

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire Salhi Ahmed – NAAMA



Institut des Technologies
Département de Génie Électrique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

L'application de la commande adaptative par modèle de Référence (MRAC) pour le contrôle de la puissance D'une GADA dans un système éolien

Présenté par :

- Mhammedi iness
- Zahzouh Achwak

Soutenu le : ... 15/06/2023..... devant le Jury :

M. SOFLIN	MAA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. HABCHI Yassine	MCA	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. KENDZI Mohammed	Dr	Centre Universitaire Naâma	Co-Encadreur
M. MEDJAJI N	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Naâma – Algérie - 2023

Remercîment

Tout d'abord nous remercions « Dieu » tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté, et le privilège d'étudier et de suivre le chemin de la science ; Ensuite nous remercions Chaleureusement nos très chers parents qui nous ont tout donné pour qu'on puisse arriver à ce niveau.

Nous voudrions exprimer aussi, combien grande est notre reconnaissance envers notre encadreur : Mr HABCHI YASSINE n'a pas épargné aucun effort pour nous diriger et nous orienter, nous considérons à lui ses efforts infatigables, son travail d'apostolat, son aide illimitée, son suivie, ses conseils et son esprit d'un maitre qui donne et pardonne.

Nous tenons à faire part de nos meilleurs remerciements au : Mr Kendzi Mohammed qu'elle nous accompagné et donné tout son temps pour nous aide à travailler notre mémoire de fin d'études.

Merci aux membres du jury, d'avoir accepté de porter un jugement sur ce travail.

Nous remercions vont également à nos collègues et nos amis qui partagent avec nous les bons moments de l'étude.

Un grand merci, pour tous ceux qui ont été, en quelque part, de près ou de loin, participé à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail
A ma très chère mère, source de tendresse
A mon très cher père, qui m'encourage
Dans les instants délicats
A mes chers frères
A toute ma famille
A tous mes amis

Zahzouh Achwak

Je dédie ce modeste travail
A ma très chère mère, source de tendresse
A mon très cher père, qui m'encourage
Dans les instants délicats
A mes chers frères
A toute ma famille
A tous mes amis

Mhammedi iness

SOMMAIRE

<i>Remercîment</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
SOMMAIRE	IV
LISTE DES SYMBOLES	VII
Glossaire	XI
Liste des Tableaux	XII
Liste des Figure	XII
Résumé	XIV
Introduction générale	1
I.1 Introduction	4
I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	4
I.3 L'énergie éolienne	5
I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	5
I.4.1 Avantages.....	5
I.4.2 Inconvénients	6
I.5 Constitution des éoliennes	7
I.5.1 Le mat.....	7
I.5.2 Le rotor.....	7
I.5.3 La nacelle	8
I.6 Les types d'éoliennes	8
I.6.1 Eoliennes à axe vertical.....	9
I.6.2 Eoliennes à axe horizontal	9
I.7 La puissance éolienne dans le monde	10
I.8 Energie éolienne en Algérie	11
I.9 Les différentes technologies du système éoliennes	13
I.9.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	13
I.9.2 Les éoliennes à vitesse variable	13
I.10 Synthèse des différentes machines utilisée dans le système éolien :	14
I.11 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (GADA)	15
I.12 Mode de fonctionnement de la GADA	16
I.12.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	16
I.12.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone.....	17

I.12.3	Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone	17
I.12.4	Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone	18
I.13	Avantages et inconvénients de la GADA	18
I.14	Applications des éoliennes.....	19
I.15	Conclusion	20
Chapitre II: Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone		
22		
II.1	Introduction.....	22
II.2	Modèle Partie mécanique	22
II.2.1	modèle de la Turbine	23
II.2.2	Multiplicateur	25
II.2.3	L'arbre mécanique	25
II.2.4	Schéma bloc du modèle de la turbine	26
II.3	Modélisation Partie électrique	27
II.3.1	Hypothèses simplificatrices	27
II.3.2	Description de la GADA	27
II.3.3	Représentation de la GADA dans le système triphasé (a,b,c)	28
II.3.4	Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)	29
II.3.5	Application de la transformation de Park	30
II.3.6	Modèle d'état de la GADA.....	32
II.3.7	Modélisation de l'onduleur.....	33
II.5	conclusion.....	35
III.1	Introduction	37
III.2	Commande vectorielle de la GADA	37
III.2.1	But et principe de la commande vectorielle	37
III.3	Etablissement du modèle de la GADA.....	38
III.3.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé	38
III.3.1.1	Relation entre le courant statorique et le courant rotorique.....	39
III.3.1.2	Relations entre puissances statorique et courants rotoriques.....	40
III.3.1.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	40
III.4	Méthodes de la commande vectorielle	42
III.4.1	Méthode directe	42
III.4.2	Méthode indirecte	43
III.4.2.1	Commande sans boucle de puissance	44

III.4.2.2. Commande avec boucles de puissance	44
III.5 Type de régulateurs utilisés	45
III.6 Les avantages et les inconvénients de la commande vectorielle	46
III.7 Modèle de simulation par commande vectorielle.....	47
III.7.1 Résultat de simulation par commande vectorielle	47
III.8 Interprétation des résultats	48
III.9 Généralités sur la commande adaptative	49
III.10 Principe de la commande adaptative	49
III.11 Commande adaptative directe et indirecte	50
III.11.1 La commande adaptative directe	50
III.11.2 La commande adaptative indirecte	51
III.12 Modèle de référence des composants	51
III.13 Règle MIT.....	51
III.14 Application du contrôle adaptatif de référence du modèle au contrôle de la puissance active et réactive	52
III.14.1 Modèle de simulation par model référence adaptative control MRAC avec (MIT .	53
III.14.2 Résultat de simulation par model référence adaptative control MRAC avec Méthode (MIT).....	53
III.15 Interprétation des résultats	58
III.16 Conclusion	59
Conclusion générale	61
Références Bibliographiques	63

LISTE DES SYMBOLES

β : Angle d'orientation des pales

θ : Angle électrique de position

Cem : Couple électromagnétique

g : Glissement

Lr : Inductance cyclique rotorique

LS : Inductance cyclique statorique

M : Inductance magnétisante

p : Nombre de paires de pôles

Ps : Puissance active statorique

Qs : Puissance réactive statorique

ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques

ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques

Rr : Résistance rotorique

Rs : Résistance statorique

I_{ds} : Courant statorique sur l'axe d

I_{qs} : Courant statorique sur l'axe q

I_{dr} : Courant rotorique sur l'axe d

I_{qr} : Courant rotorique sur l'axe q

V_{ds} : Tension statorique sur l'axe d

V_{qs} : Tension statorique sur l'axe q

V_{dr} : Tension rotorique sur l'axe d

V_{qr} : Tension rotorique sur l'axe q

ϕds : Flux statorique sur l'axe d

ϕqs : Flux statorique sur l'axe q

ϕdr : Flux rotorique sur l'axe d

ϕqr : Flux rotorique sur l'axe q

θs : Angles électriques statorique

θr : Angles électriques rotorique

Cp : Coefficient de puissance.

G : Gain du multiplicateur.

ρ : La masse volumique de l'air

S : La surface circulaire balayée par la turbine

V_{vent} : La vitesse du vent

$P_{aéro}$: La puissance aérodynamique de la turbine

λ : Le coefficient de la vitesse relative

P_v : La puissance du vent

R : Le rayon de l'aérogénérateur

$C_{aéro}$: Le couple aérodynamique de la turbine

$C_{méc}$: Le couple mécanique

C_t : Le couple de la turbine

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur

$\Omega_{méc}$: La vitesse de rotation de la turbine après le multiplicateur

$J_{turbine}$: L'inertie de la turbine

$J_{méc}$: L'inertie de la génératrice

P_m : Puissance mécanique

P_r : Puissance active rotorique

V_s V_r : Tension triphasé statorique et rotorique de la machine

C_{vis} = $f \Omega_{mec} = (f_m + f_t) \Omega_{mec}$

C_{em} : Couple électromagnétique Produit par la génératrice

C_{vis} : Des frottements visqueux

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient de frottement des pâles.

Ω_{mec} : la vitesse de rotation

C_{mul} : le couple du multiplicateur

C_{em} : le couple électromagnétique de la machine.

C_r : le couple résistant

F_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA

J : L'inertie des parties tournantes

S_a, S_b, S_c : Les vecteurs orientés suivant les enroulements statoriques.

R_a, R_b, R_c : Les vecteurs orientés suivant les enroulements rotoriques.

Θ_r : est l'angle du rotor entre l'axe du rotor et l'axe d.

Θ_s : est l'angle du stator entre l'axe du stator et l'axe d.

Θ : l'angle de position entre le stator et le rotor.

\dot{X} : vecteur d'état

y : vecteur de sortie

u : vecteur de commande

F, h : fonctions d'état

P_{mes} : Puissance active mesuré

Q_{mes} : Puissance réactive mesuré

P_{ref}, Q_{ref} : Puissance active et réactive référence

Glossaire

MADA : Machine asynchrone double alimentation

GADA : Générateur asynchrone double alimentation

MCC : Machine à Courant Continue

MAS : Machine Asynchrone

PI : Proportionnel-Intégrale

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouvert

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermé

MRAC : modèle de référence adaptive contrôle

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe.	13
Tableau I.2: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse variable	14
Tableau I.3: Avantages et inconvénients des différentes machines [25].	15
Tableau I.4 : Quadrants de fonctionnement de la GADA [29].	16

Liste des Figure

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [7].	5
Figure I.2: constitutions d'une éolienne [11].	7
Figure I.3: Eoliennes à axe Vertical [13].	9
Figure I.4: Eoliennes à axe horizontal.	10
Figure I.5: l'énergie éolienne dans le monde [18].	11
Figure I.6: l'énergie éolienne en Algérie [21].	12
Figure I.7: 1er Ferme éolienne en Algérie [23].	12
Figure I.8: Eolienne à vitesse fixe [24].	13
Figure I.9: Eolienne fonctionnant à vitesse variable [24].	14
Figure I.10: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA [24].	16
Figure I.11: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone. [26]	17
Figure I.12: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [24]	17
Figure I.13: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [24]	18
Figure I.14: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [24].	18
Figure II.15 : la partie mécanique de l'éolienne.	22
Figure II.16 : Schéma de la turbine éolienne.	23
Figure II.17 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine	24
Figure II.18 : Schéma bloc du modèle de la turbine	26
Figure II.19: Représentation simplifié de la GADA	27
Figure II.20: Passage du triphasé au biphasé et l'inverse	30
Figure II.21: schéma de principe de l'onduleur	33
Figure III.22 : Principe de la commande vectorielle.	38
Figure III.23: Référentiel diphasé d- q lié au champ tournant statorique.	39
Figure III.24: Schéma bloc du système étudié.	42
Figure III.25: schéma bloc de la commande directe.	43
Figure III.26: Schéma bloc de la commande indirecte.	44
Figure 27 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance	45
Figure III.28: Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s	45
Figure III.29: Schéma bloc de la GADA avec contrôleur PI	47
Figure III.30: Adaptation de la puissance active statorique (P_s) en fonction du temps.	48
Figure III.31: Adaptation de la puissance réactive statorique (Q_s) en fonction du temps.	48
Figure III.32: Principe d'un système de commande adaptative.	50

Figure III.33: commande adaptative direct.	50
Figure III.34: Commande adaptative indirecte.	51
Figure III.35: commande adaptative avec roule (MIT).	52
Figure III.36: Modèle de référence de contrôle adaptatif MRAC de puissance active et réactive de GADA.....	53
Figure III.37: Schéma bloc du contrôleur adaptatif de référence de modèle avec règle MIT..	53
Figure III.38 : Courant statorique générer par phase en fonction du temps.	55
Figure III.39 : Courant statorique triphasé générer par le système en fonction du temps.	56
Figure III.40 : Evolution de la puissance Active statorique en fonction du temps.	57
Figure III.41 : Comparaison entre les puissances active statorique mesuré et référence en fonction du temps.....	57
Figure III.42 : Evolution de la puissance réactive statorique en fonction du temps.	57
Figure III.43: Comparaison entre les puissances réactive statorique mesuré et référence en fonction du temps.....	58

Résumé

Cette recherche porte sur un contrôle vectoriel de l'énergie active et réactive via les réseaux neuronaux d'un système MADA intégré (machine asynchrone double alimentation). Un convertisseur bidirectionnel est utilisé pour fonctionner sur des signaux rotatifs afin de transmettre la puissance entre le stator et le réseau. Pour une étude comparative, le contrôle indépendant de la puissance active et réactive est garanti dans la première étape par des régulateurs conventionnels (PI), et dans la seconde étape par un modèle de référence (MRAC) pour le réglage de la puissance active et réactive du générateur asynchrone à double alimentation (GADA). La conception de la technique proposée est basée sur les concepts de (MIT). Elle permet de résoudre le problème de robustesse vis à-vis de la variation des conditions de fonctionnement et de la variation des paramètres internes de la GADA. Les résultats obtenus par simulation montrent les hautes performances et la robustesse de cette commande. Comparées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots-clés :

Machine asynchrone à double alimentation, turbine éolienne, commande vectorielle, modèle de référence (MRAC).

ملخص :

يركز هذا البحث على التحكم في ناقلات الطاقة النشطة والمتفاعلة عبر الشبكات العصبية لنظام MADA المتكامل (آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة). يستخدم المحول ثنائي الاتجاه للعمل على الإشارات الدوارة لنقل الطاقة بين الجزء الثابت والشبكة. للدراسة المقارنة ، يتم ضمان التحكم المستقل للقوة النشطة والمتفاعلة في المرحلة الأولى من قبل المنظمين التقليديين (PI) ، وفي المرحلة الثانية بواسطة نموذج مرجعي (MRAC) لتعديل القوة النشطة والمتفاعلة. المولد غير المتزامن مزدوج التغذية (GADA). يعتمد تصميم التقنية المقترحة على مفاهيم (MIT). حيث أنه يجعل من الممكن حل مشكلة المتانة فيما يتعلق باختلاف ظروف التشغيل وتغيير المعلمات الداخلية لـ GADA. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة الأداء العالي والمتانة لهذا الأمر. مقارنة بالمحاكاة باستخدام برنامج Matlab / Simulink.

