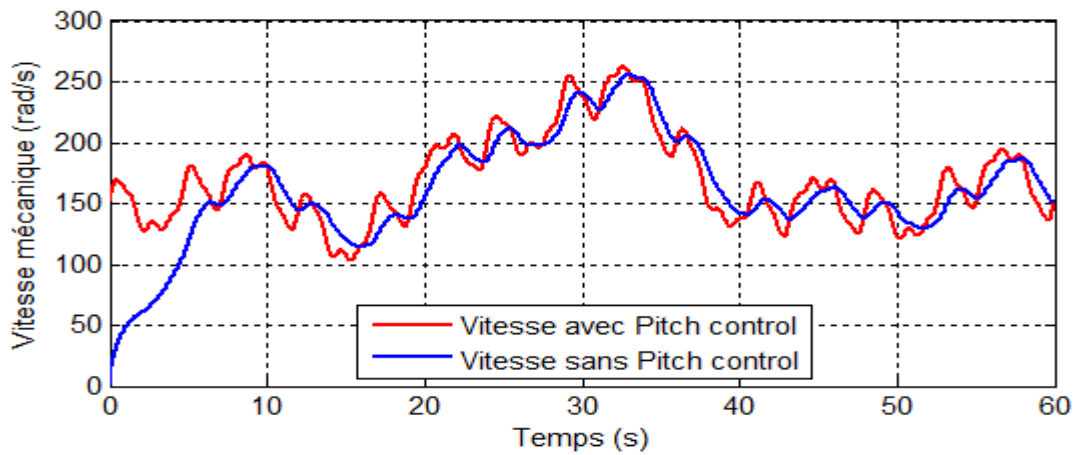
(B) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI



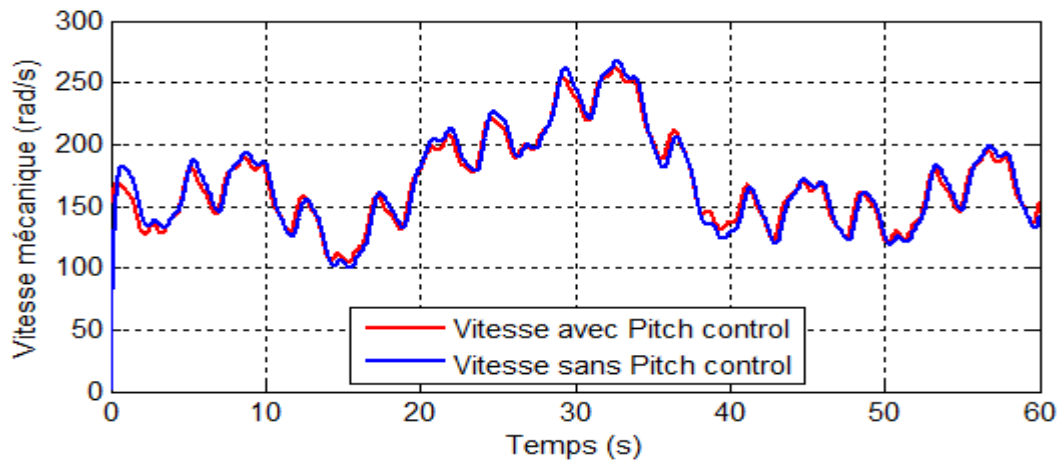
(C) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs flous

Fig.II.9 Coefficient de puissance C_p (λ , β) et Vitesse spécifique λ

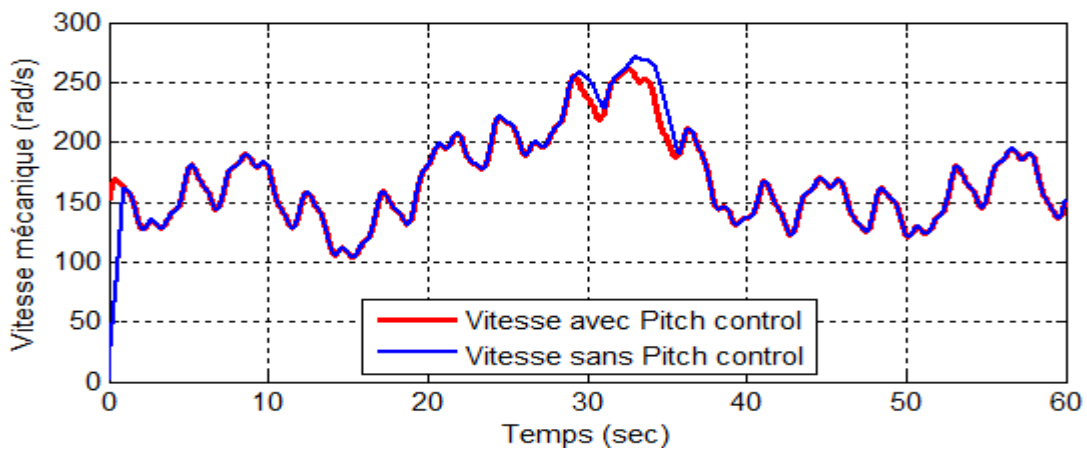
Les figures ci-dessous présentent l'évolution temporelle de la vitesse mécanique de la turbine éolienne pour les trois commandes étudiées. On constate que la variation de la vitesse de la GADA est adaptée à la variation de la vitesse du vent.



(A) Commande MPPT sans asservissement de la vitesse



(B) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI



(C) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs flous

Fig.II.10 Vitesse mécanique Ω_m

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique simplifié de la turbine éolienne. Ensuite, nous avons traité la question de la commande MPPT d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable, en utilisant deux méthodes de contrôles MPPT, c'est-à-dire la méthode directe et la méthode indirecte. Cette dernière est basée sur deux régulateurs, l'une de type PI et l'autre par la logique floue.

Par ailleurs, notre travail consiste à développer et étudier la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation et la commande vectorielle de cette dernière sera étudiée dans le prochain chapitre.

Chapitre III :

MODELISATION ET COMMANDE

DE LA GENERATRICE

ASYNCHRONE DOUBLE

ALIMENTATION (GADA)

III.1 Introduction

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : à axe vertical et à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont plus largement utilisées que les éoliennes à axe vertical. Les éoliennes à axe vertical sont divisées en deux types : vitesse fixe et vitesse variable. Ce dernier est le plus couramment utilisé pour produire de l'électricité la grille. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesse, permettant un maximum de puissance consommée pour les faibles vitesses de vent et la puissance de maintien à vitesse constante du vent. Dans le cadre de notre travail, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Ce chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA.

III.2 Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Son rotor n'est par contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [36]. Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.

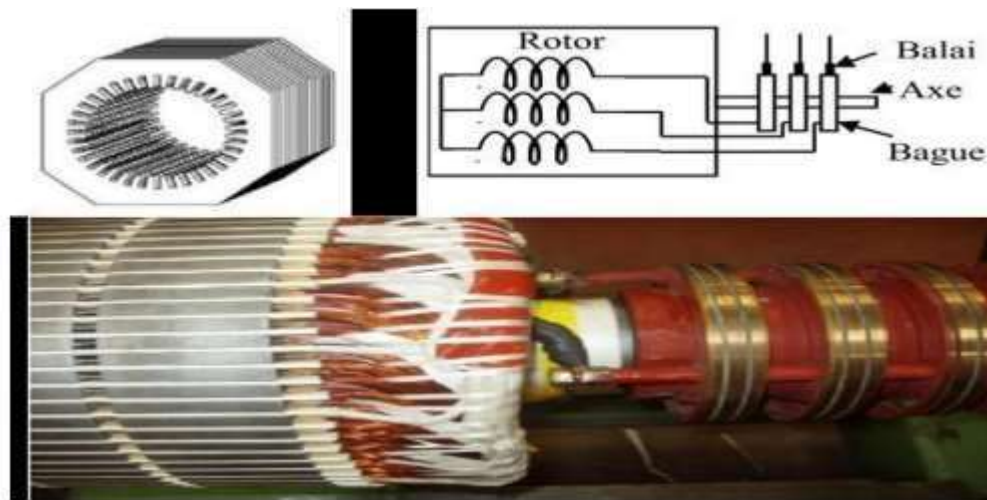


Fig III.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA

III.3 Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

III.3.1 Application moteur (MADA) :

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



Fig III.2 : Moteur Asynchrone Double Alimentation (MADA)

III.3.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la GADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

III.4 Modélisation de la générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA)

III.4.1 Représentation de la GADA dans repère triphasé (abc) :

La figure III.3 représente les enroulements statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [37]

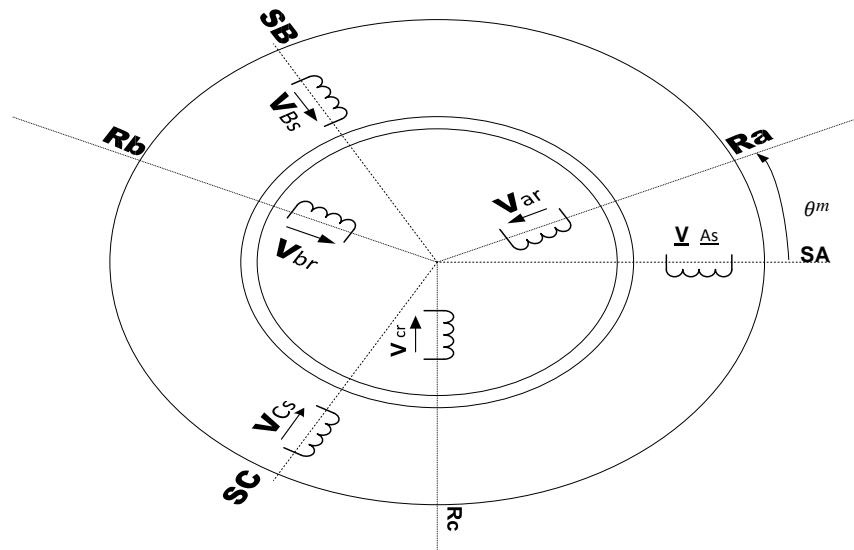


Fig III.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

Ces enroulements sont une représentation idéale de la génératrice réelle, ce qui aide à dériver un circuit électrique équivalent, comme le montre la figure III.4.

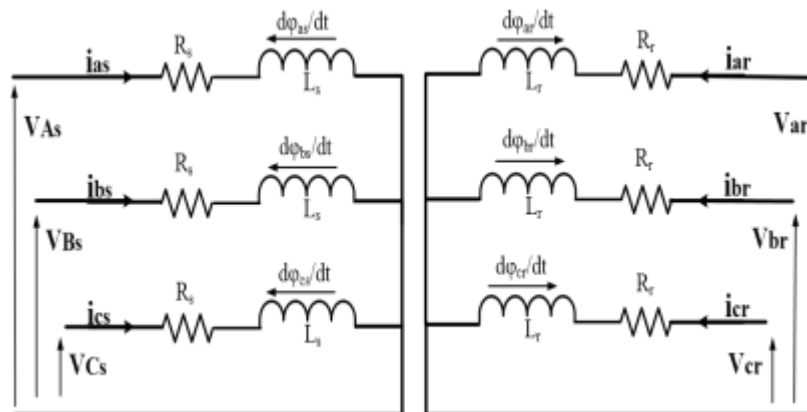


Fig III.4 : Circuit électrique équivalent de la GADA

III.4.1.1 Équations électriques

Dans ce modèle idéalisé, les tensions instantanées du stator, le courant et les flux de la génératrice peuvent être décrites par le système d'équations électriques suivant :

$$\begin{aligned} V_{as}(t) &= R_s i_{as}(t) + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs}(t) &= R_s i_{bs}(t) + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs}(t) &= R_s i_{cs}(t) + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

Où :

- R_r est la résistance du rotor.
- $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$ sont les courants rotoriques des phases a, b et c.
- $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_c(t)$ sont les tensions rotoriques appliquées.
- $\varphi_a(t)$, $\varphi_b(t)$ et $\varphi_c(t)$ sont les flux de rotor.

En régime permanent, les amplitudes du rotor ont une fréquence angulaire constante ω_r .

Dans la plupart des applications, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau électrique supposé stable donc ω_s reste constante. Cette fréquence est également appelée fréquence synchrone. Cependant, ω_r dépend évidemment de la vitesse électrique de l'arbre ω_m , ce qui conduit à trois modes de fonctionnement de la machine en fonction de la vitesse :

- $\omega_m < \omega_s \Rightarrow \omega_r > 0 \Rightarrow g > 0$ **hypo synchrone**
- $\omega_m > \omega_s \Rightarrow \omega_r < 0 \Rightarrow g < 0$ **hyper synchrone**
- $\omega_m = \omega_s \Rightarrow \omega_r = 0 \Rightarrow g = 0$ **synchrone**

Ou de manière plus raccourcie :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (\text{III.2})$$

$$[V_{rabc}] = [R_s] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{III.3})$$

III.4.1.2 Equations magnétiques :

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

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}] [i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (III. 4)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}] [i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \quad (III. 5)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix}; [L_{rr}] = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix}; [R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}; [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{rs}] = [M_0] = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (III. 6)$$

- L_s et L_r : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques
- M_s et M_r : sont les inductances mutuelles entre deux phases stator-stator et rotor-rotor.
- $M_{1,2,3}$: Inductance mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phase rotorique ;
- $[L_s]$ et $[L_r]$: Matrices des inductances cycliques statorique et rotorique.
- $[R_s]$ et $[R_r]$: Matrices des résistances propres statorique et rotorique.
- $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$: Matrices des inductances mutuelles du couplage entre stator et rotor ;
- M_{max} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
- θ : L'écart angulaire entre une phase statorique et une phase rotorique.

III.4.1.3 Equation mécanique

L'étude de la GADA fait introduire des variations non seulement des paramètres électriques mais aussi des paramètres mécaniques.

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

$$C_{em} = \mathbf{p} [\mathbf{i}_{sabc}]^t \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot [[\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{i}_{rabc}]] \quad (\text{III. 7})$$

L'équation mécanique est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - C_f \quad (\text{III. 8})$$

On peut alors noter que la tension, le courant et la matrice d'inductance mutuelle sont dérivés dans le cadre de référence stationnaire (abc) et dépendent du temps. La modélisation et l'analyse d'un tel système étant difficiles à gérer, les paramètres de la variante temporelle peuvent être rendus invariants en les transformant en un cadre de référence rotatif approprié.

Il a été mentionné que les paramètres de la machine doivent être transformés en un repère de référence rotatif approprié.

Pour résoudre ce problème de non linéarité de ce système, on fait des changements de variable qui réduisent la complexité de ce dernier. Pour notre GADA, ce changement consiste à transformer les six enroulements relatifs aux trois phases statoriques et aux trois phases rotoriques à des enroulements orthogonaux d-q tournant à une vitesse ω_s .