الكلمات الدالة :

آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية ، توربينات الرياح ، التحكم في القوة الموجهة ، النموذج المرجعي (MRAC).

Summary:

This research focuses on a vector control of active and reactive energy via the neural networks of an integrated MADA system (double-fed asynchronous machine). A bi-directional converter is used to operate on rotating signals to transmit power between the stator and the grid. For a comparative study, the independent control of the active and reactive power is guaranteed in the first stage by conventional regulators (PI), and in the second stage by a reference model (MRAC) for the adjustment of the active and reactive power. of the double-fed asynchronous generator (GADA). The design of the proposed technique is based on the concepts of (MIT). It makes it possible to solve the problem of robustness with respect to the variation of the operating conditions and the variation of the internal parameters of the GADA. The results obtained by simulation show the high performance and the robustness of this command. Compared by simulation using Matlab/Simulink software.

Key words:

Double-fed asynchronous machine, wind turbine, vector control, reference model (MRAC).

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Le besoin en énergie augmente constamment pour suivre les développements industriels en cours et pour fournir aux gens un niveau de vie confortable. En fait, cette demande croissante a déclenché l'épuisement des combustibles fossiles et a directement conduit à la libération de gaz à effet de serre dans l'espace, ce qui a accéléré le changement climatique de la Terre. De plus, à la suite de ces problèmes, les gens du monde entier se tournent de plus en plus vers des sources d'énergie alternatives, c'est pour cela tous les pays du monde cherchent ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelable (propre, durable, etc. ...).

L'énergie électrique est un élément crucial de tout développement socio-économique. Elle est devenu un besoin très importants que nous ne pouvons pas vivre sans. La croissance de la demande des énergies électrique est devenue très importante vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructif pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. [1].

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre [2].

Le développement des éoliennes présente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables.

L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières soit par la conservation de l'énergie mécanique : le vent est alors utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin. Soit par la transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides, etc.). Ou encore par la production d'énergie électrique, l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour débutée du courant continu ou alternatif [3].

Introduction générale

Pour générer de l'énergie électrique et la transmettre au réseau électrique ou alimenter un site isolé, une turbine est connectée à un générateur électrique. Actuellement, le système de turbine à vitesse variable basé sur GADA (générateur asynchrone double alimentation) est le plus couramment utilisé dans les parcs éoliens. Le système éolien de conversion d'énergie n'est pas linéaire et nécessite des contrôleurs puissants. Dans ce mémoire, il est suggéré d'utiliser une commande vectorielle et le contrôle adaptatif modèle référence (MRAC).

Motivations et objectifs :

A la lumière de ce constat, l'objectif principal de ce mémoire est, la modélisation et la commande en puissance d'un système éolien à base d'une MADA dont le stator est lié directement au réseau électrique. Nous avons établi donc un modèle de la chaîne de conversion éolienne afin de maximiser la puissance extraite. Notre étude a été effectuée sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Structure du mémoire :

Le présent mémoire est une tentative de faire partie du monde de recherche et étude dans

le domaine de l'art d'énergie éolienne. Il débute par :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités, à la description des systèmes éoliens, leurs avantages et inconvénients et de son développement avec le temps et en Algérie. On présentera aussi les différents composants et types d'éoliennes.
- Dans le deuxième chapitre, nous ferons la modélisation d'une chaîne de conversion utilisant une GADA. Cette chaîne est composée d'une série d'éléments : Turbine (3 pales), arbre, multiplicateur, GADA et convertisseur de puissance. La modélisation est divisée en :
 - Partie mécanique : turbine, multiplicateur, l'arbre
 - Partie électrique : génératrice à double alimentation (GADA) au sens de Park
- Le troisième chapitre on a pu établir une commande découplée et robuste des puissances active et réactive générées par une GADA. Le travail effectué est une simulation numérique de la commande adaptative MRAC au sein de la commande vectorielle indirecte d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation. Dans la commande adaptative proposée MRAC, nous avons utilisé la pour la conception du mécanisme d'adaptation et du régulateur de la boucle interne.

CHAPITRE I :
ÉTAT DE L'ART DE L'ÉOLIENNE

I.1 Introduction

La question de l'électrification des endroits reculés où un grand nombre de personnes sont privées de toute source d'énergie, incapables de satisfaire même les besoins les plus élémentaires, et dont les conditions de vie se détériorent, peut être résolue par des sources d'énergie renouvelables qui permettent une production décentralisée d'électricité. L'architecture des nombreuses technologies utilisées pour capter l'énergie éolienne devient de plus en plus performante. Nous intéressons à l'efficacité de l'énergie mécanique en conversion de l'énergie électrique [4].

Dans ce chapitre, nous fournissons d'abord une définition générale de l'énergie éolienne, puis illustrons les deux différents types d'éoliennes (verticale et horizontale), et enfin énumérons les avantages et les inconvénients des différentes machines utilisées dans le système d'éoliennes le plus important.

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

Le vent a été utilisé pendant plusieurs siècles comme source d'énergie traditionnelle et propre pour la propulsion des navires (il y a environ 3 000 ans), l'entraînement des moulins (environ 2 00000 moulins éoliens fonctionnaient en Europe au milieu du 19ème siècle), le pompage de l'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces utilisations les plus récentes reposent toutes sur la conversion de l'énergie éolienne captée par les hélicoptères en énergie mécanique utilisable [5].

La première éolienne génératrice d'électricité a été construite par l'ingénieur danois Poule La Cour en 1891, après le développement de l'électricité en tant que type d'énergie contemporain et les recherches ultérieures sur les générateurs électriques.

Suite à la création du premier générateur d'avion, les ingénieurs français ont considérablement amélioré cette technologie tout au long de la Première et de la Seconde Guerre mondiale. La crise pétrolière de 1974 est principalement responsable du relèvement de la barre des études et des expériences, ce qui oblige plusieurs pays à commencer à investir dans l'avancement et la modernisation de la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, le premier marché important en Californie entre 1980 et 1986 est mentionné, notamment dans un premier temps avec les turbines de moyenne puissance (55 kW). Puis, en 1981, 144 machines d'une puissance combinée de 7 MW ont été ajoutées, et en 1985, 4687 machines d'une puissance combinée de 386 MW l'ont été. Après toutes ces années, le marché européen s'est vraiment effondré, permettant à l'industrie pétrolière de se développer de

manière significative, en particulier dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont un impact important sur le marché mondial, qui a augmenté en moyenne de 7 500 MW par an entre 1998 et 2004 et a atteint 10 000 MW en 1998 [6].

I.3 L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, également connu sous le nom d'éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie mécanique du vent (flux en mouvement) en énergie mécanique qui peut être utilisée sur une jambe de transmission, puis en énergie électrique grâce à l'utilisation d'un générateur.

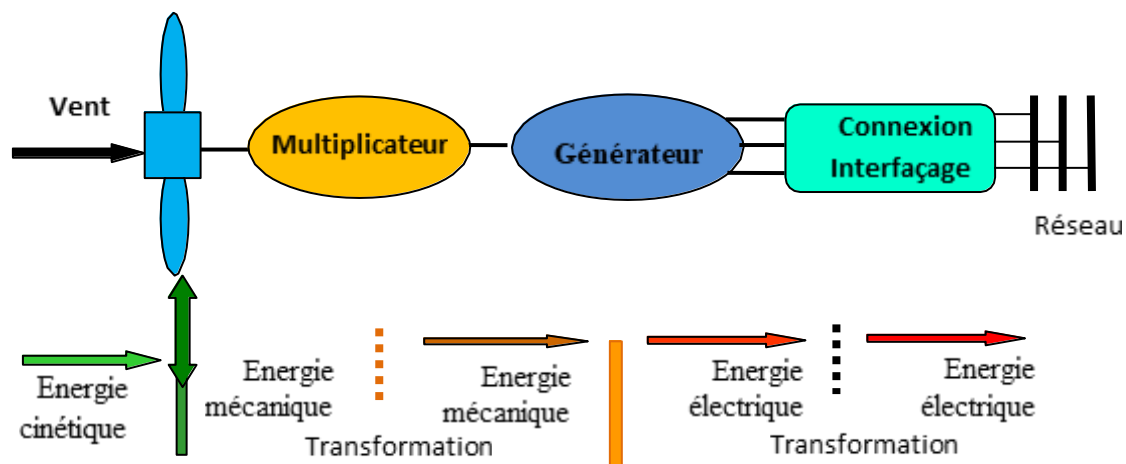


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [7].

En plus d'être une énergie renouvelable, non dégradable et largement dispersée, l'énergie éolienne n'émet aucun polluant atmosphérique ni aucun produit de désintégration radioactif. Il est cependant temporellement erratique et sa capture est encore très difficile, nécessitant la mise en place de grands mâts et de pâles (jusqu'à 60 m pour plusieurs éoliennes mégawatts) dans des zones géographiquement isolées pour éviter les phénomènes de turbulence [8].

I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Les avantages de l'utilisation de ce type d'énergie sont évidemment liés à la croissance de l'industrie pétrolière et gazière. Cette source d'énergie présente également des inconvénients qui doivent être étudiés pour s'assurer qu'ils n'entravent pas son développement.

I.4.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [9], [10] :

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, ce qui signifie que, contrairement aux combustibles fossiles, elle continuera d'être utile aux générations futures.

2. L'utilisation de L'énergie éolienne empêche déjà la production de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 millions de tonnes de SO₂ et 17,5 millions de tonnes de NO₂, les principaux contributeurs aux pluies acides. L'énergie éolienne n'est plus une énergie nucléaire comme elle l'était autrefois. Il est évident que l'énergie nucléaire ne produit pas de déchets radioactifs.
3. Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, Contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
4. Les parcs extraterrestres sont très simples à démonter et ne laissent aucune trace.
5. Il s'agit d'une source d'énergie locale qui répond aux besoins énergétiques de la région.
6. Cette source d'énergie peut stimuler davantage l'économie locale, en particulier dans les zones rurales. C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
7. Les pays en développement trouvent cette source d'énergie assez intrigante. Elle répond au besoin essentiel d'énergie dans ces pays pour le développement. Un parc ou un générateur d'éthanol peut être installé très facilement. Enfin, ce type d'énergie est facilement incorporé dans un système électrique déjà existant.
8. La période de productivité élevée est l'hiver (vents plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est la plus forte.

I.4.2 Inconvénients

1. L'impression visuelle reste un sujet subjectif.
2. Les niveaux de bruit ont été réduits, en particulier le bruit mécanique, qui a presque disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique par rapport à lui dépend de la vitesse de rotation du rotor, qui doit être contrôlée.
3. L'effet sur les oiseaux : certaines études montrent qu'ils évitent les aérogénérateurs. D'autres études ont montré que pour éviter que les voies de migration des oiseaux ne soient perturbées par les éoliennes, les sites éoliens ne devraient pas y être placés.
4. La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.

I.5 Constitution des éoliennes

L'éolienne classique est constituée de trois éléments principaux mécaniques et électriques qui sont :

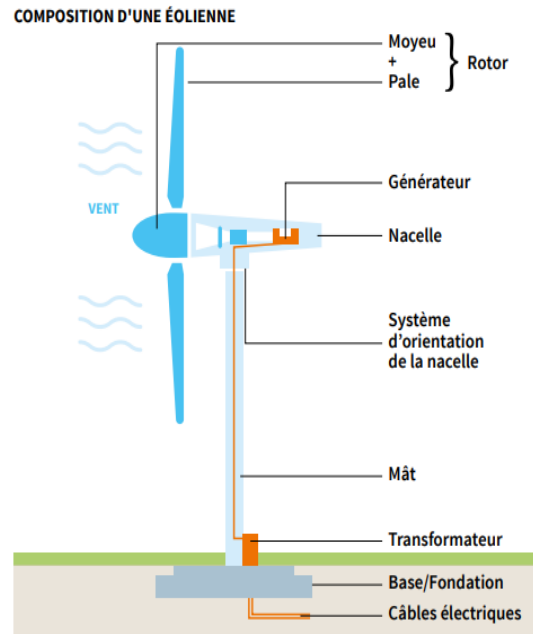


Figure I.2: constitutions d'une éolienne [11].

I.5.1 Le mat

Est un tube en aluminium ou un garde-corps métallique qui protège les câbles assurant la connectivité électrique et l'accès à la nacelle par l'intermédiaire d'un escalator intégré. Son rôle principal est de soutenir l'ensemble rotor + nacelle afin de placer le rotor à une hauteur élevée suffisante parce que plus le mat est élevé en hauteur plus la vitesse du vent est grande d'où la puissance captée augmente mais cela s'accompagne également de l'augmentation du coût de la quantité de matière mise en œuvre. Il est fixé sur une fondation au sol et pour faire face à la force du vent il doit être forme du béton qui assure les maintiens d'éolienne. La hauteur du mat peut atteindre 10m et 80m ceci dépend du type d'éolienne et du site d'implantation [12].

I.5.2 Le rotor

Il fonctionne comme le composant mobile du système, convertissant l'énergie éolienne en énergie mécanique. Il est constitué d'un moyeu qui supporte des pales à l'extrémité de l'éolienne et est monté sur un arbre élancé (primaire du multiplicateur) Le nombre de pales

varie typiquement de 1 à 3, et lorsque ce nombre est élevé, un couple important est transmis à l'arbre du rotor.

Ils disposent également d'un système de réglage de la position des pales pour contrôler la vitesse de rotation du vent tout en agissant sur des rotors à vitesse fixe, permettant au générateur de fonctionner sans avoir besoin d'appareils électroniques de puissance et de se connecter directement au réseau. Cela le rend plus simple et moins coûteux, et dans le cas des rotors à vitesse variable, la réduction des coûts peut être obtenue en la possibilité de désactiver le système d'orientation des pales [13].