Cet objectif peut être atteint en définissant le cadre de référence d-q, qui tournera à la vitesse angulaire synchrone du système. Cette transformation est caractérisée par une matrice de rotation dite : matrice de Park telle que la figure suivante illustre :

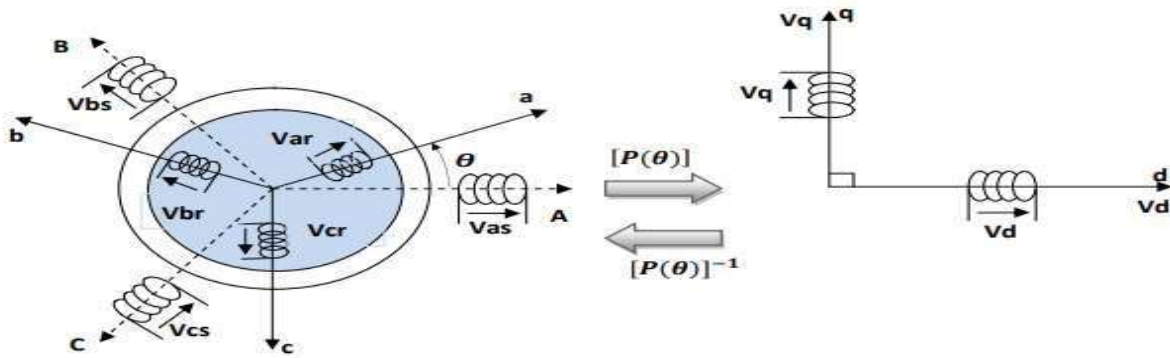


Fig III.5 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse (Transformation du Park)

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

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][x_{abc}] \quad (III. 9)$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (III. 10)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (III. 11)$$

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur parmi les vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques.

En supposant que le système est équilibré, donc la composante homopolaire nulle, les équations dynamiques d'un GADA triphasé peuvent être écrites dans un cadre de référence à quadrature directe (d-q) en rotation synchrone comme :

$$V_{sd} = R_s i_s + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{abc}\varphi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_{abc}\varphi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_s i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_{abc}\varphi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_s i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_{abc}\varphi_{rd}$$

Où :

- $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$ sont respectivement les tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques ;
- $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$ sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques ;
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ sont respectivement les flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.

Le flux total qui traverse chaque bobine du stator peut être décomposé en flux propre de la même bobine et des flux mutuels provenant des autres bobines.

$$\varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd}$$

$$\varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rd}$$

$$\varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd}$$

$$\varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq}$$

- L_s, L_r : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la GADA,

➤ : l'inductance mutuelle.

L'expression du couple électromagnétique est donnée comme suit

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{III.12})$$

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation de repère d'axe diphasé qui dépend de la vitesse de rotation du référentiel choisi. Il existe trois repères biphasés de références :

- ✚ Le repère fixe au stator,
- ✚ Le repère fixe au rotor,
- ✚ Le repère fixe au champ tournant.

Si on choisit le repère d-q lié au champ tournant, le système devient :

$$V_{sd} = R_s i_s + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \varphi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_s i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \varphi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_s i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \varphi_{rd}$$

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}$$

$$Q_s = V_{sd} I_{sq} - V_{sq} I_{sd}$$

III.5 Schéma bloc réduit de la GADA :

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les

grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance optimal [38].

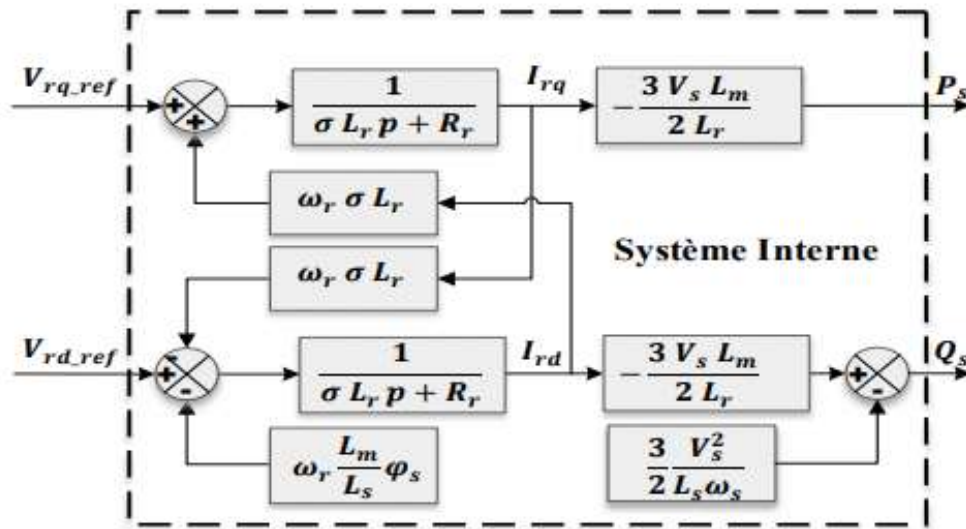


Fig III.6 : Schéma bloc du système à réguler.

III.6 Commande directe

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

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

- ✓ Le problème de filtrage du signal mesuré.
- ✓ La mesure varie en fonction de la température.
- ✓ Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...). Cette commande n'est donc pas optimale [39].

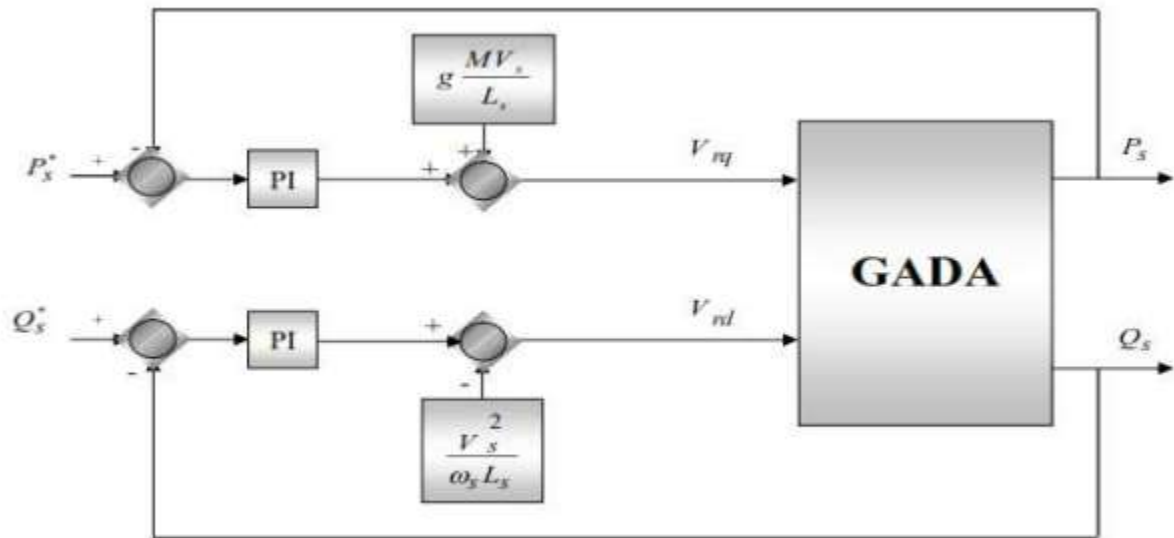


Fig III.7 : Schéma de principe de la commande directe

III.6.1 .Synthèse des régulateurs PI

Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) utilisé pour commander la GADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [29] C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de régulation éolien. La figure III.8 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + k_i S$

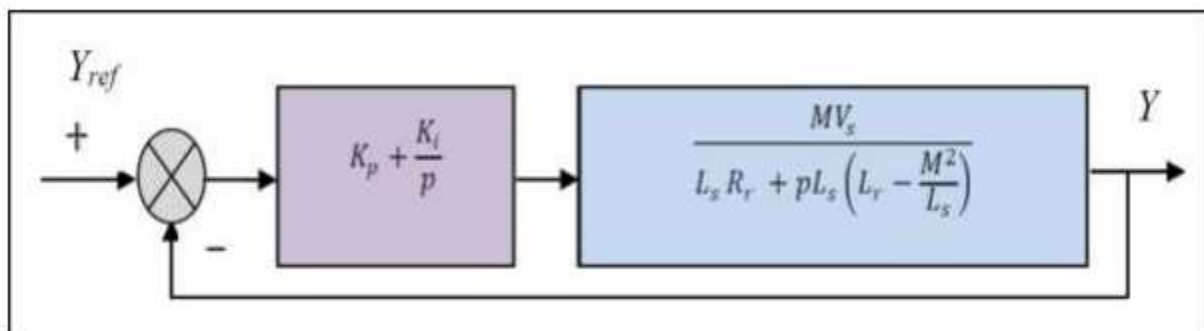


Fig III.8 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI

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

$$FTBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s(l_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}} \quad (III.13)$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = F_0(t) = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.14)$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{V_s M}{L_s(l_r - \frac{M^2}{L_s})}}{\frac{s}{K_p}} \quad (III.15)$$

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

III.7 Convertisseur MLI

Le rotor de la GADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposée constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur [40]

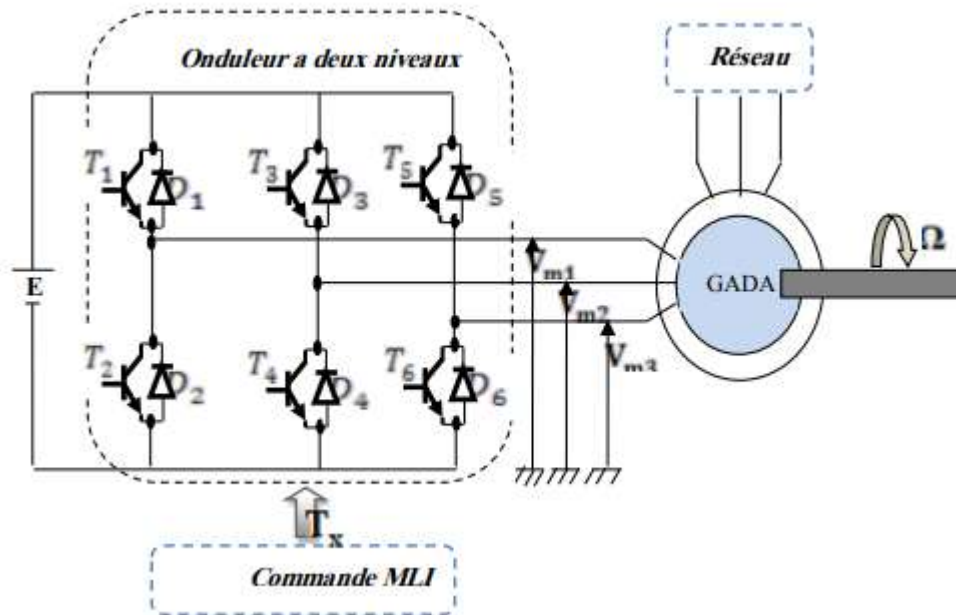


Fig III.9 : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI

III.7.1 Onduleur a deux niveaux

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

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables. La (Fig. III.10), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [41].

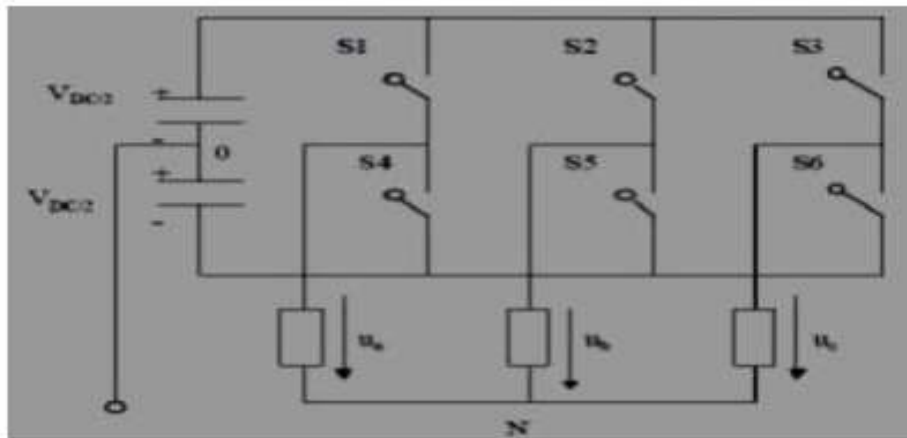


Fig III.10 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

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

➤ **Branche1 :**

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

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

➤ **Branche2 :**

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

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

➤ **Branche3 :**

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

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

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

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

D'où on obtient :

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

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie [41].

III.7.2 Principe de la MLI :

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

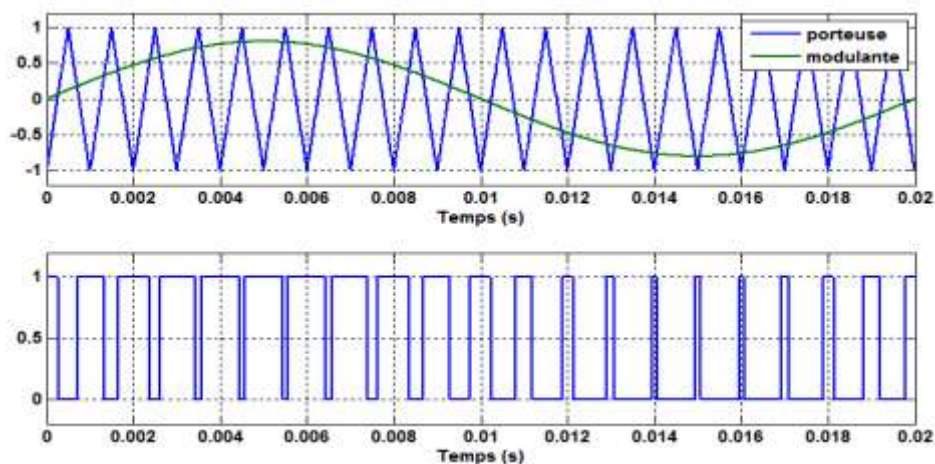


Fig III.11 : Principe de la MLI

III.8. Résultats de simulation :

Afin de voir et valider le comportement de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA de puissance 2 MW, cette dernière a été simulée sous Matlab/Simulink. Les paramètres de la génératrice sont indiqués dans le tableau A.2 dans l'annexe [42], Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park dans le référentiel liée au champ tournant. La machine est alimentée directement par deux sources de tensions triphasé parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau 50 Hz et une valeur efficace de 690V (Fig. III.3), et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $25 \cdot \sqrt{2}$ V et une fréquence égale à la fréquence rotorique. Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse en hypo synchrone fixe 130 rad/s puis à une vitesse de synchronisme 220 rad/s, ensuite à une autre vitesse fixe 220 rad/s en hyper synchrone comme illustré dans la figure III.13.

Le schéma de la simulation est implémenté sous l'environnement MATLAB/Simulink, elle est de la forme de la figure suivante (Fig III.12)

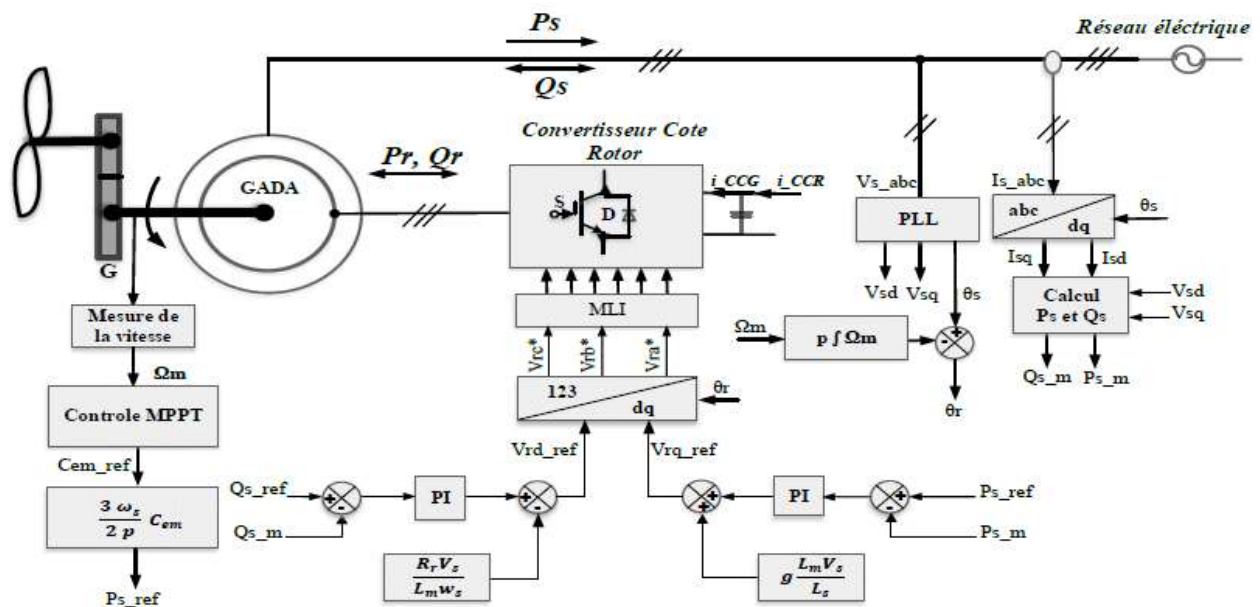


Fig III.12 : Schéma bloc de la commande de la GADA basée sur l'orientation du flux statorique

On constate que l'amplitude des tensions rotoriques reste constante mais leur fréquence change avec le changement de la vitesse mécanique.

III.8.1 Cycle du vent 1

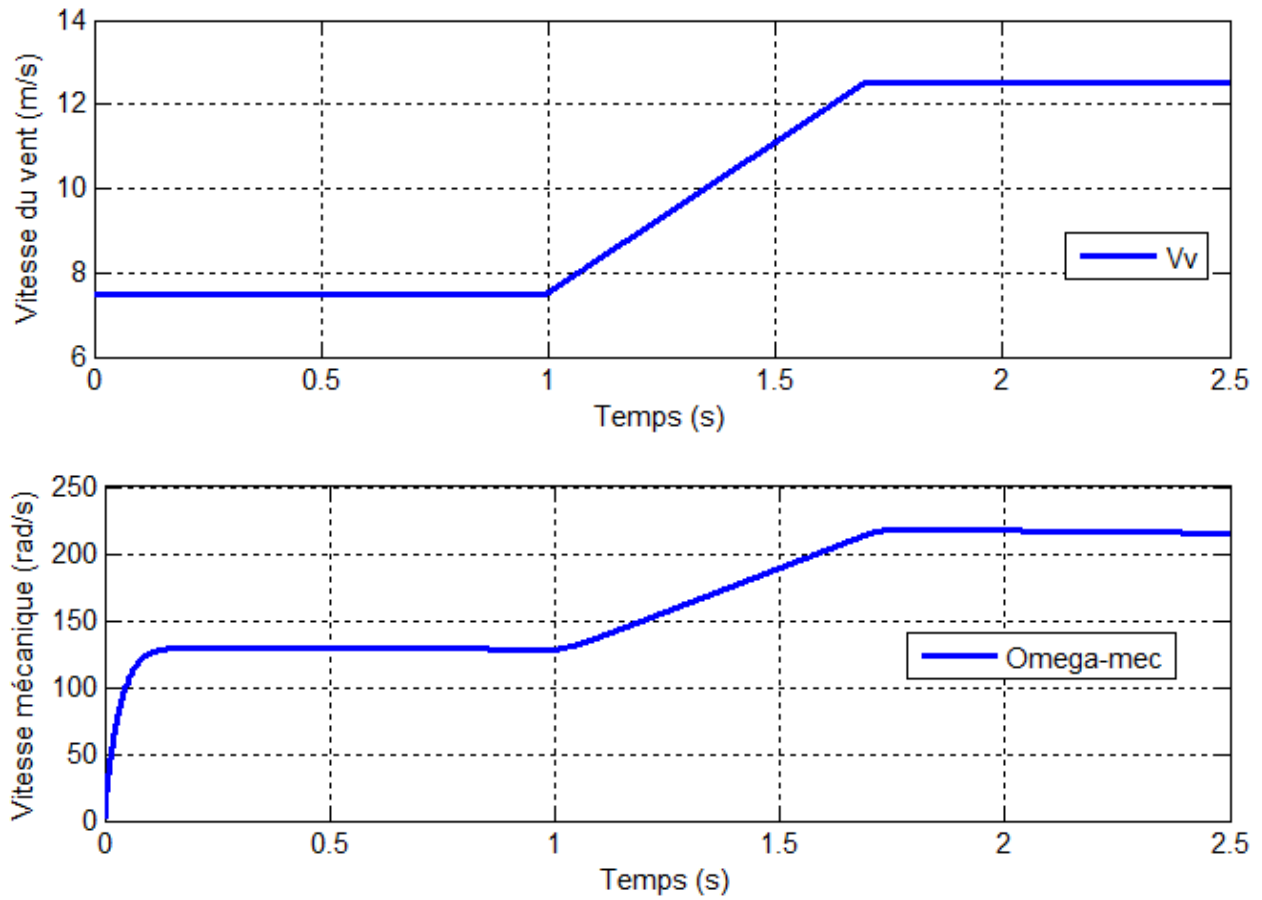
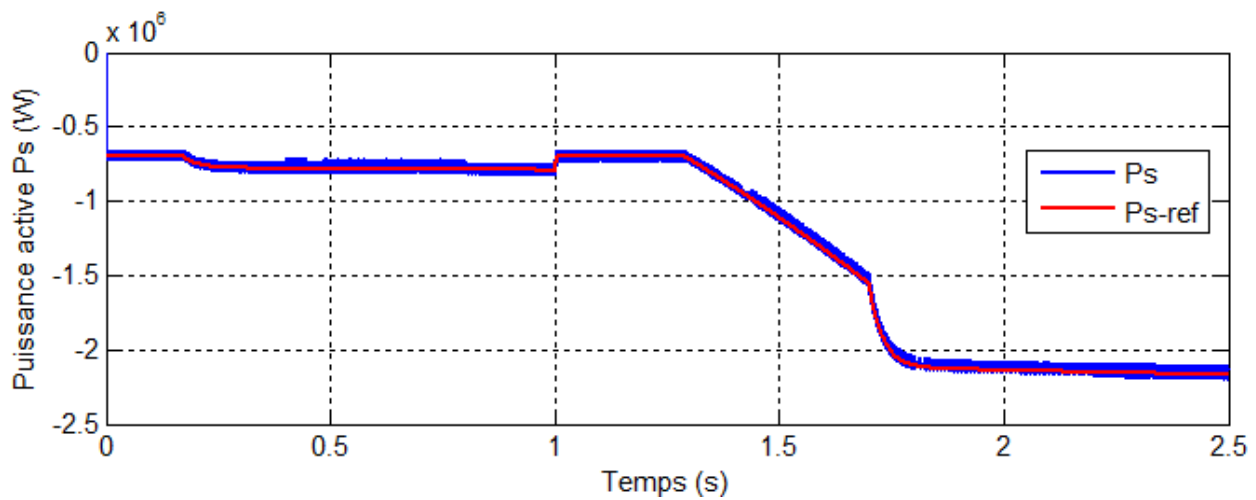