- **Moyeu en générale :**

Il s'agit d'un morceau d'aluminium formé qui est monté sur l'arbre prêté du multiplicateur en utilisant des brides normalisées comme structure de support. Il est souvent doté d'un capuchon de protection en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique [12].

- **Les pales :**

C'est une composante essentielle des éoliennes. Le nombre de pales affecte directement l'efficacité de conversion du rotor ; à mesure que le nombre de pales augmente, un couple plus important sera transmis à l'arbre du rotor [12].

I.5.3 La nacelle

C'est le cœur de l'aigle. Elle regroupe tous les éléments de transmission mécaniques et pneumatiques entre la génératrice électrique et la turbine, qui est fréquemment une machine synchrone ou asynchrone selon ses nombreuses configurations. Ce composant comprend le multiplicateur de vitesse, l'essieu primaire et l'essieu secondaire.

Les systèmes de contrôle de l'orientation de la nacelle utilisent des capteurs de vent, communément appelés anémomètres à girouette, ainsi que d'autres systèmes électroniques qui permettent de réguler le fonctionnement général du mécanisme. L'utilisation de convertisseurs de puissance électroniques est courante chez les éoliennes, qui sont souvent soit connectées à un réseau, soit fonctionnant de manière autonome avec un refroidissement à air ou à eau [12].

I.6 Les types d'éoliennes

Les deux grandes familles d'éoliennes se distinguent par la direction de leurs axes :

I.6.1 Eoliennes à axe vertical

Elles sont considérées comme des éoliennes à « axe vertical » parce que l'axe de rotation du rotor est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Ce sont les premiers bâtiments producteurs d'électricité jamais créés [14]. Ils ont l'avantage d'avoir le panneau de commande et le générateur au niveau du sol, ce qui les rend faciles à atteindre [15].

a- Eolienne de type Savonius b- Eolienne de type Darrieus

Figure I.3: Eoliennes à axe Vertical [13]

a) Avantages :

1. L'avantage de la conception verticale est que le multiplicateur, le générateur et les dispositifs de commande sont tous placés directement sur le sol.
2. Son axe vertical a une symétrie de révolution, lui permettant de fonctionner dans n'importe quelle direction de vent sans avoir à régler le rotor.
3. Sa conception est simple, durable et nécessite peu d'entretien [16].

b) Inconvénients :

1. Ils fonctionnent moins bien que ceux avec un axe horizontal.
2. La conception verticale de ce type d'éolienne l'oblige à fonctionner avec un vent proche du sol et moins puissant car ralenti par le relief.
3. Elles occupent une surface plus importante que l'éolienne tournante puisque sa mise en place au sol nécessite l'utilisation de poulies qui doivent croiser des pales [16].

I.6.2 Eoliennes à axe horizontal

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles sont de conception simple, comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau. Il existe des éoliennes à axe horizontal à marche lente et à marche rapide [14].



Figure I.4: Eoliennes à axe horizontal.

a) Avantages :

1. Un très faible impact sur le sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
2. Cette structure capte le vent d'en haut, le rendant plus fort et plus constant qu'au niveau du sol.
3. Le générateur et l'équipement de contrôle sont situés dans la nacelle en haut du virage.
4. De ce fait, il n'est pas nécessaire d'ajouter un local à l'appareil [16].

b) Inconvénients :

1. Coûts de construction très élevés.
2. L'emplacement de l'équipement au sommet du trajet rend l'assistance d'urgence difficile.
3. Malgré ses inconvénients, cette forme est la plus courante dans la société moderne.
4. Mais dans les zones isolées, les bâtiments à axe vertical continuent d'être utilisés pour la production d'électricité.
5. Ils ont peu de puissance et sont destinés à des usages continus, comme la recharge de batteries par exemple [16].

I.7 La puissance éolienne dans le monde

Près de 60,4 GW de capacité éolienne installée ont été installées dans le monde en 2019 (dont 6,1 GW offshore), soit une augmentation de 19% par rapport aux 50,7 GW installés en 2018. En termes de croissance, il s'agit de "la deuxième meilleure année" de l'histoire du film. Fin 2019, la puissance installée du parc éolien mondial atteignait 651 GW.

Ces données de puissance doivent être comparées à la production d'électricité associée. Selon le GWEC, le parc éolien mondial a produit 1 390 TWh en 2019. Cette production équivaldrait à environ 5,8 % de la consommation annuelle mondiale d'électricité.

Le GWEC estime que le facteur de charge global moyen pour les installations de parcs exotiques est de 23 % pour les installations terrestres et de 40 % pour les installations marines [17].

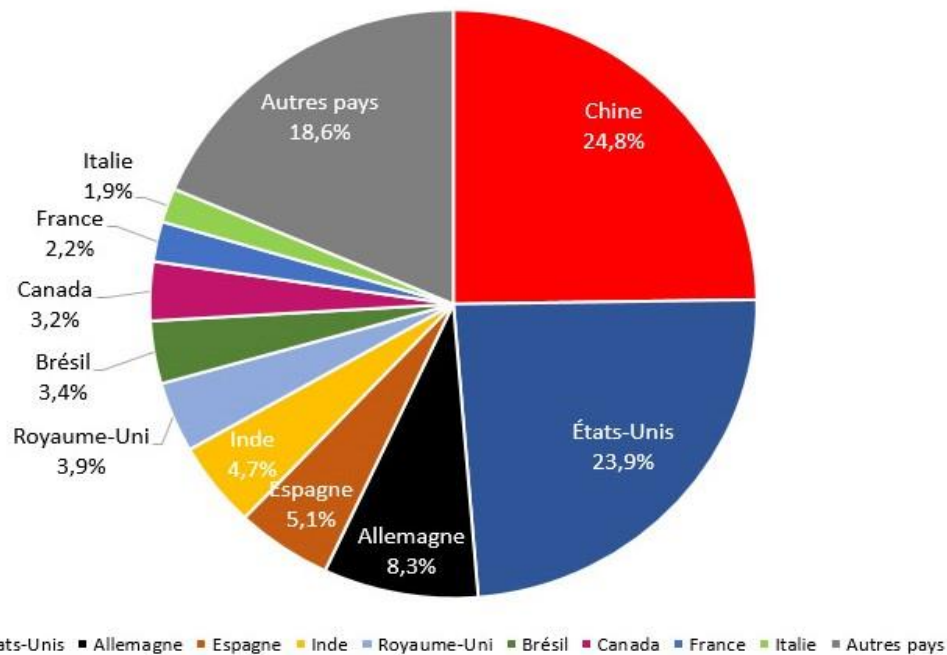


Figure I.5: l'énergie éolienne dans le monde [18].

I.8 Energie éolienne en Algérie

a) A Gisement éolien en Algérie

Une des étapes les plus cruciales avant l'installation potentielle d'un parc éolien est l'évaluation de l'énergie éolienne disponible dans une certaine zone. Pour ce faire, il faut d'abord quantifier la consommation énergétique de la zone rendue possible par l'établissement de l'atlas pétrolier et gazier [19]. L'effort le plus récent pour créer un atlas des vents en Algérie a été réalisé par S. Boudai dans sa thèse de doctorat de 2013 [20], dans laquelle il a introduit des données sur les vitesses moyennes annuelles du vent provenant de 24 stations météorologiques proches des frontières algériennes. A 10 mètres sous la surface, la période de mesure a été réalisée au cours de la dernière décennie. La figure I.4 représente la vitesse annuelle moyenne du vent en Algérie à 10 mètres au-dessus du sol.

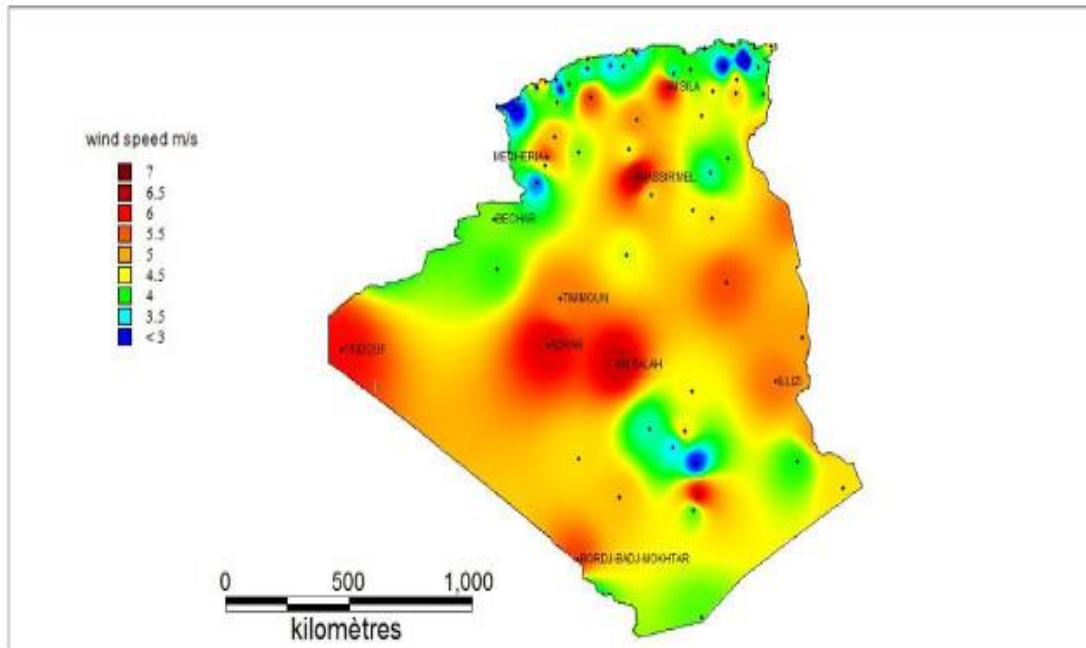


Figure I.6: l'énergie éolienne en Algérie [21].

b) Situation actuelle et future de la filière éolienne en Algérie

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois de travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars. Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien [22].



Figure I.7: 1er Ferme éolienne en Algérie [23].

I.9 Les différentes technologies du système éoliennes

I.9.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.



Figure I.8: Eolienne à vitesse fixe [24]

Avantages	Inconvénients
1. Système électrique simple. 2. Moins chère. 3. Ne nécessite pas de système d'électronique de puissance. 4. Compte rendu d'entretien.	1. La difficulté de contrôler la puissance transférée au réseau. 2. L'existence d'oscillations de niveau de puissance.

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe.

I.9.2 Les éoliennes à vitesse variable

Constitué d'une machine à double alimentation (GADA) ou d'une machine synchronisée sur cibles permanentes (MSAP). Ces derniers dispositifs (GADA et MSAP) sont principalement installés pour augmenter la quantité d'énergie éolienne extraite ainsi que pour leurs capacités de réglage.

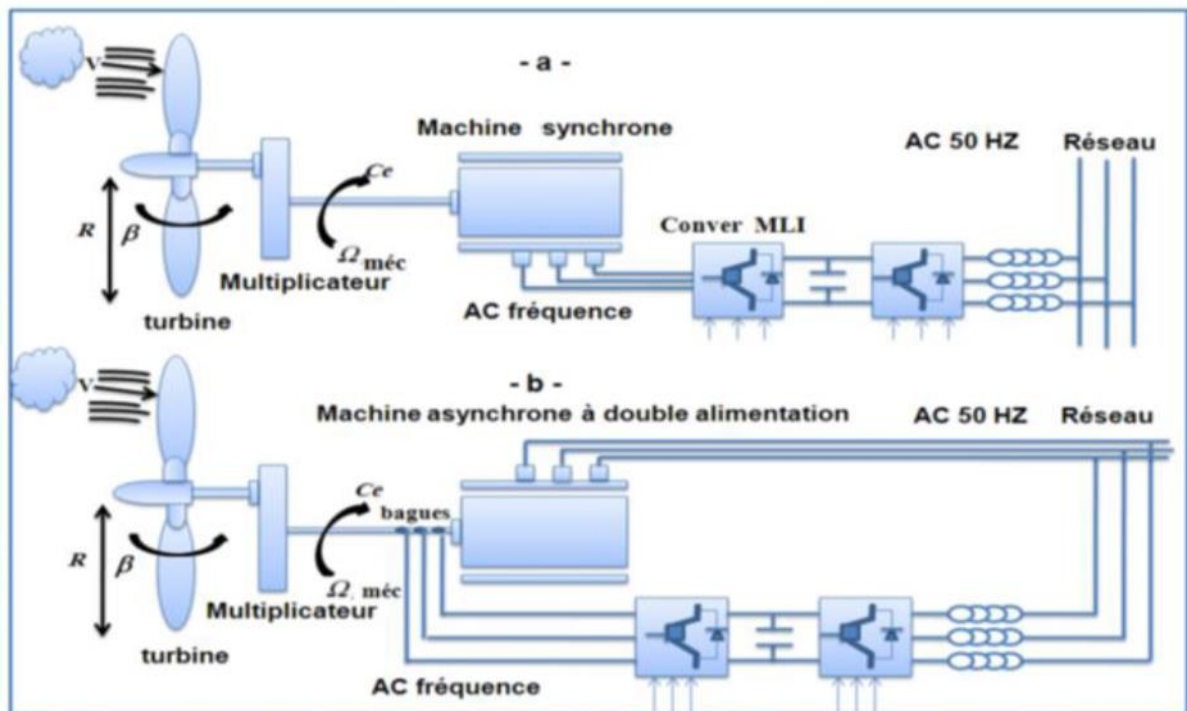


Figure I.9: Eolienne fonctionnant à vitesse variable [24]

Avantages	Inconvénients
1. Contrôler le flux d'énergie vers le réseau et produire. 2. une énergie de la plus haute qualité. 3. Réduction des blessures.	1. Utilisation d'équipements spécialisés (Esp: GADA). 2. considérations supplémentaires très essentielles (convertisseur, commande).