Fig.III.13 Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA



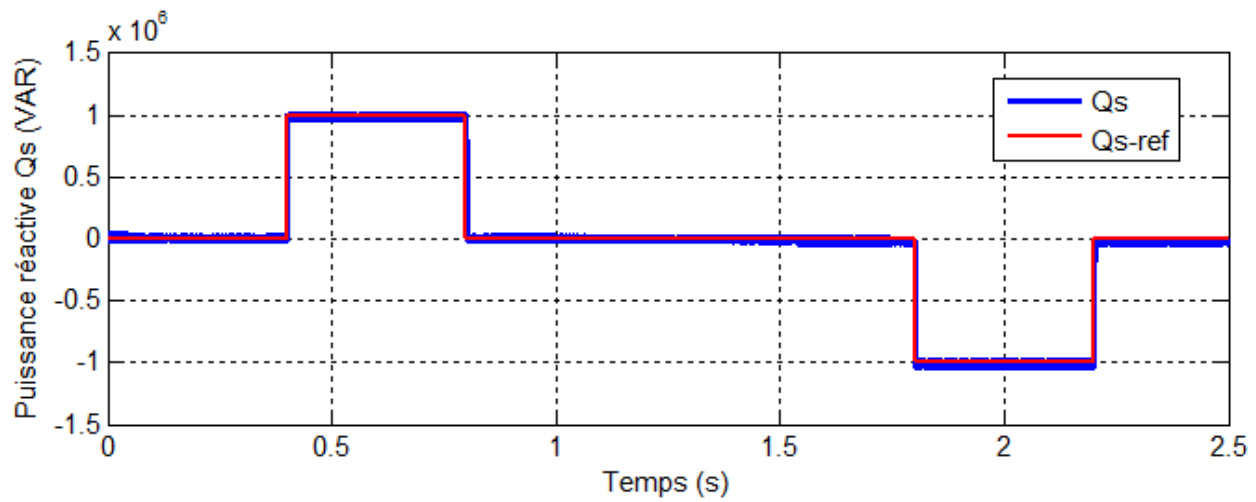


Fig.III.14 Puissances active et réactive statoriques et leurs références

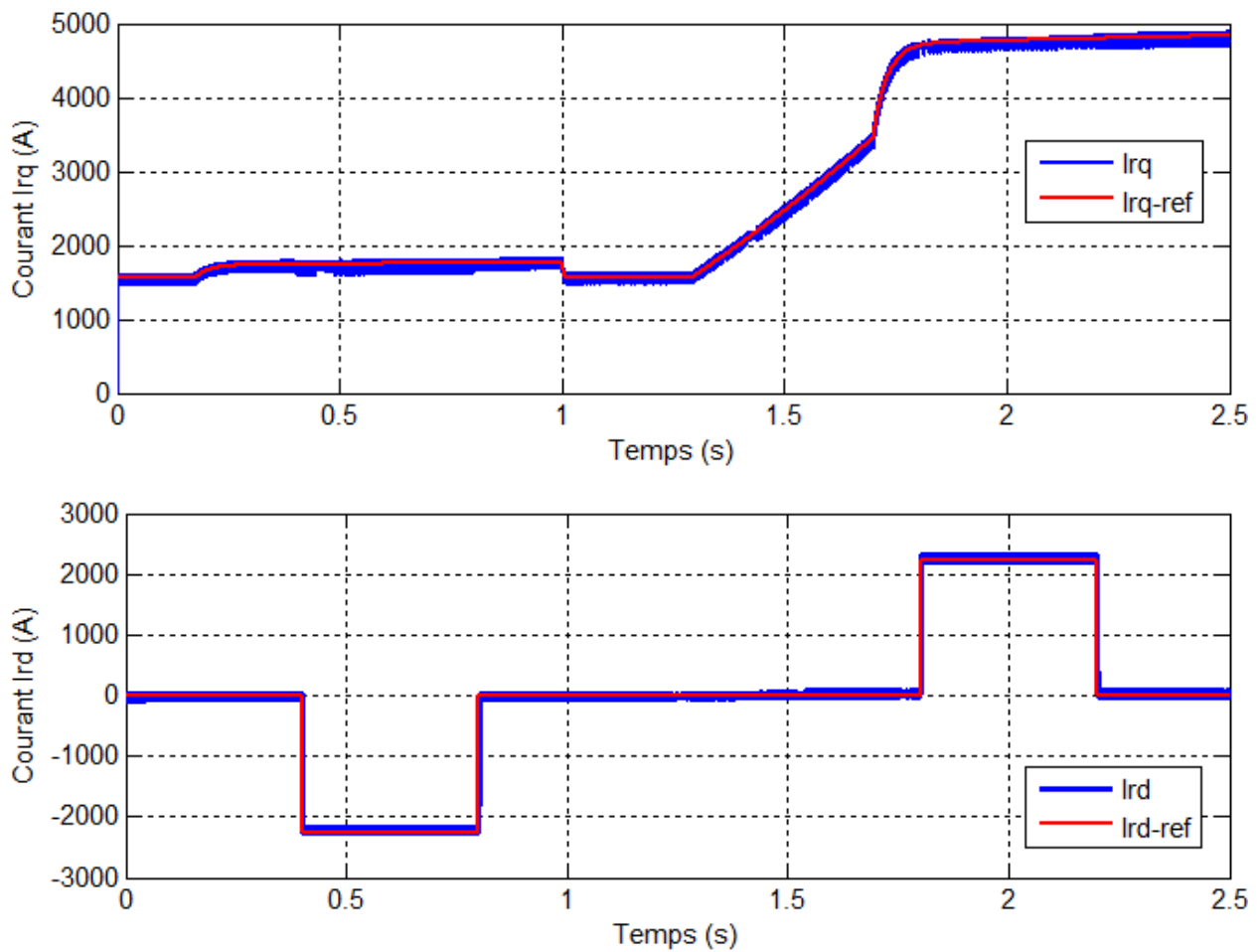


Fig.III.15 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références

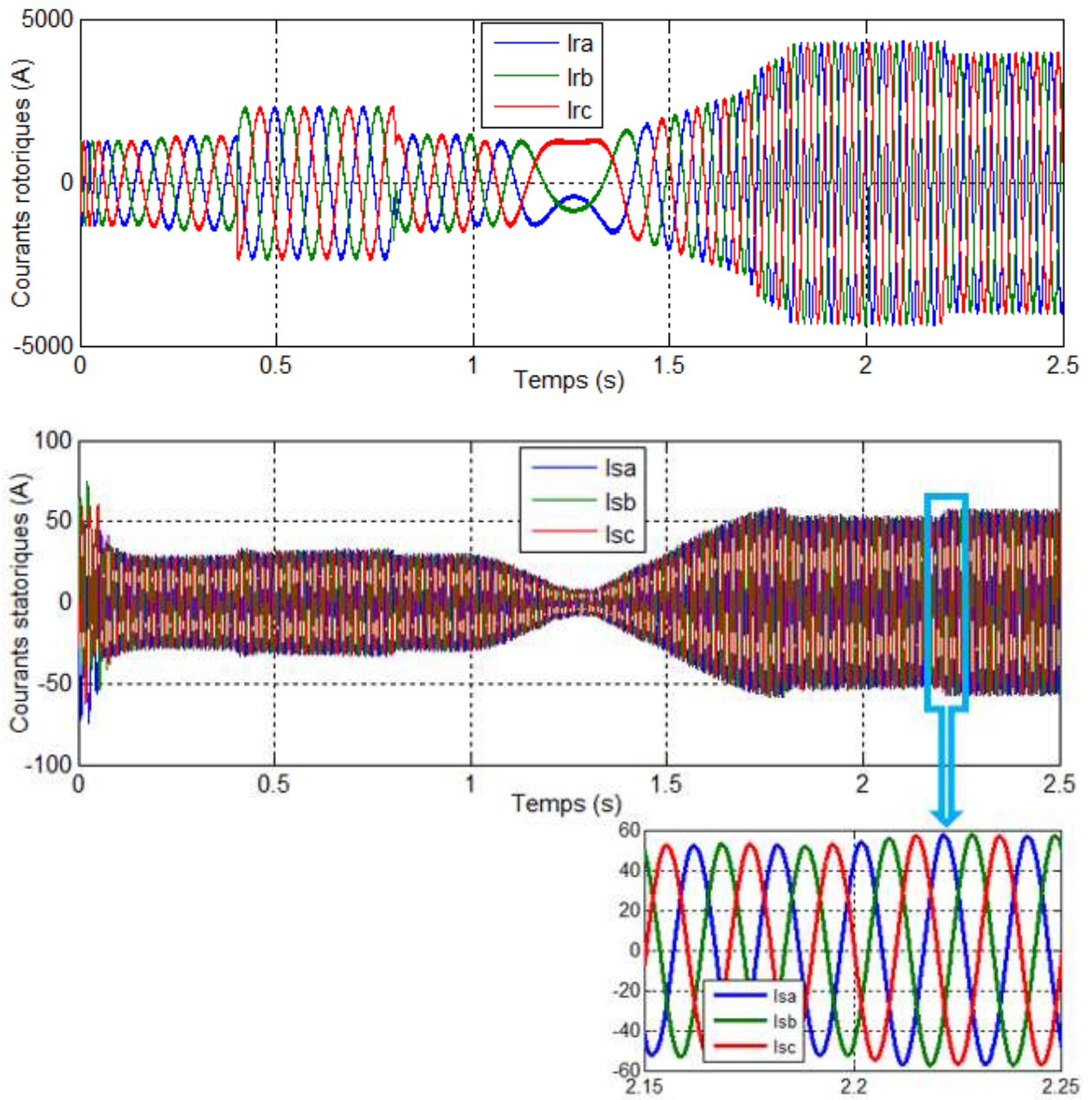


Fig.III.16 Courants rotoriques et statoriques triphasé

III.8.2 Cycle du vent 2

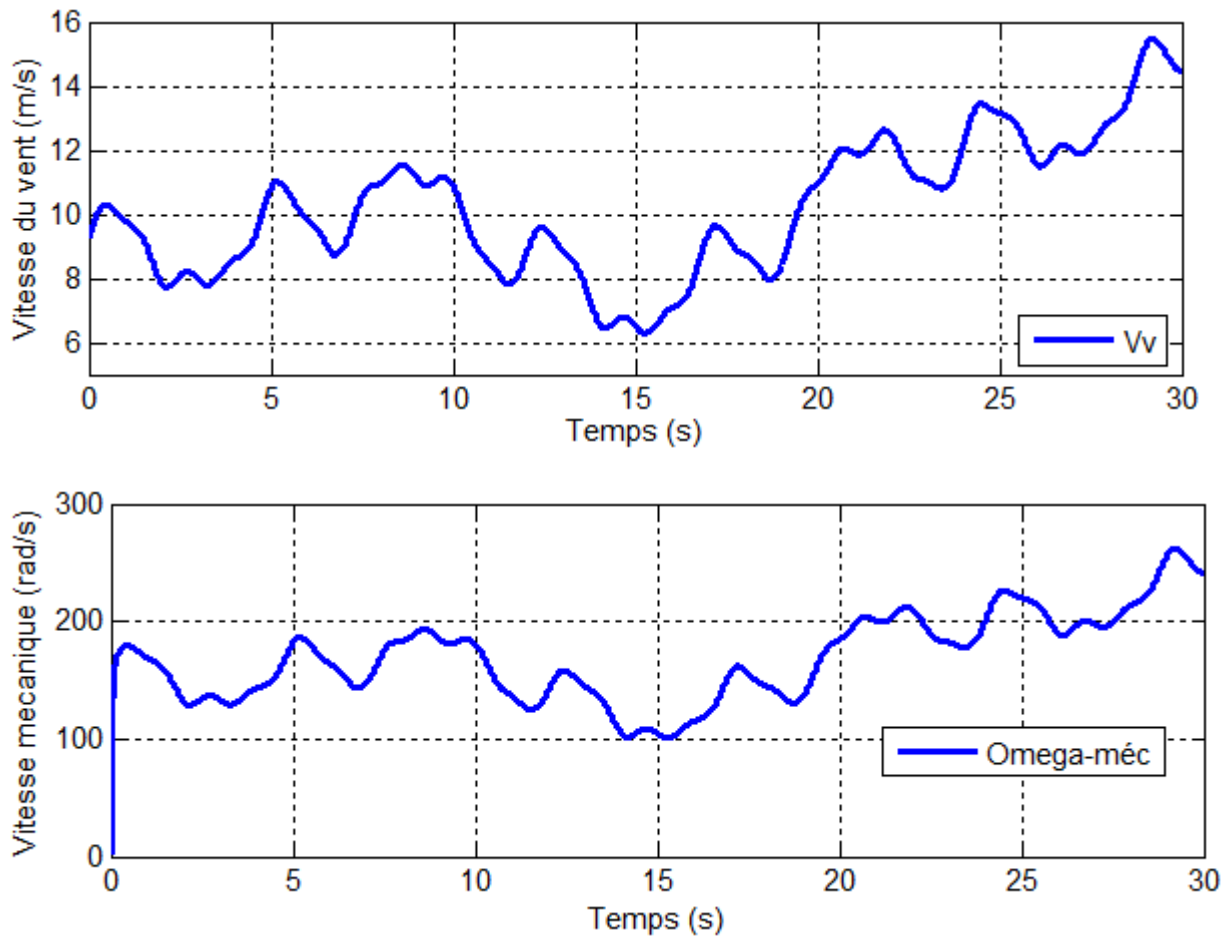
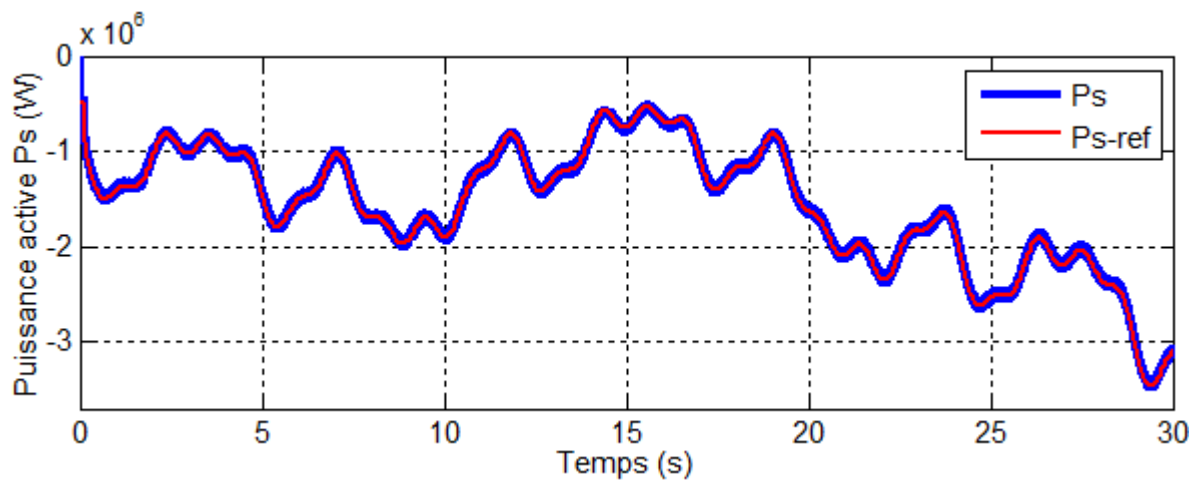