Tableau I.2: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse variable

I.10 Synthèse des différentes machines utilisées dans le système éolien :

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse fixe	-Appareil robuste. -Petit prix. -Pas d'électromagnétisme puissant.	-Puissance extraite non optimisée. - Entretien du compteur de vitesse. -Manque de contrôle sur l'énergie réactive. - La machine-magnétisation imposée par le

		réseau.
GADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement à vitesse variable -Puissance extraite optimisée. - Un appareil électromécanique de puissance nominale à 30% de la puissance nominale. - Exigences des machines. - connexion à la machine plus simple à utiliser. - Une loupe de la machine gérée en cas de panne réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien de la boîte de vitesses. -Prix de l'Electronique de Puissance. -Contrôle et commande complexes. -Contact bagues et balles coulissantes.
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Extraction de puissance optimisée pour les vents légers ; fonctionnement à vitesse variable sur tout le spectre de vitesse. -Connexion machine facile à gérer ; absence potentielle de limiteur de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût de l'électronique de puissance. - Machine particulière. -Le grand diamètre de la machine. -Puissant électromagnétique. -dimensionné pour la puissance de sortie nominale du générateur.

Tableau I.3: Avantages et inconvénients des différentes machines [25].

I.11 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (GADA)

La littérature atteste de l'attention importante portée à la machine bio-carburant pour des applications variées, notamment comme générateur pour l'énergie éolienne ou comme moteur pour certains usages industriels comme le laminage, la traction ferroviaire, ou encore la propulsion navale [24].

I.12 Mode de fonctionnement de la GADA

La principale différence entre le GADA et la machine asynchrone conventionnelle est qu'avec le GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui détermine s'il fonctionnera en générateur ou en moteur [24].

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

Tableau I.4 : Quadrants de fonctionnement de la GADA [29].

Le GADA est entièrement contrôlable, mais seulement si le flux de puissance est soigneusement géré dans les enroulements du rotor. Étant donné que le GADA peut fonctionner comme un générateur à des vitesses hypo synchrones et hyper synchrones, il existe quatre modes de fonctionnement distincts qui définissent la machine [25].

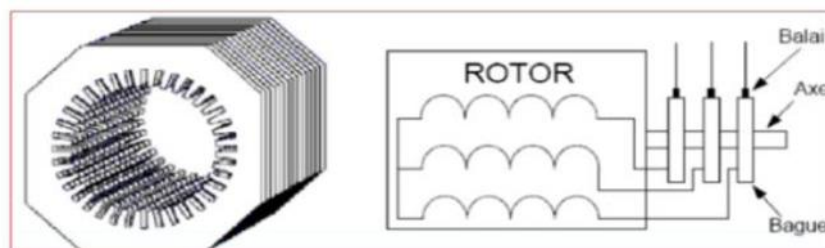


Figure I.10: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA [24].

I.12.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La Figure I.11 illustre comment le réseau alimente le stator et comment le rotor transfère la puissance de glissement vers le réseau. Par conséquent, le fonctionnement du moteur est inférieur à la vitesse de synchronisation. La machine à cage asynchrone traditionnelle peut fonctionner comme prévu, mais la puissance du coulisseau est perdue sous forme de pertes Joule dans le rotor [24].

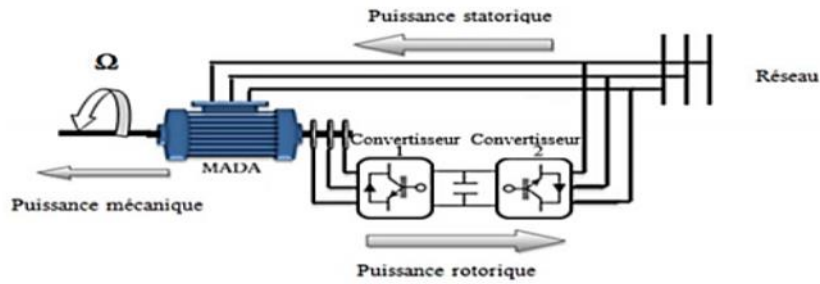


Figure I.11: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone. [26]

I.12.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

La Figure I.12 montre que le réseau fournit à la fois la puissance et la puissance de glissement au stator et au rotor, respectivement. Par conséquent, il y a un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisation. Les machines à cage asynchrones traditionnelles ne peuvent pas fonctionner de cette manière [24].

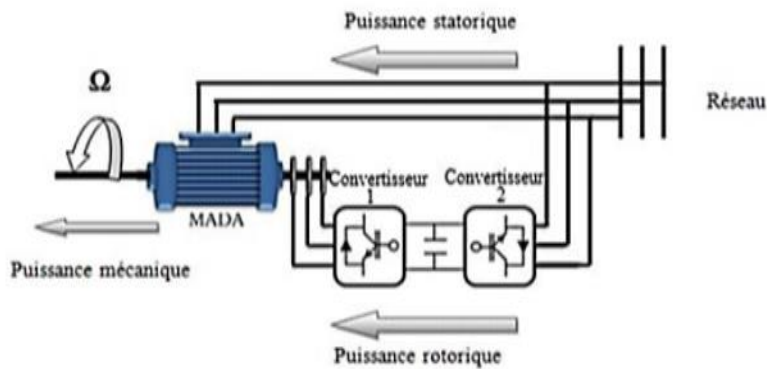


Figure I.12: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [24]

I.12.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

La Figure I.13 illustre comment le stator alimente le réseau. Le rotor assume alors le rôle d'absorber la puissance de glissement. En conséquence, il existe un générateur qui fonctionne en dessous de la vitesse de synchronisation. Ce mode de fonctionnement n'est pas possible Pour la machine à cage asynchrone conventionnelle [24].

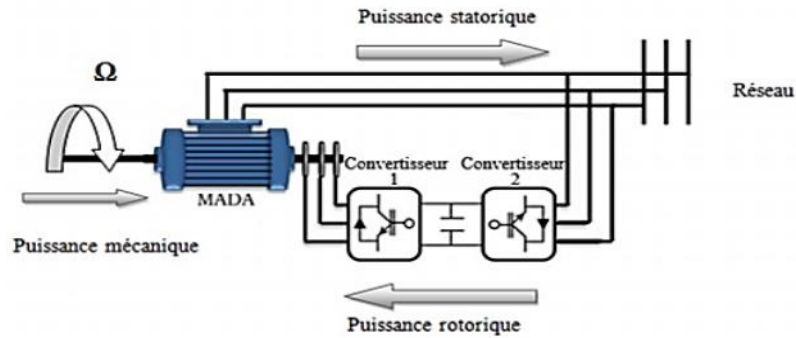


Figure I.13: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [24]

I.12.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

La Figure I.14 illustre comment le stator alimente alors le réseau et comment le rotor récupère ensuite la puissance de glissement pour la réinjecter dans le réseau. Par conséquent, il existe un générateur qui fonctionne au-dessus de la vitesse de synchronisation. Ce mode de fonctionnement est possible avec la machine classique asynchrone à cage, cependant dans ce cas, la puissance du coulisseau est perdue sous forme de pertes Joule dans le rotor [24].

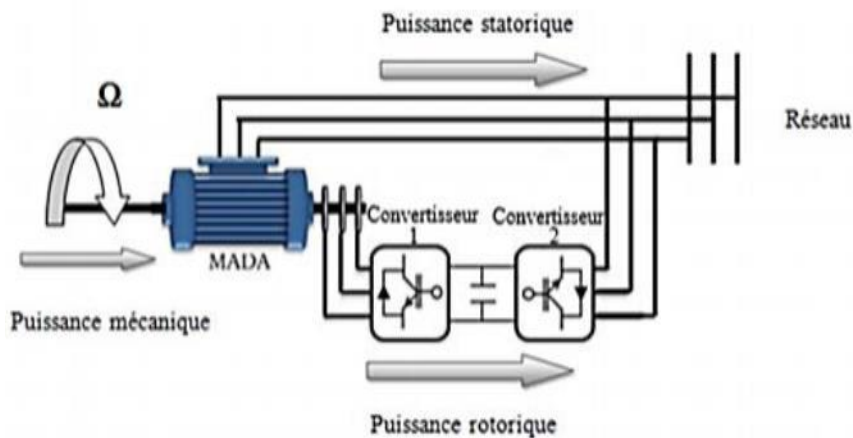


Figure I.14: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [24].

I.13 Avantages et inconvénients de la GADA

a) Avantage :

Les principaux avantages de la GADA sont :

1. Il est possible de mesurer des courants car le rotor et le stator sont accessibles, ce qui confère au contrôle du débit et du couple électromagnétique une grande.

2. Souplesse et une grande précision. De plus, il dispose de multiples options de reconfigurable grâce à sa double alimentation, ce qui permet un large éventail d'applications pour cette dernière.
3. Un fonctionnement en accouplement constant est possible au-dessus de la vitesse nominale.
4. Dans ce cas, les pertes de l'interrupteur ont été faibles, conduisant à un rendement de conversion du système élevé.
5. Le convertisseur est dimensionné pour fonctionner au quart de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement indépendante de la vitesse de synchronisation.
6. Lorsqu'un onduleur tombe dans une casserole, un fonctionnement dégradé est plus fluide qu'une machine d'alimentation basique [26].

b) Inconvénients :

Le premier inconvénient du GADA est qu'il s'agit d'une machine asynchrone ; ainsi, la complexité de sa commande est impliquée par le fait que sa structure n'est pas linéaire. De plus, les inconvénients suivants peuvent être mentionnés :

1. Comparée à une MAS avec une cage de puissance équivalente, elle est plus volumineuse.
2. Le nombre de convertisseurs et le prix augmentent tous deux en raison de l'aspect multi-convertisseurs.
3. Cependant, certaines études suggèrent le contraire.
4. Nous utilisons plus de convertisseurs que la machine à cage, comme deux redresseurs et deux ondules ou un redresseur et deux ondules (un redresseur et un onduleur).
5. Nécessite un entretien périodique, ce qui augmentera le coût de fonctionnement [27].

I.14 Applications des éoliennes

Trois utilisations différentes peuvent être faites avec un système de refroidissement par évaporation :

- Systèmes hybrides.
- Systèmes isolés.
- Systèmes liés aux réseaux.

Les systèmes respectent une configuration fondamentale : ils nécessitent une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, une unité de stockage [28].

I.15 Conclusion

Ce chapitre fournit une généralisation sur les turbines. Nous avons commencé par définir les turbines, puis nous avons illustré les différents types de turbines (turbine verticale et turbine horizontale), et enfin nous avons listé les avantages et les inconvénients des différentes machines utilisées dans le système de turbine le plus important.

CHAPITRE II:

**MODÉLISATION DUNE CHAÎNE DE
CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE
À BASE D'UNE GÉNÉRATRICE
ASYNCHRONE**

Chapitre II: Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone

II.1 Introduction

L'éolienne a pour but de convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique en utilisant différents composants optimisés pour maximiser cette conversion. Un bon équilibre entre les caractéristiques de la turbine et du générateur électrique est crucial [29].

Dans ce chapitre, nous allons modéliser une chaîne de conversion qui utilise une génératrice à double alimentation (GADA) au sens de Park. Cette chaîne est composée d'une turbine à trois pales, d'un arbre, d'un multiplicateur, d'une GADA et d'un convertisseur de puissance. La modélisation se divise en deux parties : une partie mécanique qui inclut la turbine, le multiplicateur et l'arbre, et une partie électrique qui concerne la GADA au sens de Park.

II.2 Modèle Partie mécanique

La composante mécanique de la turbine étudiée se compose de trois pales de longueur R . Ils sont fixés à un rotor d'entraînement qui tourne à une vitesse turbo et est connecté à un multiplicateur G gain. Ce multiplicateur alimente un générateur électrique [30].

On considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut-être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses, comme illustre la figure II.15 :

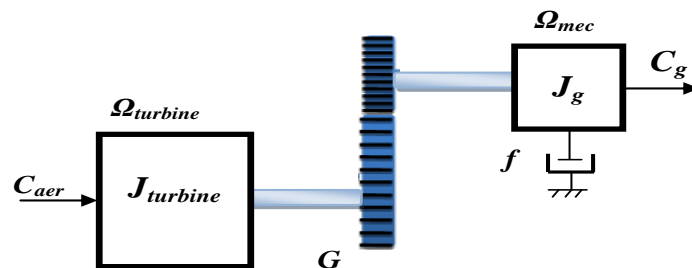


Figure II.15 : la partie mécanique de l'éolienne.

Avec :

$J_{turbine}$: le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne

J_g : le moment d'inertie de la MADA ;

f : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA ;

C_g : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA ;

Ω_{mec} : la vitesse de rotation de la MADA

II.2.1 modèle de la Turbine

Le dispositif qui est étudié ici est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , comme le montre la figure II.16 :

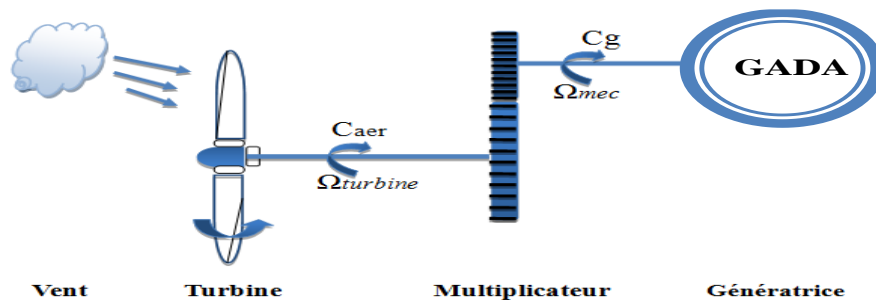


Figure II.16 : Schéma de la turbine éolienne

a) puissance d'un éolien :

La relation suivante décrit l'énergie cinétique du vent lorsqu'il passe à travers un disque d'huile de longueur d'onde R [31].

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (II.1)$$

b) puissance aérodynamique :

Le vent exerce une force (V) sur les lames de la turbine, les faisant tourner et, par conséquent, développer une force mécanique sur le centre de la lame. Cette puissance se manifeste comme suit [31].

$$p_{aero} = C_P \cdot p_{vent}$$

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II. 2})$$

Avec : $\lambda = \frac{\Omega L R}{v}$

ρ : la masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

C_p : Le coefficient de puissance (rendement aérodynamique de la turbine).

λ : le coefficient de la vitesse relative (le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent).

β : l'angle des pâles ou bien l'angle de calage.

V : la vitesse du vent.

Ωt : La vitesse de rotation de la turbine

c) coefficient de puissance c_p :

Le C_p indique le ratio de la puissance récupérée à celle récupérable. Ce coefficient a une valeur maximale de 16/27, ou 0,59. La puissance maximale extraite pour une vitesse de vent donnée est fixée par cette limite théorique, connue sous le nom de limite de Betz. Cette limite n'est vraiment jamais atteinte, et chaque turbine est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative [32].

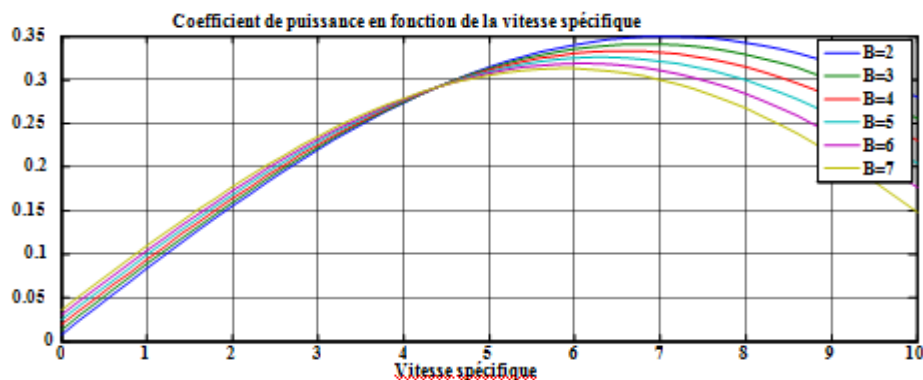


Figure II.17 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine

II.2.2 Multiplicateur

Le multiplicateur ajuste la vitesse de la turbine (lentement) par rapport à la rapidité du générateur. En règle générale, la turbine est connectée à l'axe du générateur par un multiplicateur, avec le gain de vitesse du multiplicateur G sélectionné pour définir la vitesse de l'essieu du générateur dans la gamme de vitesses souhaitée. Le couple et la vitesse de la turbine sont liés à la base du générateur lorsque les pertes de transmission sont négligées [33].

Ce multiplicateur est modélisé automatiquement par simple gain les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II. 3})$$

$$\Omega_g = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II. 4})$$

Où : C_g : couple du multiplicateur ; Ω_{mec} : la vitesse de rotation du générateur ;

G : gain de multiplicateur.

II.2.3 L'arbre mécanique

Je suis l'inertie totale de la turbine qui est transférée au rotor, et je suis le modèle mécanique de toute cette inertie.

$$J = j_{génératrice} + j_{turbines} \quad (\text{II.5})$$

La paire mécanique comprend l'électromagnétisme, le multiplicateur et la paire de friction visqueuse :

$$C_{mec} = C_{mul} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.6})$$

L'équation différentielle suivante capture le comportement mécanique de l'ensemble du système de générateur de turbines [34].

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.7})$$

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mul} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.8})$$

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mul} - C_{em} - (f_m + f_t) \Omega_{mec} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

J_t : Inerties de la turbine.

J_m : Inerties de la machine.

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} = (f_m + f_t) \Omega_{mec}$$

C_{em} : Couple électromagnétique Produit par la génératrice

C_{vis} : Des frottements visqueux

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient de frottement des pâles.

Ω_{mec} : la vitesse de rotation

C_{mul} : le couple du multiplicateur

II.2.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

Le multiplicateur reçoit une paire aérodynamique générée par la turbine. Cette paire peut être calculée en utilisant les valeurs de la vitesse du vent et de la rotation de la turbine.

Le multiplicateur change la vitesse de la turbine et de la paire aérodynamique.

La vitesse mécanique et le multiplicateur.

De cette façon, la paire électromagnétique du convertisseur électrique peut contrôler la turbine. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation [35].

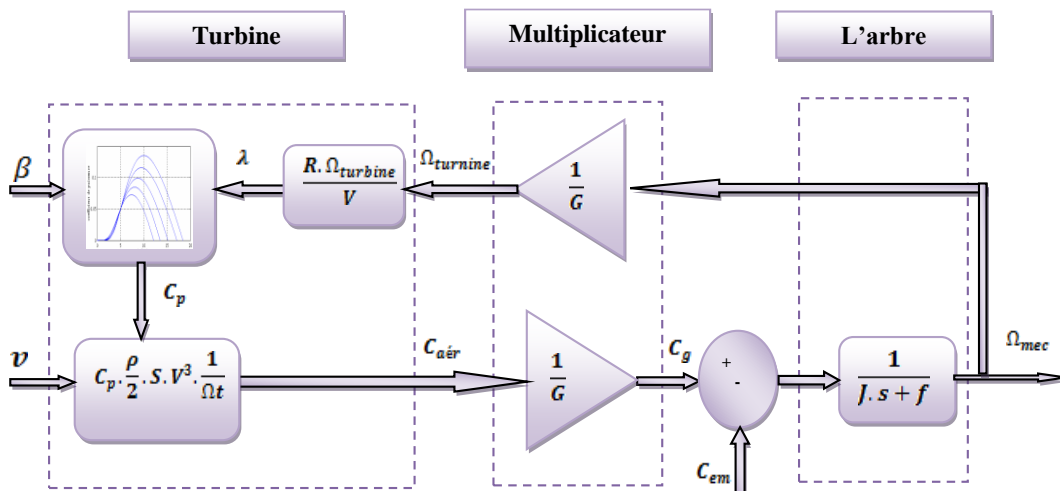


Figure II.18 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3 Modélisation Partie électrique

II.3.1 Hypothèse simplificatrices

- L'entrefer constant
- L'effet des encoches négligé
- Comportement de la machine asynchrone à double alimentation
- Les pertes sont négligées
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale .

II.3.2 Description de la GADA

Le GADA dispose d'un double accès au stator et au rotor. En raison de l'imposition de fréquences sur les deux armatures, il semble fonctionner comme une machine synchronisée à une vitesse constante, et sa nature asynchrone est le résultat de la différence de vitesse entre le stator et le rotor. Son amplification est assurée par les contributions de ses deux armatures alimentées par source alternative. Cette opération pourrait certainement être résumée comme « synchrone machine avec excitation alternante » [32].

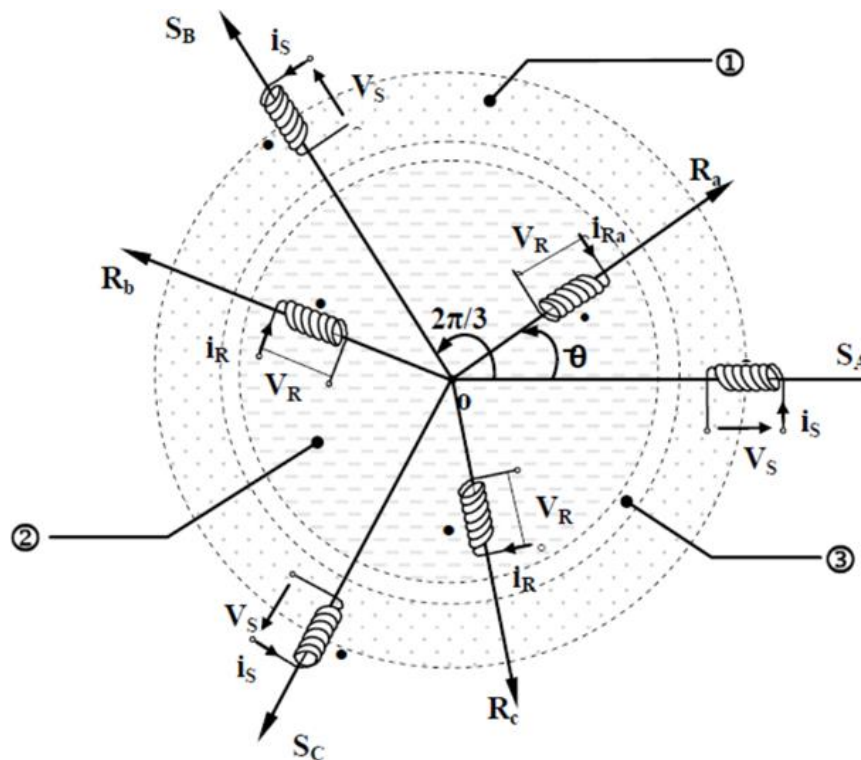


Figure II.19: Représentation simplifié de la GADA

1 Partie fixe :Stator

2 Partie mobile :Rotor

3 Entrefer

II.3.3 Représentation de la GADA dans le système triphasé (a,b,c)

Il s'agit d'une machine asynchrone à trois phases avec un stator et un rotor qui sont représentés schématiquement à la figure 5 avec les phases désignées comme, bs, cs et ar, br, cr, respectivement. La position entre les axes magnétiques relatifs instantanés des phases Ar et As est choisie comme axe de référence [36].

a) Equations Electriques :

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

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \tag{II.10}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \tag{II.11}$$

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

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

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

R_s, R_r : les résistances statoriques et rotoriques

b) Équations magnétiques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

Chapitre II Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques

La matrice des inductances mutuelles entre les phases d stator et du rotor dépend de la position angulaire ϑ entre l'axe du stator et celui du rotor.

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \vartheta & \cos \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

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

c) Équations magnétiques :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

C_{em} : le couple électromagnétique de la machine.

C_r : le couple résistant

f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA

J : L'inertie des parties tournantes

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

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II.16})$$

Où : p est le nombre de paires de pôles de la MADA.

II.3.4 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)

La transformation de Park implique d'appliquer aux courants, tensions et flux un

changement de variable qui affecte l'angle entre l'axe d'une phase statiquement alignée (V_a) et le système d'axes (d, q); il est défini par [37].

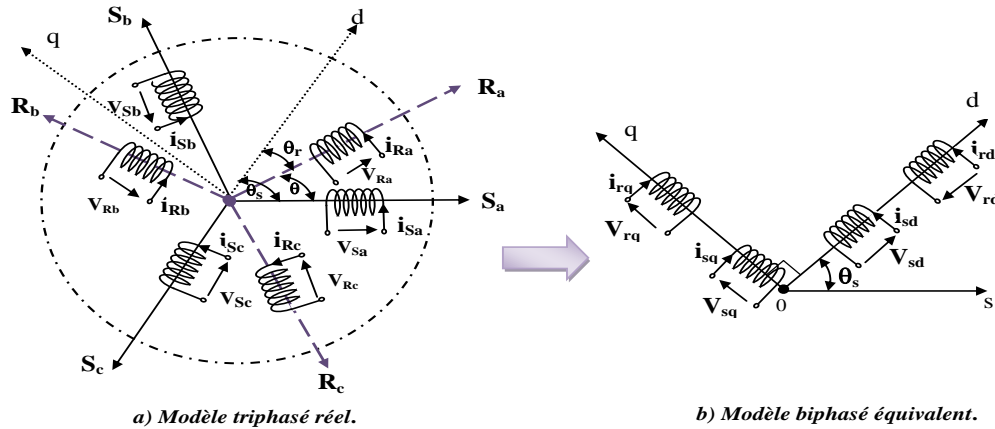


Figure II.20: Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

Avec :

S_a, S_b, S_c : Les vecteurs orientés suivant les enroulements statoriques.

R_a, R_b, R_c : Les vecteurs orientés suivant les enroulements rotoriques.

θ_r : est l'angle du rotor entre l'axe du rotor et l'axe d .

θ_s : est l'angle du stator entre l'axe du stator et l'axe d .

θ : l'angle de position entre le stator et le rotor.

II.3.5 Application de la transformation de Park

On obtient les équations de flux et de tension en appliquant cette transformation à chacun des vecteurs statiques et rotatifs de tension, courant et flux [38].

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{sd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

L_r et L_s : sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

M : l'inductance mutuelle.

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

Chapitre II Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (W_e - W) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (W_e - W) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où: $W_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ et $W = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécaniques, tel que : $\theta_e = \theta + \theta_r$

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec respectivement : V_{sd} , V_{rd} , V_{sq} , V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé

W_s et W_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques :

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

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II.21})$$

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

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

II.3.6 Modèle d'état de la GADA

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, u) \\ y = h(X, u) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

\dot{X} : vecteur d'état

y : vecteur de sortie

u : vecteur de commande

f, h : fonctions d'état

Nous avons la possibilité de choisir entre le flux et les courants ou de combiner les deux lors du choix des composants du vecteur d'état (courants et flux). Le vecteur suivant a été sélectionné [39].

$$X = \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Nous obtenons ce qui suit en mettant le système précédent d'équations sous forme compactée :

$$[B][V] = [L][\dot{I}] + \omega[C][I] + [D][I] \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V] &= [v_{ds} v_{qs} v_{dr} v_{qr}]^T \\ [I] &= [i_{ds} i_{qs} i_{dr} i_{qr}]^T \\ [\dot{I}] &= \frac{d}{dt} [I] \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Pour obtenir le système suivant, nous pouvons effectuer un modèle d'état:

$$\begin{aligned} [\dot{I}] &= [L]^{-1} \{ [B][U] - [D][I] - \omega_m [C][I] \} \\ [L] &= \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \\ [B] &= \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -r_s & \omega_s L_s & M & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -r_s & M & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.3.7 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure le transfert d'énergie électrique de formes continues (DC) à alternatives. (AC). En réalité, cette conversion d'énergie est complétée par un dispositif de contrôle (Semi-conducteurs). Il permet d'appliquer des pressions alternatives efficaces contrôlables en fréquence et en valeur aux naissances du récepteur en utilisant la séquence de commande appropriée [40].