Fig.III.17 Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA



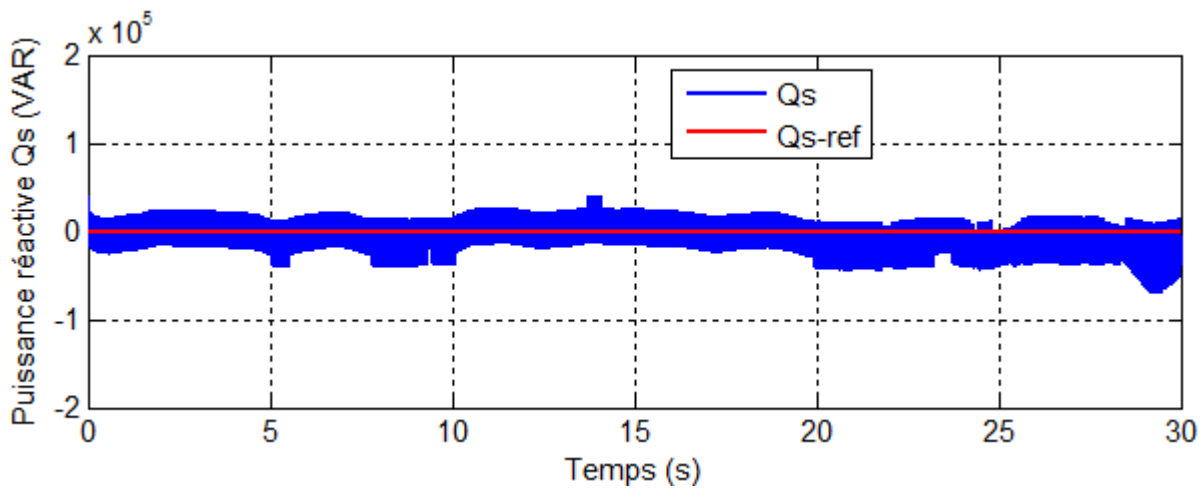


Fig.III.18 Puissances active et réactive statoriques et leurs références

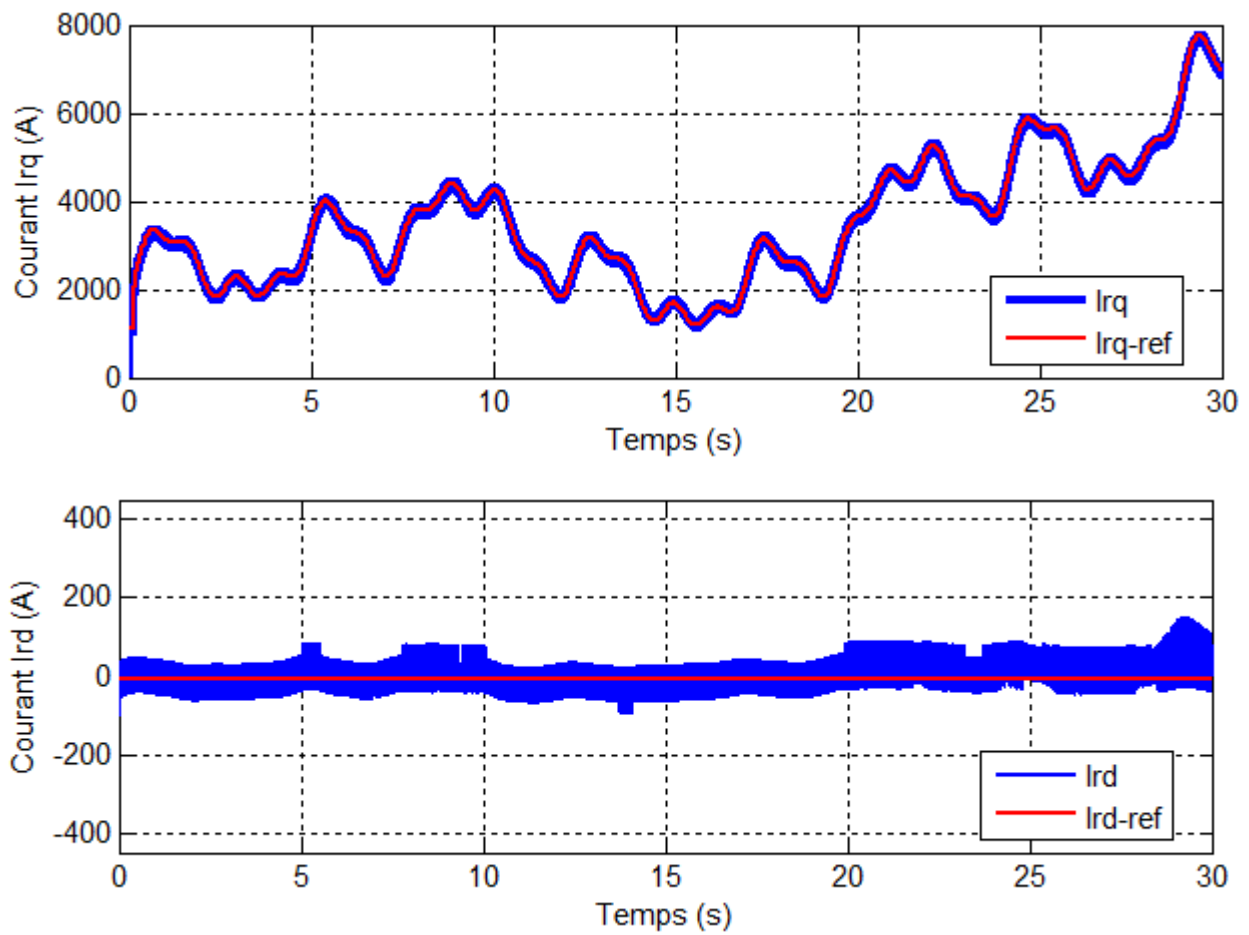


Fig.III.19 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références

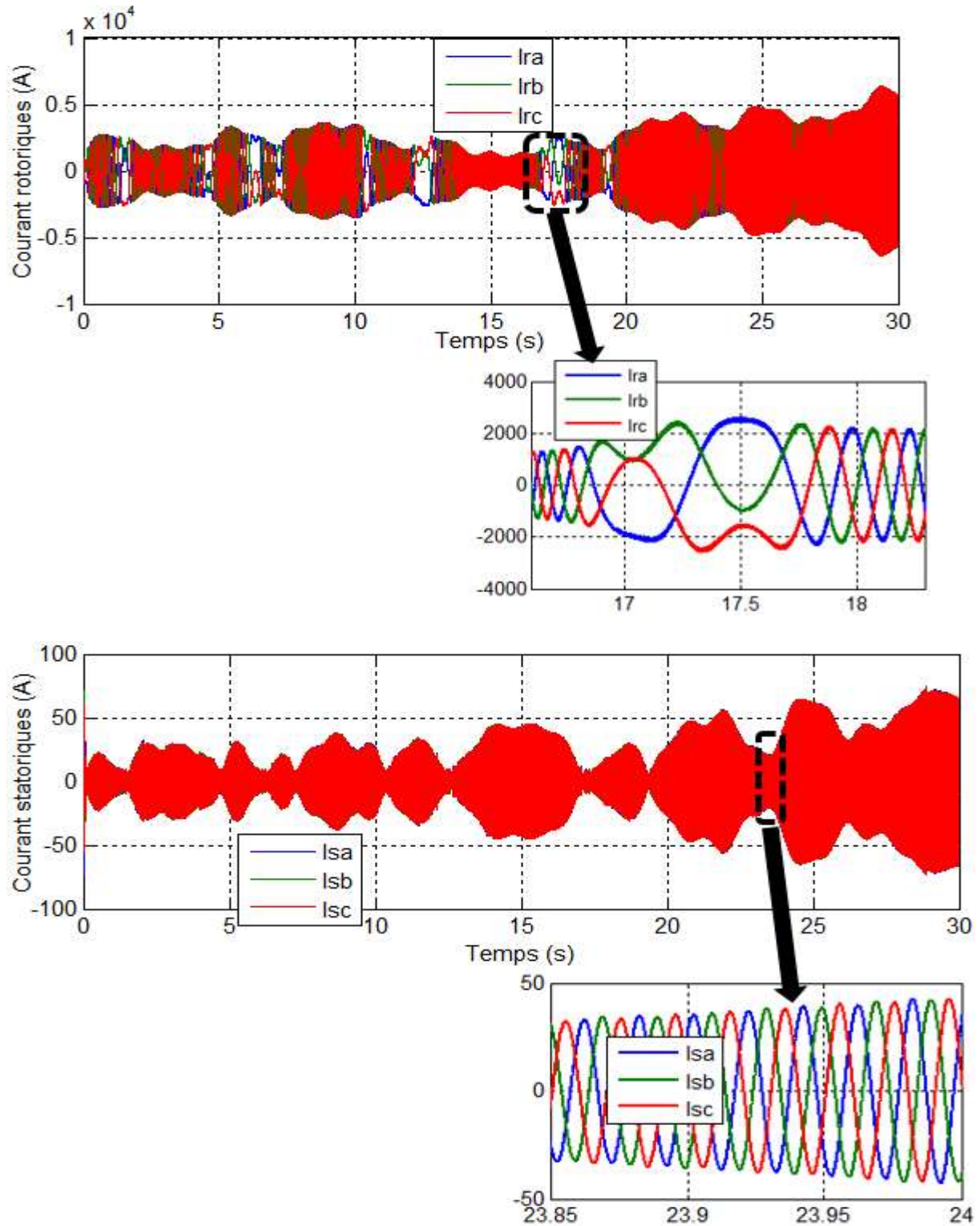


Fig.III.20 : Courants rotoriques et statoriques triphasé

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la modélisation de la génératrice dans le repère de Park lie au champ tournant statorique, ensuite, la modélisation des deux convertisseurs qui alimentent le rotor de la GADA.

Dans la suite de ce chapitre, la commande vectorielle en puissance de la GADA a été effectuée : Cette étude nous a permis de conclure que la commande vectorielle avec régulateurs PI est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante.

Toutes ces études sont validées par simulation. Il faut signaler que les régulateurs PI utilisés dans ces commandes dépendent des paramètres de la génératrice, donc les performances de la commande vectorielle dépendent de la précision des paramètres de la GADA. Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes. Le prochain chapitre sera consacré aux commandes qui occupent une large place dans la littérature de la commande des systèmes non linéaire : Il s'agit de la commande vectorielle avec des régulateurs flous.

CHAPITRE IV :

COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UN SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE BASE SUR UNE GADA

IV.1 Introduction :

Les techniques de l'intelligence artificielle sont connues actuellement pour leur grande potentialité de pouvoir résoudre les problèmes liés aux processus industriels, notamment le contrôle, l'estimation et l'identification des paramètres des systèmes variants. Parmi ces techniques, on trouve la logique floue et les réseaux de neurones qui s'appliquent de plus en plus dans le contrôle de la machine à induction et l'adaptation de sa commande vectorielle. Dans ce chapitre, la description des techniques intelligentes à savoir : les réseaux de neurones artificiels et la logique floue et leurs applications dans le contrôle de la génératrice asynchrone à double alimentation, ont été présentées. Des résultats de simulation sont aussi présentés afin de montrer l'efficacité de ces techniques dans la résolution du problème de la robustesse vis-à-vis aux variations des paramètres de la GADA

IV.2 Définition de l'intelligence artificielle :

Le but de l'Intelligence Artificielle (IA) est de concevoir des systèmes capables de reproduire le comportement de l'humain dans ses activités de raisonnement. L'IA se fixe comme but la modélisation de l'intelligence prise comme phénomène (de même que la physique, la chimie ou la biologie qui ont pour but de modéliser d'autres phénomènes). L'Informatique est la science du traitement de l'Information, l'IA s'intéresse à tous les cas où ce traitement ne peut être ramené à une méthode simple, précise, algorithmique. Un algorithme est une suite d'opérations ordonnées, bien définies, exécutables sur un ordinateur actuel, et qui permet d'arriver à la solution en un temps raisonnable (minutes, heures, ou plus,... mais pas des siècles !). Différentes techniques existent aujourd'hui dans la littérature, telles que les algorithmes génétiques, les algorithmes évolutionnaires, la logique floue et les réseaux de neurones. Dans notre étude nous nous sommes intéressés par ces deux dernières techniques.

IV.3 Généralités sur la théorie du contrôle par la logique floue :

IV.3.1 Principe et définition :

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par L. Zadeh en 1965, est une technique pour le traitement de connaissances imprécises et incertaines. Elle permet de

prendre en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel, telle que grand, petit, lent, rapide, ...etc [43]

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le « degré d'appartenance » d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle [0,1]. Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont « graduels », ou encore flous comme l'illustre la figure suivante [44]

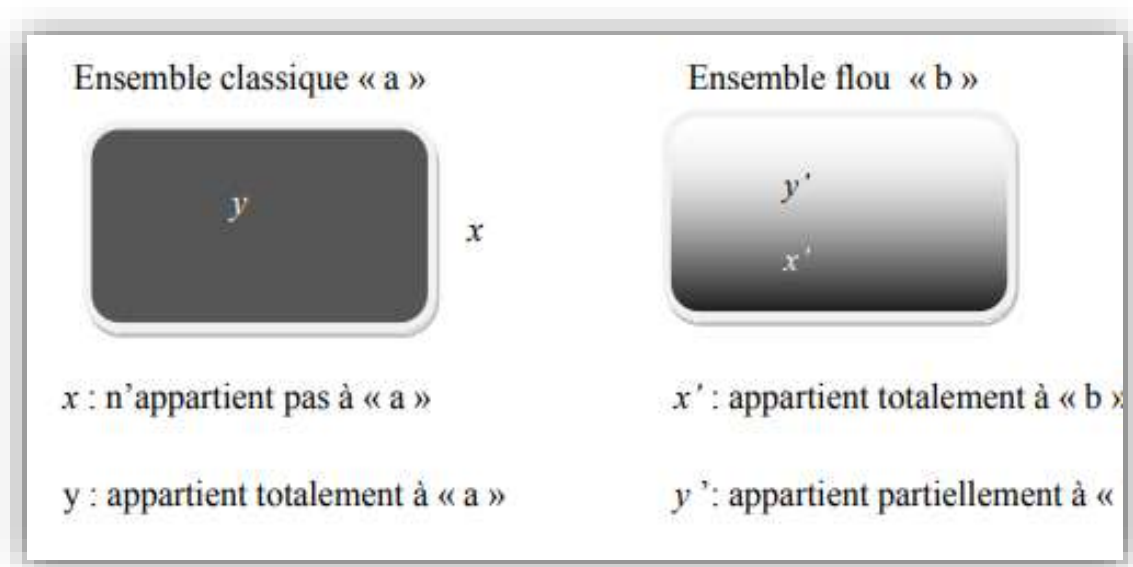


Fig IV.1 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

IV.4 Commande vectorielle à base de régulateur flou pour une GADA :

IV.4.1 Commande des puissances de la GADA par la logique floue :

Dans cette partie, nous allons concevoir des régulateurs pour les boucles des courants rotoriques par la logique floue, afin de contrôler en permanence et indépendamment les puissances statoriques de la GADA.

A partir de la structure de la commande indirecte avec boucle de puissance illustrée dans le chapitre précédent, nous pouvons établir la configuration générale des boucles de commande des puissances, en remplaçant les régulateur PI par des régulateurs flous. La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la commande avec des régulateurs flous :

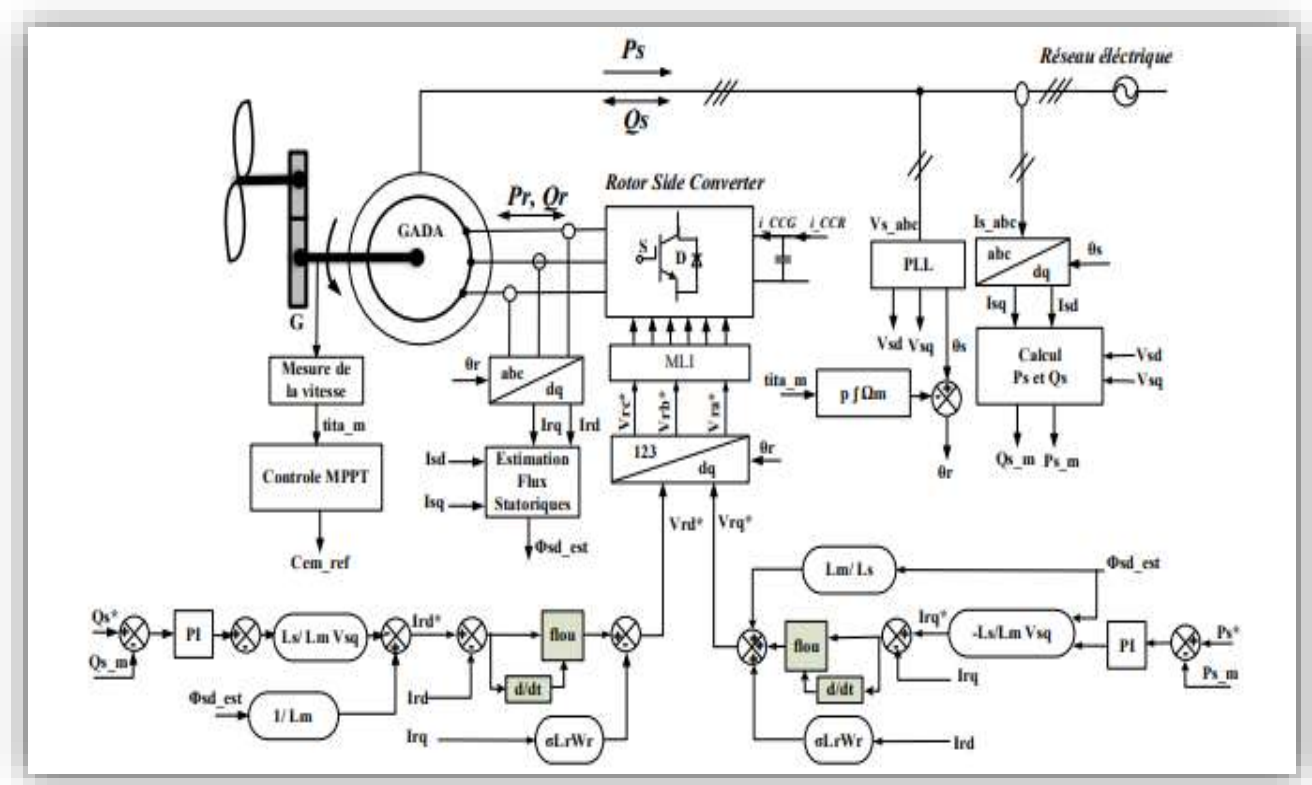


Fig IV.2 Schéma bloc de la commande avec des régulateurs flous

Pour étudier le comportement de la GADA commander par deux régulateurs flous, l'une pour le courant I_{rd} et l'autre pour le courant I_{rq} et afin de concevoir les fonctions d'appartenance et mise les règles adéquates, il suffit d'observer la réponse d'un système du deuxième ordre en boucle fermée suite d'un changement de la consigne.