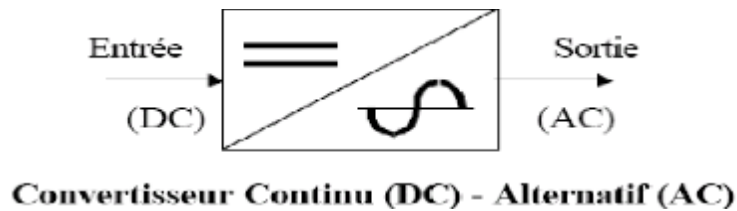


Figure II.21: schéma de principe de l'onduleur

Le contraire de l'électronique de puissance est l'ondulateur.

Ces caractéristiques dirigent les concepteurs vers la sélection des semi-conducteurs employables et leurs exigences.

Les interrupteurs Ka et K'a, Kb et K'b;Kc et K'C doivent être contrôlé de façon complémentaire.

Les tensions d'entrée de l'onduleur : entre les trois borne a,b,c et le point milieu fictif de référence [41].

a) Fonction de connexion :

Soit $i=1,2,3$ et $j=1,2$

On associe à chaque interrupteur une fonction f_{ij} dite de connexion tel que f_{ij} peut prendre deux valeurs 1 et 0

Elle est égale à 1 si l'interrupteur est fermée et à 0 si l'interrupteur est ouverte d'où on peut écrire :

$$I_{ij} = f_{ij} \cdot I_c \quad (\text{II.30})$$

$$V_{ij} = (1 - f_{ij}) \cdot V_{dc}$$

I_{ij} : courant passant à l'interrupteur

V_{ij} : La tension aux bornes de l'interrupteur

b) Fonction de conversion composée :

Soit V_{fab} , V_{fbc} et V_{fca} tels que :

$$V_{fab} = V_{21} - V_{11}$$

$$V_{fbc} = V_{31} - V_{21} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{fca} = V_{11} - V_{31}$$

D'après la fonction de connexion, on peut écrire que :

$$V_{21} = (1 - f_{21}) \cdot V_{dc}$$

$$V_{11} = (1 - f_{11}) \cdot V_{dc}$$

On peut ainsi démontrer que :

$$V_{fab} = (1 - f_{21}) \cdot V_{dc} - [(1 - f_{11})V_{dc}] = V_{dc}(f_{11} - f_{21}) \quad (\text{II.32})$$

$$V_{fab} = (f_{11} - f_{21}) \cdot V_{dc}$$

$$V_{fbc} = (f_{21} - f_{31}) \cdot V_{dc}$$

$$V_{fca} = (f_{31} - f_{11}) \cdot V_{dc}$$

On tire notre matrice :

$$\begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Les fonctions de conversion composée sont donc:

$$\begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} - f_{21} \\ f_{21} - f_{31} \\ f_{31} - f_{11} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

L'hypothèse est que les tensions simples F_{fa} ; V_{fb} et V_{fc} forment un système triphasé équilibré :

$$\begin{aligned}
 V_{fa} &= V_{fab} - V_{fca} \\
 V_{fb} &= V_{fbc} - V_{fab} \\
 V_{fc} &= V_{fca} - V_{fbc}
 \end{aligned}
 \tag{II.35}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix}
 \tag{II.36}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

c) Fonctions de conversions simples :

$$\begin{aligned}
 f_a &= \frac{1}{3} [2f_{11} - f_{21} - f_{31}] \\
 f_b &= \frac{1}{3} [-f_{11} + 2f_{21} - f_{31}] \\
 f_c &= \frac{1}{3} [-f_{11} - f_{21} + 2f_{31}]
 \end{aligned}
 \tag{II.37}$$

II.5 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les composantes clés de la chaîne de conversion éolienne. La première partie couvre la partie mécanique, incluant la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA. Dans la seconde partie, nous avons examiné la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. En faisant des hypothèses simplificatrices, nous avons établi un modèle mathématique qui a été simplifié pour en réduire la complexité. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation peut être exprimé sous la forme d'un système d'équations différentielles. En utilisant la transformation de Park, nous avons pu simplifier ce modèle et procéder à la modélisation de l'onduleur.

CHAPITRE III :
COMMANDE ET RÉSULTAT DE
SIMULATION

III.1 Introduction

Nous allons facilement contrôler l'électricité générée par l'éolienne en effectuant un contrôle indépendant des puissances active et réactive, et nous proposons l'approche de contrôle vectoriel utilisée pour la machine asynchrone à double alimentation. Commande adaptative par modèle de référence (MRAC) pour le réglage de la puissance active et réactive du générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Les notions d'erreur logique servent de base au développement de la technique proposée. Il permet de résoudre le problème de robustesse à la lumière de l'évolution des conditions opérationnelles et des variations internes des paramètres GADA. Les résultats de la simulation démontrent la haute performance et la durabilité de cette commande.

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle et Commande adaptative par modèle de référence (MRAC) appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la machine.

III.2 Commande vectorielle de la GADA

L'expression « commande vectorielle » fait référence à un groupe de commandes qui prennent en compte les équations du système en temps réel. La nature vectorielle des relations finales, par opposition aux relations scalaires, donne leur nom à ces commandes. Les relations ainsi obtenues sont considérablement plus compliquées que celles des commandes scalaires, mais elles permettent une meilleure performance dans les régimes de transition. Pour tous les ordinateurs à courant alternatif, des commandes vectorielles sont disponibles [42].

III.2.1 But et principe de la commande vectorielle

L'objectif principal du contrôle vectoriel des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique en utilisant une structure de contrôle adaptée à celle d'une machine continue [43].

Il sera donc nécessaire de déterminer la relation entre le courant et le flux, qui est naturellement créée pour une machine à flux continu par le couplage du coupleur producteur de flux et du coupleur producteur de courant. Dans notre cas, la puissance active et réactive du stator est ce qui combiné [44].

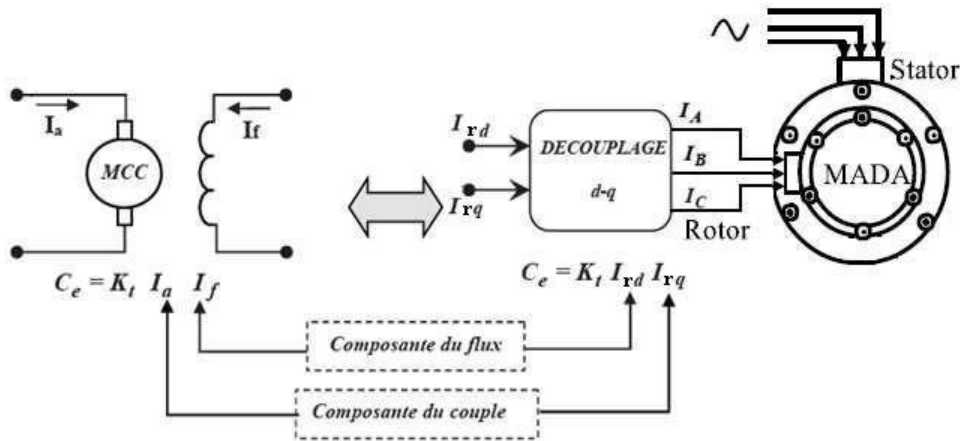


Figure III.22 : Principe de la commande vectorielle.

III.3 Etablissement du modèle de la GADA

Nous utilisons la modélisation biphasée de la machine. Pour aligner la hache du repère (d q) avec le flux statique, il faut faire pivoter l'objet. Tout d'abord, il convient de rappeler les équations système différentiables du générateur qui décrivent la machine asynchrone en relation avec le champ rotatif spécifié par [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] :

$$\begin{cases} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

III.3.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En choisissant le référentiel diphasé (d -q) lié au champ tournant et en plaçant le vecteur flux statorique φ_{ss} sur l'axe d, on peut écrire d'après la figure (III.22)

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

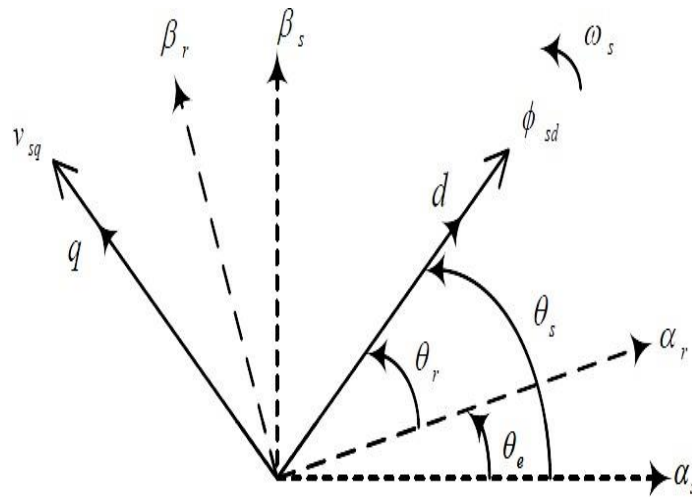


Figure III.23: Référentiel diphasé d- q lié au champ tournant statorique.

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = R_s \mathbf{i}_{ds} \\ \mathbf{V}_{qs} = R_s \mathbf{i}_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{dr} = R_r \mathbf{i}_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = R_r \mathbf{i}_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

Les équations de tension de la machine se réduisent à la forme suivante si la résistance du stator aux enroulements, une hypothèse bien acceptée pour les machines de production d'énergie éolienne de grande puissance, est ignorée :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = 0 \\ \mathbf{V}_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{dr} = R_r \mathbf{i}_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = R_r \mathbf{i}_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

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

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \mathbf{i}_{ds} + M \mathbf{i}_{dr} \\ 0 = L_s \mathbf{i}_{qs} + M \mathbf{i}_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r \mathbf{i}_{dr} + M \mathbf{i}_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \mathbf{i}_{qr} + M \mathbf{i}_{qs} \end{cases}$$

III.3.1.1 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

A partir de l'équation (III.40) de flux nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statorique aux courants rotorique :

$$\begin{cases} ids = -\frac{M}{L_s} idr + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ iqs = -\frac{M}{L_s} iqr \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

III.3.1.2 Relations entre puissances statorique et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} ids + V_{qs} iqs \\ Q_s = V_{qs} ids - V_{ds} iqs \end{cases}$$

(III.42)

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

$$\begin{cases} P_s = V_s iqs \\ Q_s = V_s ids \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} iqr \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} idr \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ Q_s = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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

$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$: prés imposée par le réseau.

III.3.1.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Partir du système d'équation (III.45), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante [53] [54] [55] :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M_s^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M_s^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \omega_r \left(i_{dr} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

Avec :

$$\omega_r = g\omega_s$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + g\omega_s \left(i_{dr} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + g\omega_s \left(i_{dr} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

V_{dr} Et V_{qr} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés [56].

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Les équations (III. 46), (III. 47) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique dans le figure (III.24).

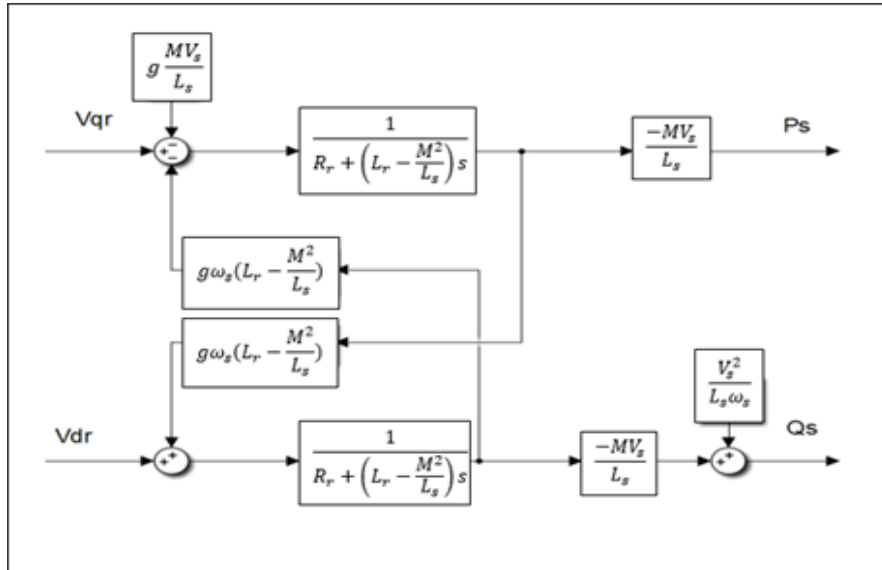


Figure III.24: Schéma bloc du système étudié.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes reliant les tensions du rotor à la puissance statique active et réactive. Étant donné que l'impact du couplage est minime, chaque axe peut être contrôlé indépendamment avec son propre régulateur, ce qui nous permet d'implémenter une commande vectorielle [47].

III.4 Méthodes de la commande vectorielle

Il y a deux méthodes pour la commande en puissance de cette machine :

La première méthode consiste à ne pas tenir compte des termes de couplage et à installer un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Ce procédé sera connu sous le nom de « méthode directe » puisque les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions du rotor de la machine [59].

La deuxième méthode consiste à prendre en compte les termes de couplage et à les corriger en mettant en œuvre un système à deux boucles qui permet de contrôler le courant et la puissance en rotation. Cette approche est connue sous le nom de « méthode indirecte » [59].

III.4.1 Méthode directe

Cette section décrit la régulation indépendante de la machine de ses pouvoirs actifs et réactifs. La relation entre la puissance active, représentée par la tension V_{qr} , et la puissance réactive, représentée par la tension V_{dr} , a été clarifiée. Considérons le schéma fonctionnel du système de régulation illustré à la figure III.24 pour déterminer les éléments à inclure dans la boucle de

régulation. Si l'on considère la relation entre les courants rotatifs et la puissance statique, l'expression MVs/L_s devient apparente.

Dans notre étude, nous avons supposé que l'éolienne était connectée à un réseau puissant et fiable, donc ce terme reste constant. Par conséquent, nous n'introduisons aucun régulateur entre les courants rotatifs et les puissances [50].

Afin de réguler la machine, nous installerons une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont montrés dans le bloc schématique de la figure (III.24).

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle en raison de la faible quantité de mouvement. Nous avons ensuite reçu une instruction, représentée sur la figure (III.25), avec un seul régulateur par axe [51].

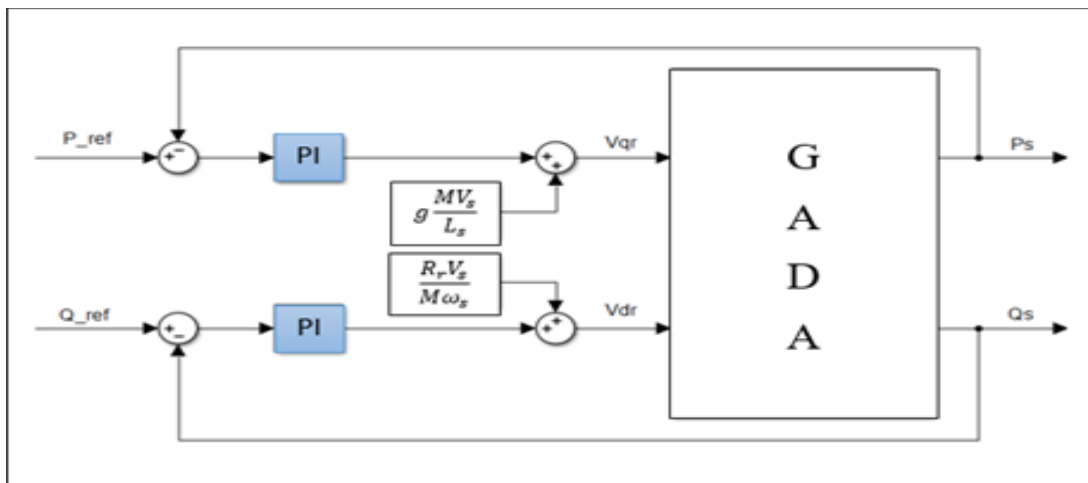


Figure III.25: schéma bloc de la commande directe.

III.4.2 Méthode indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire le bloc schématique du système cible dans la direction opposée. De cette façon, un bloc schématique qui permet l'expression de la contrainte en fonction de la puissance est construit. Ensuite, un modèle de type machine qui a du sens d'une manière différente a été atteint. Par conséquent, nous discutons de la puissance statique en termes de courants rotatifs et des expressions de tension rotative en termes de courants rotatifs [47] [49].

Pour la méthode indirecte, deux types de commande sont distinguées : commande avec boucles de puissance et commande sans boucles de puissance.

III.4.2.1 Commande sans boucle de puissance

En conservant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le schéma de contrôle de la figure (III.26), où l'on trouve une boucle de commande de courant rotatif dont les signes sont maintenant directement déduits des valeurs des puissances que l'on souhaite imposer à la machine [49].

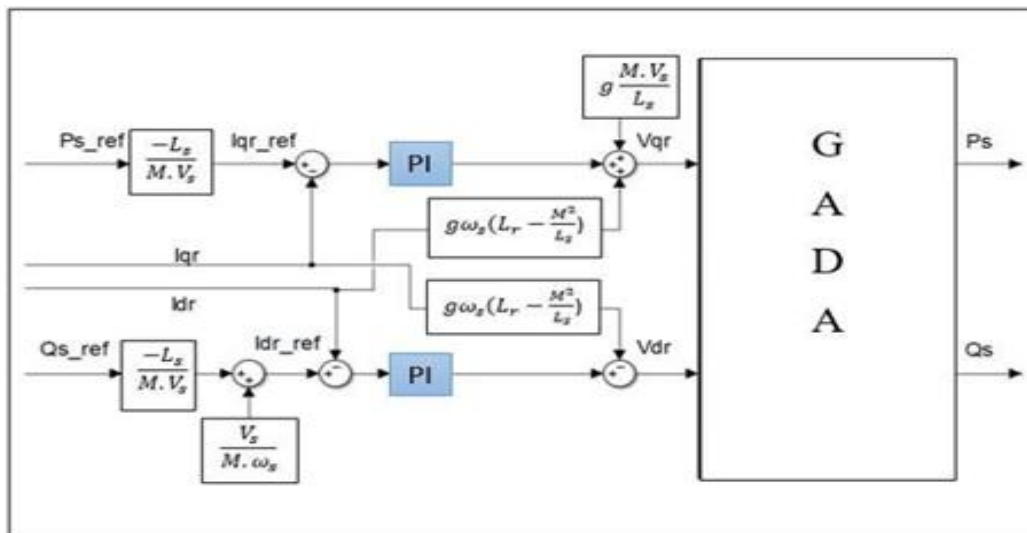


Figure III.26: Schéma bloc de la commande indirecte.

III.4.2.2. Commande avec boucles de puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons ajouter un bloc de régulation supplémentaire au niveau de la puissance pour éliminer l'erreur statique tout en conservant la nature dynamique du système.

Nous passons au schéma fonctionnel de la figure (III.27), qui montre clairement les deux boutons de régulation pour chaque axe, l'un contrôlant le courant et l'autre la puissance commande [49].

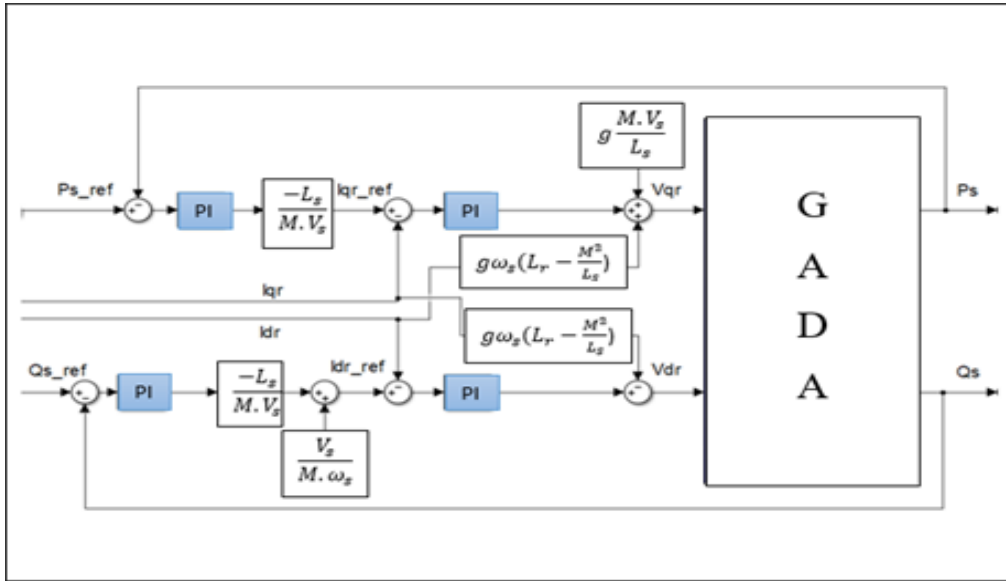


Figure 27 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

III.5 Type de régulateurs utilisés

Un PI non réglementé est nécessaire pour s'assurer que les pouvoirs actifs et réactifs du GADA fonctionnent conformément à leurs objectifs. Le but de l'utilisation du régulateur PI est d'assurer une plus grande robustesse contre les perturbations internes ou externes. Le schéma fonctionnel de la figure (III.28) peut être utilisé pour montrer les boucles de commande des puissances actives et réactive :

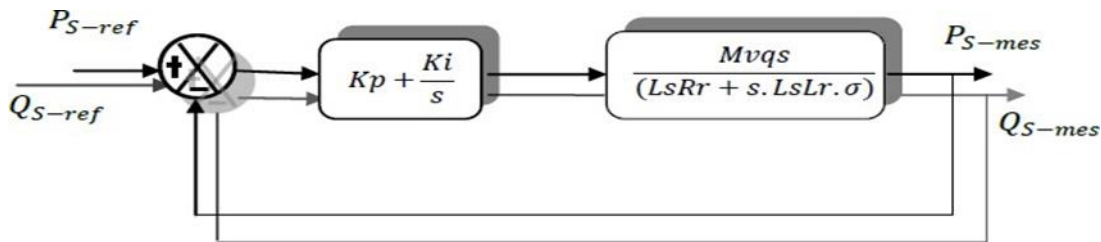


Figure III.28: Schéma de régulation des puissances Ps et Qs.

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

$$PI(s) = kp + \frac{ki}{s} \tag{III.48}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO):

$$FTBO(s) = \frac{Ki}{s} \left(s \cdot \frac{Kp}{Ki} + 1 \right) \cdot \frac{MVsRr}{(s\sigma Tr + 1)} \tag{III.49}$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{k_p}{k_i} = \sigma \cdot Tr \tag{III.50}$$

Où :

$$Tr = \frac{L_r}{R_r} \tag{III.51}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(s) = \frac{K_i M V_s}{P L_s R_r} \tag{III.52}$$

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

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau s} \tag{III.53}$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure II.13 sera :

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + S \frac{L_s R_r}{k_i M v_s}} \tag{III.54}$$

Par analogie l'expression (II.21) par l'expression (II.20), on trouve :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} \tag{III.55}$$

Est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms.

De l'expression (II.17) et (II.22), on a :

$$K_p = K_i \sigma Tr \frac{L_s L_r}{\tau M V_s} \tag{III.56}$$

$$K_i = \frac{L_s R_r}{\tau M V_s} \tag{III.57}$$

III.6 Les avantages et les inconvénients de la commande vectorielle

❖ Les avantages :

- Simplicité.
- Erreur statique nulle.

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

❖ Les inconvénients :

- Dépassement.
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple [55]

III.7 Modèle de simulation par commande vectorielle

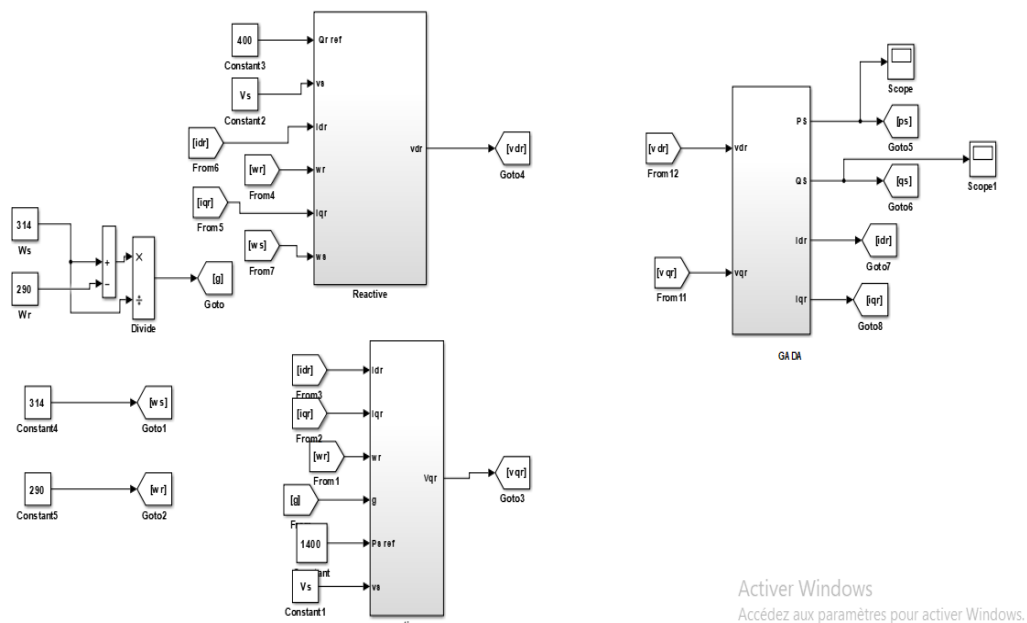


Figure III.29: Schéma bloc de la GADA avec contrôleur PI

III.7.1 Résultat de simulation par commande vectorielle

Afin de démontrer l'efficacité et les performances des méthodes proposées, les stratégies de commande vectorielle directe et indirecte des puissances active et réactive, basées sur des régulateurs PI, ont été mises en œuvre dans l'environnement MATLAB. Les résultats de simulation, présentés dans les figures ci-dessous.

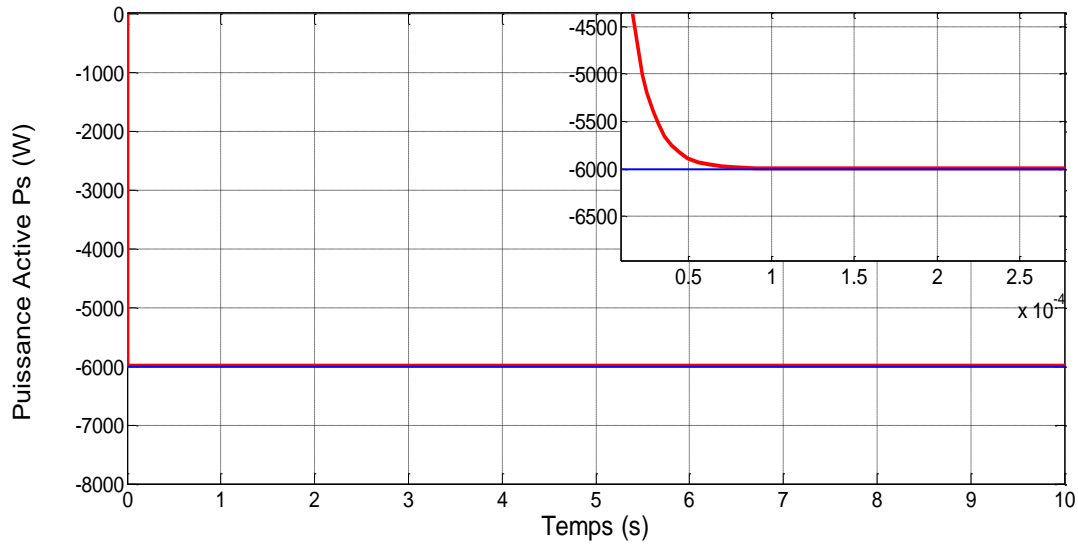


Figure III.30: Adaptation de la puissance active statorique (P_s) en fonction du temps.