IV.4.2 Choix de la structure du RLF des courants rotoriques

À partir de l'analyse précédente, nous pouvons constater que l'erreur d'un système E et son changement DE sont les grandeurs les plus significatives pour analyser son comportement. Elles sont alors choisies comme deux entrées du RLF soit pour le courant direct ou bien le courant en

quadrature pour commander la GADA en puissance. Nous pouvons établir la configuration des boucles des courants rotoriques pour la GADA à partir de la configuration générale de la figure III.25 de manière qu'elle comporte les RFL à la place du deux régulateurs conventionnels PI dans la structure de commande vectorielle tel qui illustré à la figure IV.3. La figure suivante présente les boucles de commande des courants rotoriques, en utilisant le RLF

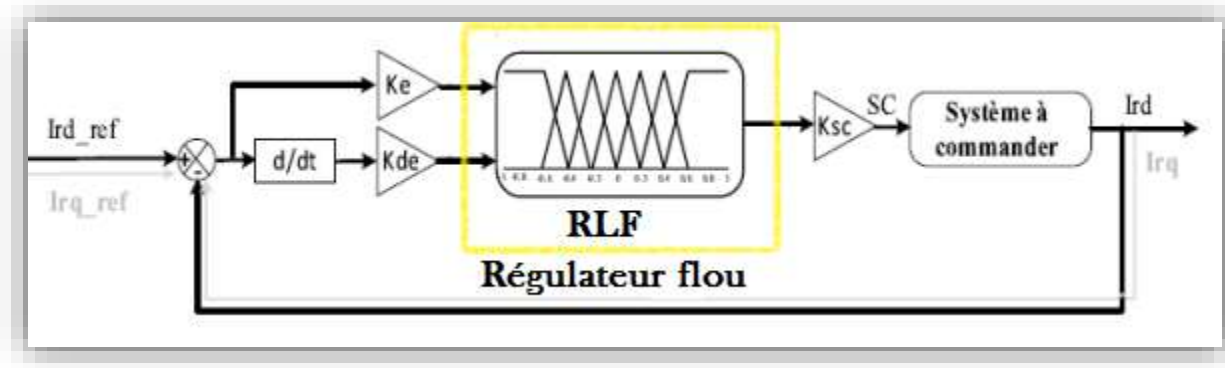


Fig IV.3 : Configuration de base d'un régulateur par logique floue.

D'après le schéma ci-dessus les entrées du RLF pour les deux courants rotoriques se calculent à l'instant k de la manière suivante :

1- L'erreur des courants :

$$E_d(k) = I_{rd-ref}(k) - I_{rd}(k) \quad (IV.1)$$

$$E_q(k) = I_{rq-ref}(k) - I_{rq}(k) \quad ,$$

2- La variation de l'erreur des courants :

$$dE_d(k) = E_d(k) - E_d(k-1) \quad (IV.2)$$

$$dE_q(k) = E_q(k) - E_q(k-1)$$

IV.4.2.1 Description de la conception du RLF pour la commande de GADA :

La fuzzification : Elle s'occupe de la transformation des valeurs numériques des entrées, dans notre cas ce sont l'erreur et sa variation en valeurs floues. La stratégie de fuzzification comprend le choix de la forme des fonctions d'appartenance. Dans notre application, nous avons choisi des formes trapézoïdales pour les extrémités et des formes triangulaires pour le reste des fonctions. Ensuite, Pour répartir ces données dans les espaces flous, il faut tout d'abord définir des ensembles

floous, dans notre cas, on a introduit sept ensembles pour obtenir une subdivision plus fine. Le choix des variables linguistiques sont caractérisés par des désignations standards :

Tableau IV.1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques.	
Négative Grande	NG
Négative Moyenne	NM
Négative Petite	NP
Environ Zéro	EZ
Positive Petite	PP
Positive Grande	PG
Positive Moyenne	PM

La défuzzification : pour obtenir une valeur numérique utilisable à la sortie du RLF, il faut transformer les sorties floous. Afin d'effectuer cette transformation, nous avons défini une fonction d'appartenance pour la sortie. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, mais les plus utilisées sont la méthode de centre de gravité et la méthode des hauteurs. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de centre de gravité. Les figures ci-dessous montrent le diagramme de répartition floue pour les grandeurs suivantes : erreur de courant E, le changement d'erreur de courant et la commande.

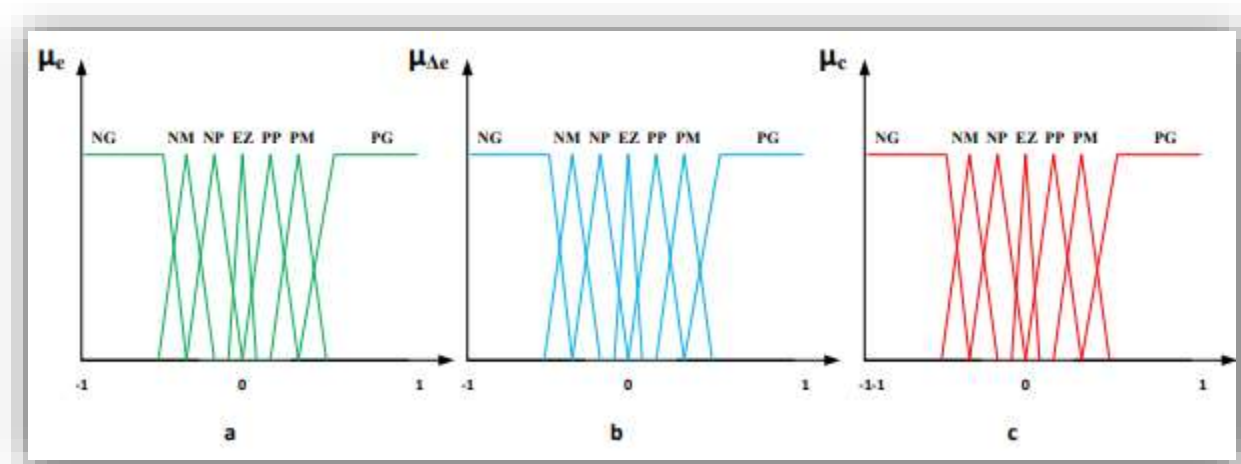


Fig IV.4 Fonctions d'appartenance utilisées pour RLF pour les deux boucles des courants. (a) : Erreur, (b) Dérivée de l'erreur et (c) : La commande.

Table IV.2 Table de règles pour le RLF des courants rotoriques

Commande		Erreur						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Dérivée d'erreur	NG	NG	NG	NG	NG	EZ	EZ	EZ
	NM	NG	NG	NM	NM	EZ	EZ	EZ
	NP	NG	NG	NP	NP	PP	PP	PM
	EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	NP	PP	PP	PG	PG
	PM	EZ	EZ	EZ	PM	PM	PG	PG
	PG	EZ	EZ	EZ	PG	PG	PG	PG

Pour contrôler la GADA par logique floue et à partir du chapitre précédent, on tire le système d'équations suivant avec l'orientation du flux selon l'axe d :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = w_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Phi_s - w_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{rq} + w_r L_r \end{cases} \quad (IV.1)$$

Les expressions des puissances active et réactive statoriques sont :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s}{L_s w_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Les références des courants rotoriques de la GADA dans le repère de Park peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} I_{rq_{ref}} = -V_s \frac{L_s}{L_m} p_{s_{ref}} \\ I_{rd_{ref}} = \frac{V_s}{L_m \omega_s} - \frac{L_s}{V_s L_m} Q_{s_{ref}} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Les expressions des dérivées de courants rotoriques peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{d}{dt} I_{rd} = \frac{R_r}{L_r \sigma} + \omega_r I_{rq} + \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} \quad (IV.4)$$

$$\frac{d}{dt} I_{rq} = -\omega_r I_{rd} - \frac{R_r}{L_r \sigma} I_{rq} - \frac{L_m}{L_r \sigma} \omega_s \varphi_s + \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq}$$

IV.5 Résultats de simulation :

IV.5.1 Cycle du vent 1

Afin de valider la nouvelle commande de la GADA c'est-à-dire la commande vectorielle avec des régulateurs floue, nous avons effectué des simulations à l'aide des outils Matlab / Simulink. Dans le but de voir les nouveaux résultats de poursuite et de régulation des puissances statoriques, nous avons utilisé les mêmes conditions des tests que pour la commande vectorielle aux ceux du chapitre précédent (Chapitre III).

Le cycle du vent appliqué pour effectuer la commande par logique floue est le même cycle que la figure III.13.

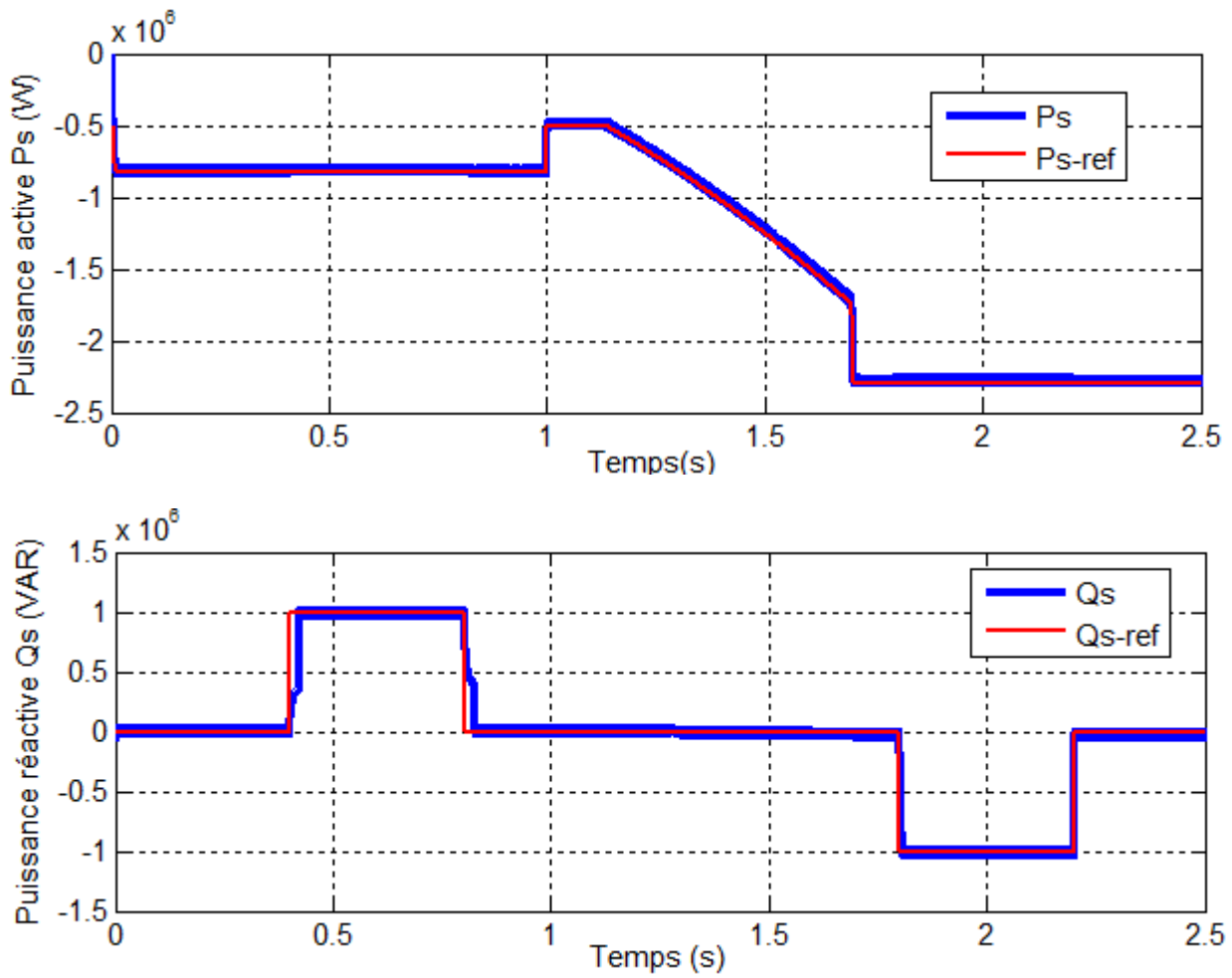
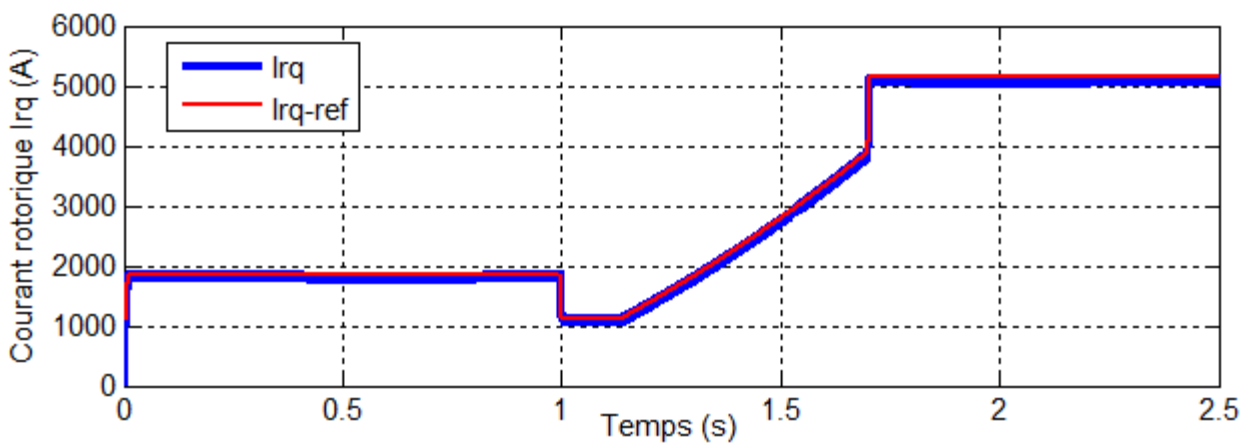


Fig.IV.5 Puissances active et réactive statoriques et leurs références



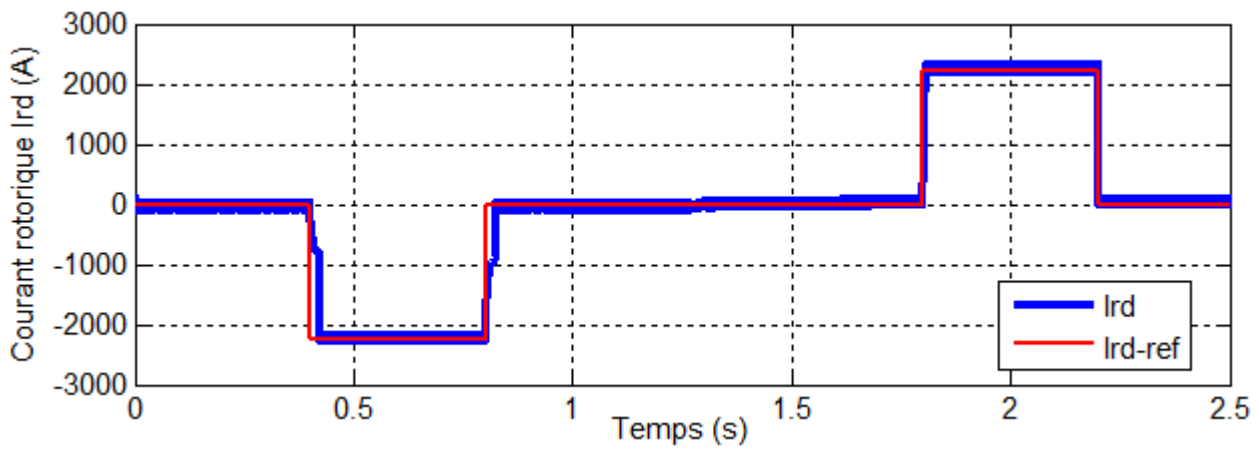


Fig.IV.6 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références

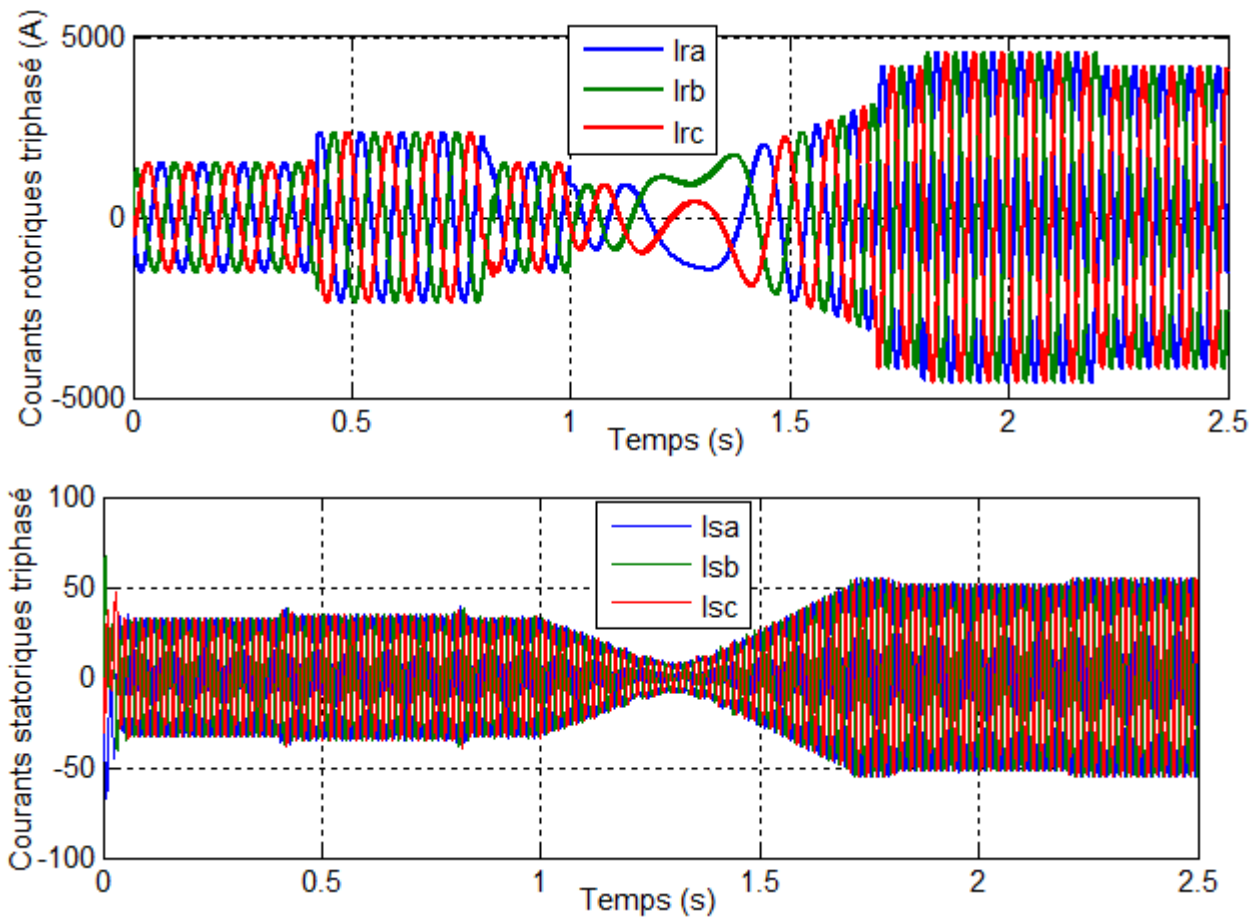


Fig.IV.7 Courants rotoriques et statoriques triphasé

IV.5.1 Cycle du vent 2

Le deuxième cycle du vent appliqué pour effectuer la performance de la commande par logique floue est le même cycle que la figure III.17.

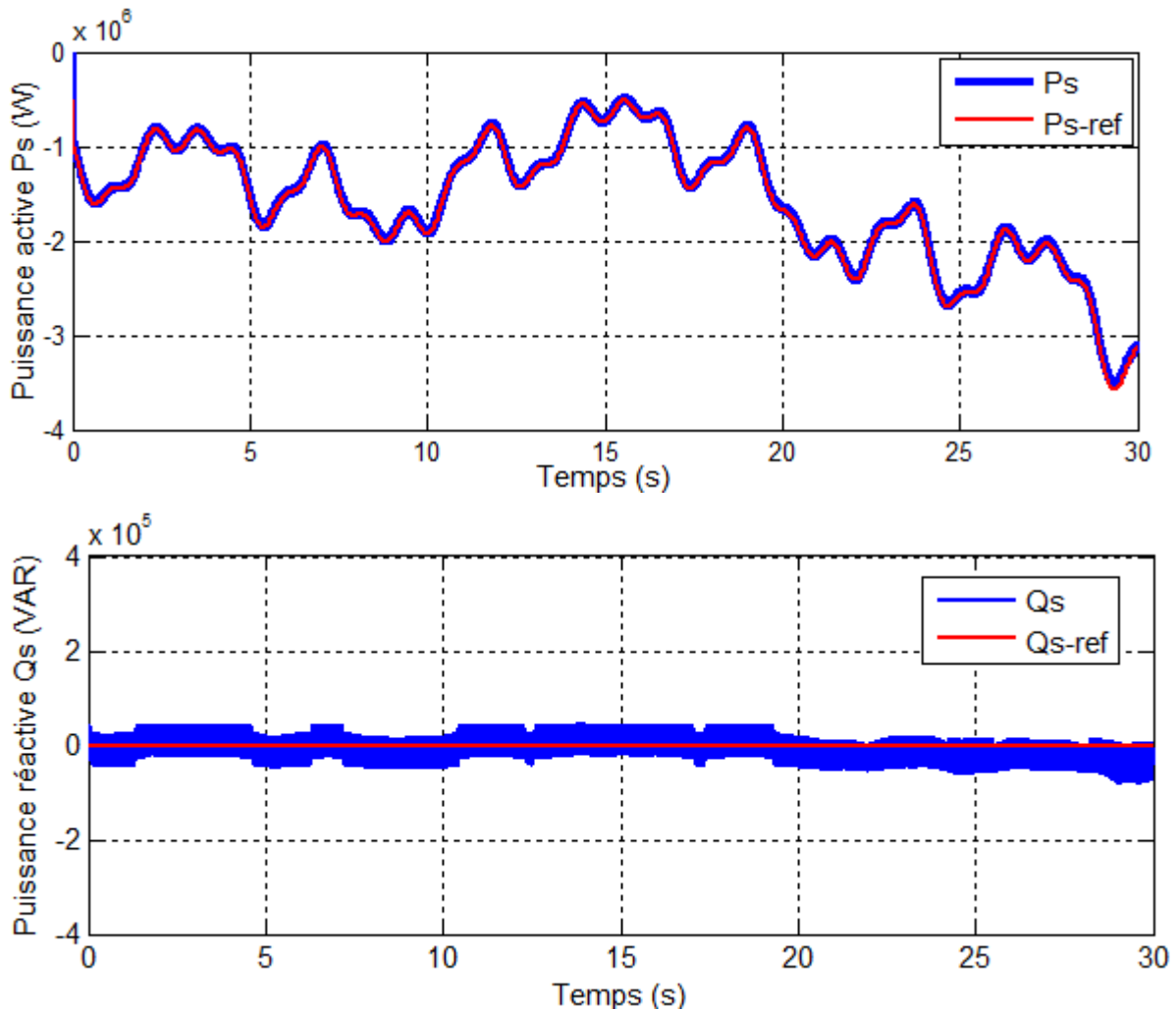


Fig.IV.8 Puissances active et réactive statoriques et leurs références

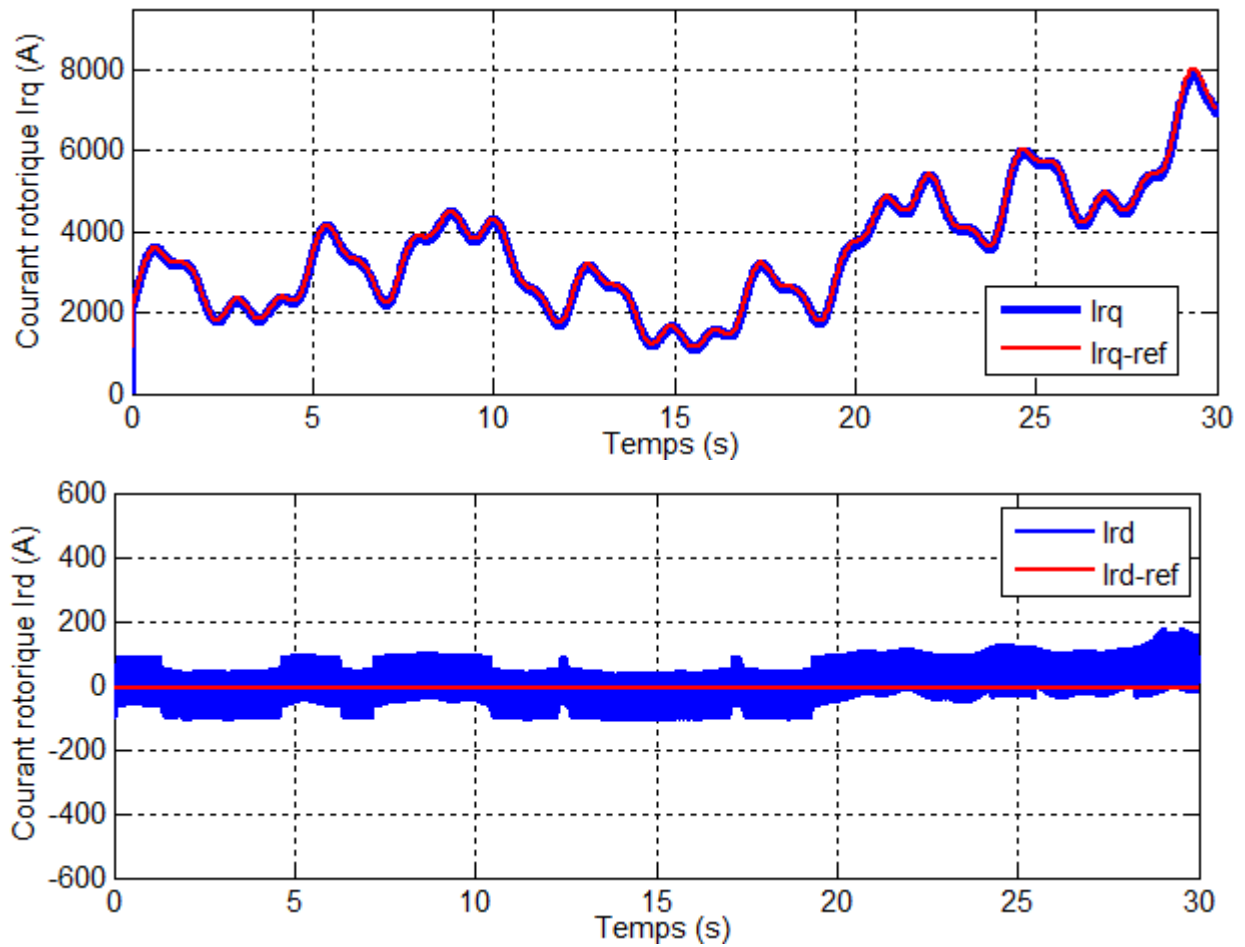
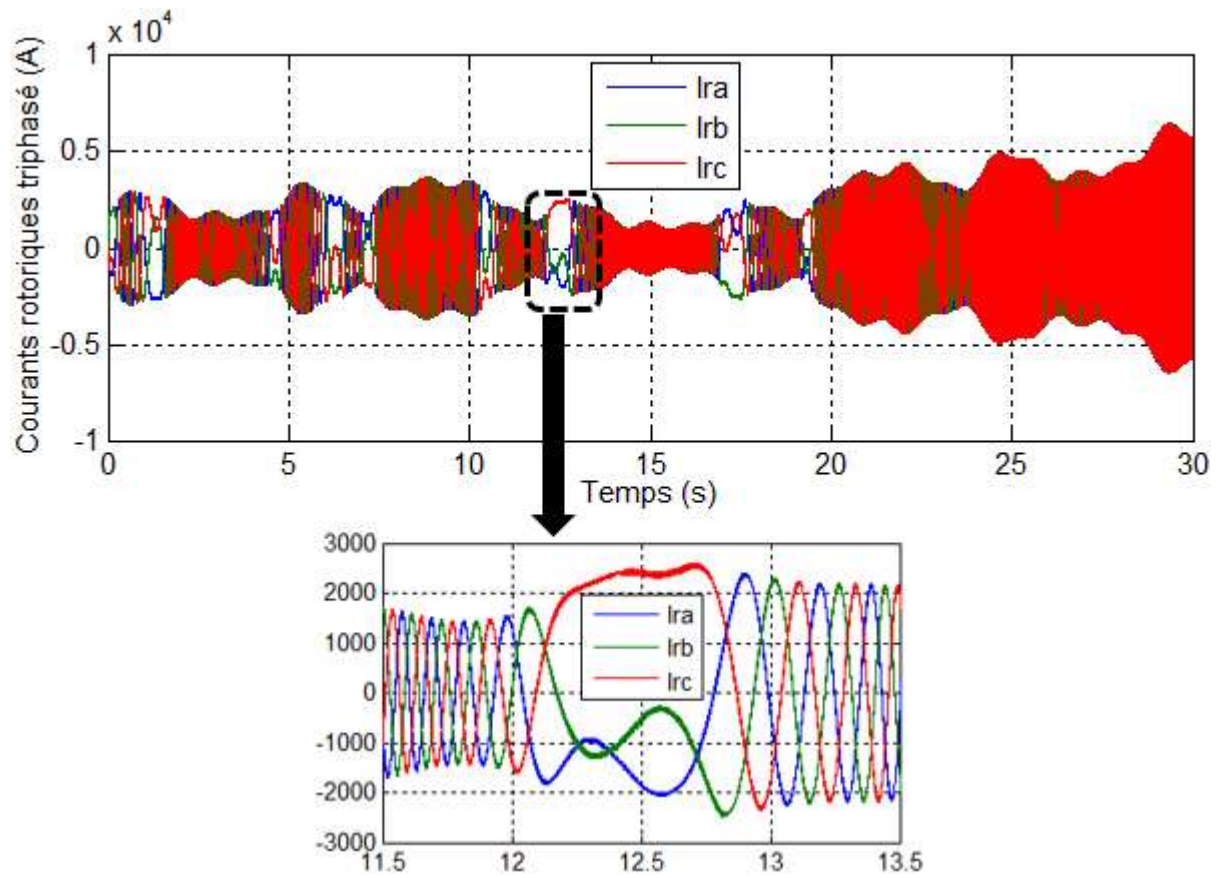


Fig.IV.9 Courants quadratique et direct rotoriques et leurs références



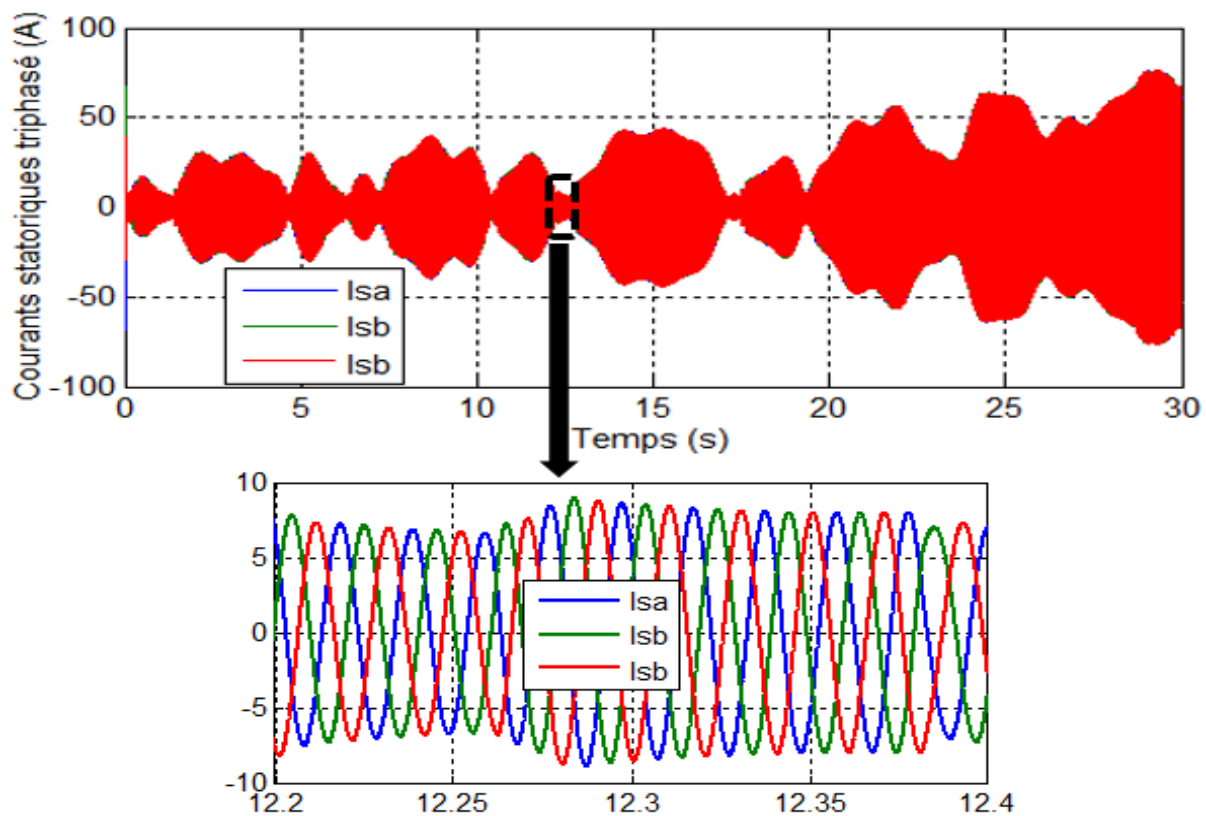


Fig.IV.10 Courants rotoriques et statoriques triphasé

IV.5.3 Interprétations des résultats

Les résultats mentionnés ci-dessus montrent l'efficacité du régulateur par logique floue, les puissances active et réactive du GADA suivi leurs références qui sont obtenus par la commande MPPT pour avoir le maximum de la puissance même pour une vitesse du vent très perturbés.

Les courants rotoriques quadratique et direct suivi leurs références avec un erreur statique très réduit et un erreur dynamique converges à zéro, ceci prouve les performances et l'efficacité et la succès de la commande par logique floue par rapport au commande vectorielle avec des régulateurs PI appliqué au GADA pour générer de l'énergie électrique au réseau.

IV.6 Conclusion

La technique de commande a été présentée dans ce chapitre pour contrôler indépendamment la puissance active et réactive statoriques générées par la GADA dans un système de conversion d'énergie éolienne. Cette technique se basait sur la commande par régulateurs des courants par logique floue.

En effet, nous avons présenté la commande vectorielle à base des régulateurs flous. Pour cette commande, ses principes ont été introduits tout en présentant ses notions de bases au début de cette partie. Ensuite, un régulateur par logique floue a été conçu pour les boucles des courants rotoriques, afin de commander la GADA.

Les résultats de simulation sous plusieurs conditions de fonctionnement ont été rapportés pour la commande par Logique floue. Les performances de ce commande ont été comparées avec celle de la commande vectorielle à base des régulateurs de type PI, sous les mêmes conditions de fonctionnement, ces derniers résultats démontrent qu'un régulateur par logique floue donne une performance supérieure à celle des autres commandes.

Conclusion Générale

Deux problèmes majeurs liés à la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et à pas variable basé sur une génératrice asynchrone double alimentation ont été examinés dans cette thèse. Ces deux problèmes concernent la robustesse vis-à-vis des variations des conditions de fonctionnement c'est-à-dire la variation de la vitesse du vent et la robustesse par rapport aux variations des paramètres de la GADA. Pour résoudre ces deux problèmes, le principe de la logique floue a été utilisée dans les algorithmes proposés, pour l'algorithme d'extraction de la puissance maximale (MPPT) et pour la commande indépendante des puissances active et réactive de la GADA. Puis, Nous avons étudié la contribution de ce système à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Nous résumons les principales contributions de cette thèse comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons survolé les aspects actuels d'un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation globale d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et à pas variable basé sur une génératrice asynchrone double alimentation est développée pour une turbine éolienne de puissance de 2 MW connectée au réseau électrique. Le fonctionnement, les circuits équivalents et les modèles mathématiques de chaque élément ont été présentés. Car une compréhension claire est nécessaire pour développer des algorithmes de contrôle pour le SCEE basé sur une GADA. Ce modèle est très utile dans les études de comportement du SCEE. Nous avons appliqué deux techniques de commandes pour la stratégie MPPT, la méthode directe et la méthode indirecte basée sur deux régulateurs (PI, Logique floue). Ces algorithmes permettent de fournir un maximum de puissance active produite au réseau électrique grâce au fonctionnement à vitesse variable de la GADA. L'objectif est d'analyser leurs performances en termes de poursuite. Le contrôle du système éolien s'effectue via deux convertisseurs statiques triphasés, situés entre le bobinage rotorique de la GADA et le réseau électrique.

Nous avons appliqué une commande au convertisseur coté réseau afin de régler la tension du bus continu, et une commande vectorielle pour contrôler indépendamment l'échange des puissances statoriques produites par la GADA. Dans la commande utilisée pour le contrôle du CCG, on a remarqué que ses régulateurs sont en fonction des paramètres de la GADA, cependant, la stabilité du système dépend de la variation de ces paramètres. Ce qui renforce la nécessité des autres stratégies de contrôle.

Deux algorithmes de contrôle sont développés dans le quatrième chapitre afin d'atteindre les objectifs souhaités (système robuste). Dans un premier lieu, on a utilisé une commande vectorielle indirecte à base des régulateurs flous. Ces notions de bases ont été présentées dans le chapitre II, puis nous avons donné quelques avantages et inconvénients de cette méthode. Un RLF est par la suite conçu étape par étape.

Face aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du SCEE sont envisageables :

- ✓ Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion ;
- ✓ L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs tels que trois et cinq niveaux dans une chaîne de conversion éolienne ;
- ✓ L'étude et l'application d'autres commandes pour le convertisseur coté génératrice ;
- ✓ L'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis à vis du déséquilibre du réseau, des creux de tension et des fluctuations ;
- ✓ L'utilisation des réseaux de neurone pour l'estimation de la vitesse de rotation sans l'utilisation d'un capteur de vitesse.

Annexe

Tableau A.1 : Les paramètres de la turbine éolienne utilisée

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Puissance nominale (Pn)</i>	2	<i>MW</i>
<i>Nombre de Pales (Rt)</i>	3	-
<i>Vitesse du vent minimale (Vvm)</i>	7.5	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent nominale (Vvn)</i>	12.5	<i>m/s</i>
<i>Masse volumique de l'air (ρ)</i>	1.1225	<i>kg/m³</i>
<i>Ratio de vitesse optimale (λ_{opt})</i>	7.2	-
<i>Coefficient de puissance maximal (Cpmax)</i>	0.44	-
<i>Gain du multiplicateur (G)</i>	80	-
<i>Inertie de la turbine (Jt)</i>	800	<i>Kg.m²</i>

Tableau A.2 : Paramètres de la GADA

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Puissance active statorique nominale (Pn)</i>	2	<i>MW</i>
<i>Couple nominal</i>	12732	<i>N.m</i>
<i>Tension nominale statorique (Vsn)</i>	690	<i>V</i>
<i>Courant nominale du stator (Isn)</i>	1760	<i>A</i>
<i>Vitesse de rotation nominale (Ω_{nom})</i>	1500	<i>tr/min</i>
<i>Nombre de pair de pole (p)</i>	2	-
<i>Plage de vitesse</i>	± 30	<i>%</i>
<i>Inertie de la turbine (Jg)</i>	800	<i>Kg.m²</i>
<i>Résistance du stator (Rs)</i>	2.6	<i>mΩ</i>
<i>Résistance du rotor (Rr)</i>	2.9	<i>mΩ</i>
<i>Inductance du stator (Ls)</i>	2.587	<i>mH</i>
<i>Inductance du rotor (Lm)</i>	2.587	<i>mH</i>
<i>Inductance mutuelle (Lm)</i>	2.5	<i>mH</i>

Références Bibliographiques

[01] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, Wind energy handbook, vol. 2. Wiley Online Library, 2001.

[02] MOUSSAOUITAHA YACINE «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.

[03]. TOUATI MUSTAPHA KAMEL «Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique» Mémoire de magistère en électrotechnique, Université de Batna, 15/01/2015.

[04] WWW.GWEC.net

[05] N.Cherfia "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007

[06] AZZOUZ TAMAARAT «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA» Thèse de doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 08/12/2015

[07]. F.Poitière" Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone _a cage autonome - Machine asynchrone _à double alimentation reliée au réseau" thèse doctorat Juin 2006

[08] CHERFIA NAÏM «Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens» Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri – Constantine, 07/ 06 / 2010.

[09] Y. A. BENCHERIF, " Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2008.

- [10] :F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.
- [11] :Y. A. BENCHERIF, " Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2008.
- [12]: MADJID SI BRAHIM «Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone» Thèse de doctorat 3eme cycle en Électrotechnique, Université mouloud mammeri de Tizi-ouzou, 16 juin 2015.
- [13] : DJERIRI YOUCEF «Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien» Mémoire de magister en Électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-abbès, December 2009.
- [14]: LATRECHE MOHAMMED TAHAR «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» Mémoire Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, 24 /06 /2012.
- [15]: DJERIRI YOUCEF «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, november 2015.
- [16], S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," IEEE Industry applications magazine, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, 2002.
- [17] S. Engelhardt, I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann, and F. Shewarega, "Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, pp. 364–372, 2010.
- [18]. R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," IEE Proceedings- Electric power applications, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, 1996.

- [19] Y. DJERIRI, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle," PhD Thesis, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel- Abbes, 2015.
- [20] A. Mirecki, "Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," PhD Thesis, Université de Toulouse, 2005
- [21] L. Peng, "Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension," PhD Thesis, Ecole centrale de Lille, 2010.
- [22] H. A. Pulgar-Painemal and P. W. Sauer, "Doubly-fed induction machine in wind power generation," in Electrical Manufacturing and Coil Winding Exposition, 2009, vol. 4.
- [23] M. Doumi, A. G. Aissaoui, M. Abid, A. Tahour, and K. Tahir, "Robust fuzzy gains scheduling of RST controller for a WECS based on a doubly-fed induction generator," *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, vol. 57, no. 3, pp. 617–626, 2016.
- [24] MOUSSAOUITAHA YACINE «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.
- [25] DJERIRI YUCEF «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, november 2015.
- [26]] BOURAKI MOULOUD «Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: Application sur un site à TINDOUF» Mémoire Magister en Génie Electrique, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2011/2012.
- [27] I. YAICHI, "Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA.," PhD Thesis, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes, 2019.
- [28], R. Riyadh and R. Abdessemed, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone doublealimentée.," PhD thesis, University of Batna, Faculty of Technology, 2016.

- [29]– G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, vol. 85. John Wiley & Sons, 2011.
- [30] A. G. Abo-Khalil and D.-C. Lee, “MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR,” IEEE transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1489–1490, 2008.
- [31], D. Ramuz, “Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs: contribution à l’étude et à la commande avec et sans capteur,” PhD Thesis, Besançon, 2000
- [32]: S. El Aimani, “Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” PhD Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [33], T. Ghennam, “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation,” Université de Lille, 2011.
- [34]. T. Ghennam and E.-M. Berkouk, “Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems,” Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 4, pp. 444–455, 2010.
- [35]. A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006
- [36] H. TAMRABET, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone", mémoire de magister, université de Batna. 20 /05 /2006.
- [37]. .B. REGUIG «Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation " Application à l'énergie éolienne " », Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, 2016.
- [38] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.

-
- [39].A. BENAMOR « Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique , Université d'El Oued, 2013
- [40].O. DJAAFRI et A.E. HARIZI «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne» Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [41] S. METATLA ; « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire de magister, ENP, el Harrach 2009.
- [42] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, vol. 85. John Wiley & Sons, 2011.
- [43] BOUDJEMA ZINELAABIDINE «Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque)» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-abbès,10/02/2015
- [44] KHAMI MOHAMED «Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique Neuro-flou» Mémoire de Master académique En Electrotechnique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 24/06/2013.