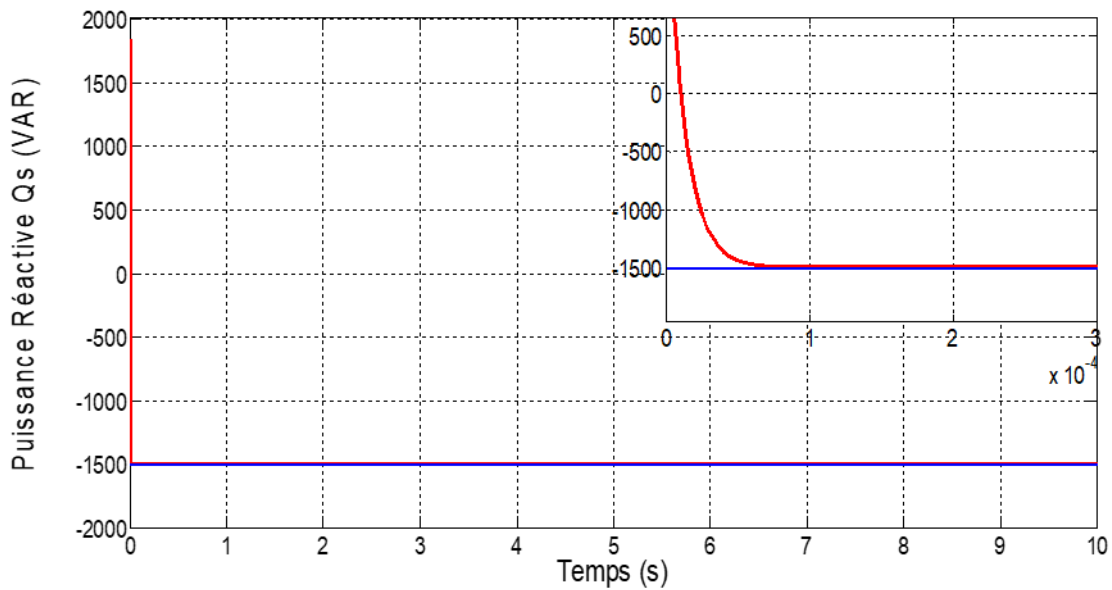


Figure III.31: Adaptation de la puissance réactive statorique (Q_s) en fonction du temps.

III.8 Interprétation des résultats

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Les figures (figure III.30, III.31) représentent respectivement l'évolution de la puissance active et réactive générée par la GADA. Au démarrage, l'allure de la puissance active et montre que l'évolution de cette puissance est vers la valeur de -6000(W) et la puissance réactive vers la valeur de -1500(VAR)

jusqu'à $t=0.6(S)$. Après le temps $t=0.6(S)$, les deux puissances sont stabilisées à ces dernières valeurs.

III.9 Généralités sur la commande adaptative

Dans les systèmes adaptatifs, on suppose que les paramètres sont constamment ajustés, ce qui signifie qu'ils changent au cours de l'opération. Cependant, il est difficile de procéder à une analyse de la stabilité et de la convergence du système. Pour simplifier les choses, nous pourrions supposer que le processus est constant mais que les paramètres sont inconnus. Ceux-ci sont estimés en continu à l'aide de procédures d'estimation répétées. Différentes stratégies d'estimation peuvent être utilisées, notamment :

L'approche de l'estimation des paramètres en temps réel, également connue sous le nom de contrôle non linéaire adaptatif, est connue sous le nom d'approximation stochastique, les moindres carrés développés et généralisés.

La commande adaptative ajuste les paramètres du correcteur en temps réel afin de maintenir le niveau de performance souhaité lorsque les paramètres de la procédure changent dans le temps ou sont inconnus. Cette adaptation se fait au prix d'une plus grande complexité algorithmique, et nécessite fréquemment l'utilisation d'outils de calcul extrêmement puissants, tels que les processeurs de signaux numériques (DSP). La commande adaptative prend en compte deux catégories de problèmes :

- Les paramètres du système constants mais inconnus sont auto-ajustés.
- Les paramètres qui dérivent dans le temps seront adaptés.

La loi de variation des paramètres du correcteur donne des caractéristiques non linéaires aux commandes adaptatives; en conséquence, la stabilité et la synthèse du correcteur dépendront de méthodes propres à ces systèmes, qui mettent en œuvre les critères de Lyapunov ou Popov [57].

III.10 Principe de la commande adaptative

En général, un système de contrôle adaptatif mesure un indice de performance (PI) spécifique du système en fonction de la différence entre les indices de performance souhaités et mesurés. Le principe général de fonctionnement d'un système dans une certaine plage de contrôle adaptatif est illustré à la figure (III.32). Le mécanisme d'adaptation contrôle des paramètres

spécifiques réglables du système ou introduit un signal de commande supplémentaire conformément à une stratégie particulière de réduction de l'PI [58].

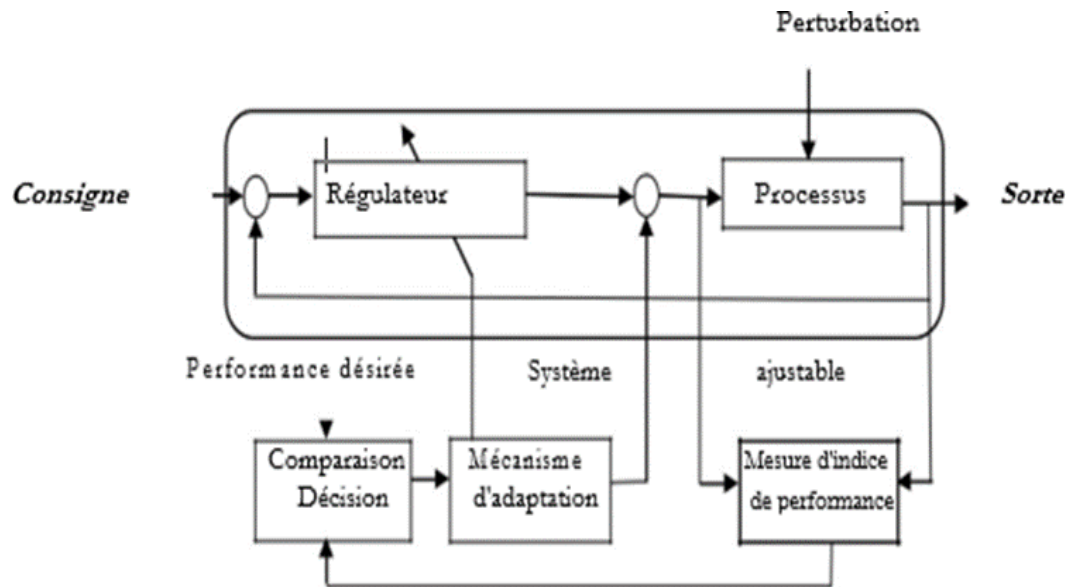


Figure III.32:Principe d'un système de commande adaptative.

III.11 Commande adaptative directe et indirecte

Deux approches principales existent pour la commande adaptative (des processus à paramètres inconnus ou variable dans le temps) [59]

III.11.1 La commande adaptative directe

Où les paramètres du régulateur sont modifiés directement et en temps réel sur la base d'une comparaison entre les performances réelles et souhaitées (c'est le cas en particulier de la commande adaptative à modèle de référence (Model Reference Adaptive Control "MRAC").

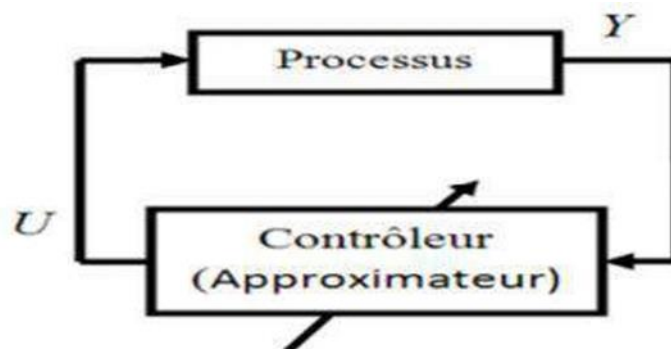


Figure III.33: commande adaptative direct.

III.11.2 La commande adaptative indirecte

Qui suppose une estimation des paramètres du processus à travers une procédure d'identification (c'est le cas des régulateurs auto-ajustables (self-tuning control "STC")) [59]

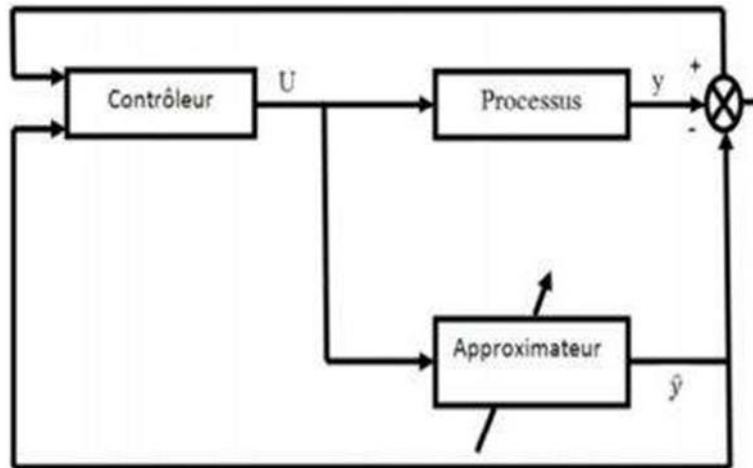


Figure III.34: Commande adaptative indirecte.

III.12 Modèle de référence des composants

Il est utilisé pour donner une réponse idyllique du système de contrôle adaptatif à l'entrée de référence.

Contrôleur : Il est généralement décrit par un ensemble de paramètres réglables. Dans cet mémoire, un seul paramètre θ est utilisé pour décrire la loi de commande. La valeur de θ dépend principalement du gain d'adaptation. Mécanisme d'ajustement : ce composant est utilisé pour modifier les paramètres du contrôleur afin que l'usine réelle puisse suivre le modèle de référence. Des approches mathématiques telles que la règle MIT, la théorie de Lyapunov et la théorie de l'erreur augmentée peuvent être utilisées pour développer le mécanisme d'ajustement. Dans cet article, nous utilisons la règle MIT avec l'algorithme normalisé et la technique est alors appelée règle MIT modifiée. Le schéma fonctionnel de base du système MRAC, $y_m(t)$ est la sortie du modèle de référence et $y(t)$ est la sortie de l'usine réelle et la différence entre eux est notée $e(t)$ [59].

$$e(t) = y(t) - y_m(t) \quad (\text{III.58})$$

III.13 Règle MIT

La règle MIT a été développée pour la première fois en 1960 par les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) et utilisée pour concevoir le système de pilotage automatique des avions. La règle MIT peut être utilisée pour concevoir un contrôleur

avec schéma MRAC pour n'importe quel système. Dans cette règle, une fonction de coût est définie comme suit :

$$J(\theta) = e^2/2 \tag{III.59}$$

Où e est l'erreur entre les sorties de l'usine et le modèle, et θ est le paramètre ajustable. Le paramètre θ est ajusté de manière à ce que la fonction de coût puisse être minimisée à zéro. Pour cette raison, la variation du paramètre θ est maintenue dans le sens du gradient négatif de J , c'est-à-dire :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \tag{III.58}$$

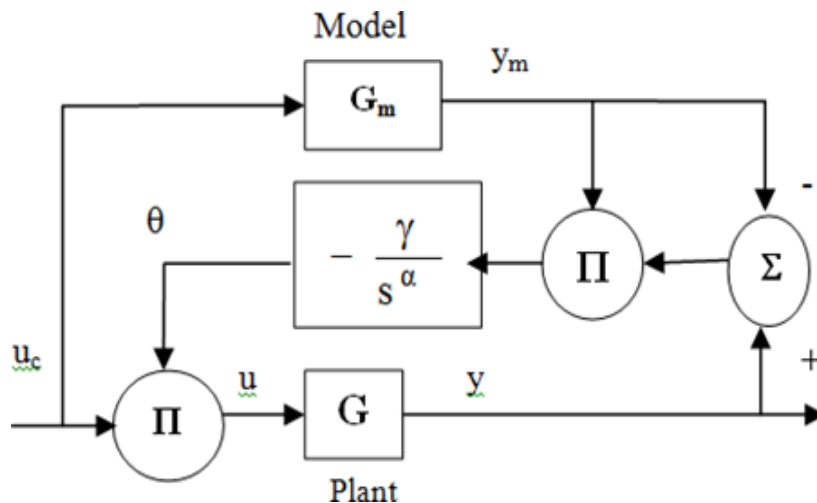


Figure III.35: commande adaptative avec roue (MIT).

le terme de dérivée partielle $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ est appelé la dérivée de sensibilité du système. Ce terme indique comment l'erreur évolue par rapport au paramètre θ . Eq décrit l'évolution du paramètre θ par rapport au temps pour que la fonction de coût $J(\theta)$ puisse être ramenée à zéro. Ici γ est une grandeur positive qui indique le gain d'adaptation du contrôleur [59].

$$\dot{\theta} = -\frac{\gamma}{s} y_m (y - y_m) = -\frac{\gamma}{s} y_m e \tag{III.61}$$

III.14 Application du contrôle adaptatif de référence du modèle au contrôle de la puissance active et réactive

Le schéma fonctionnel du contrôle MRAC de la puissance active et réactive de GADA est illustré à la fig. (III.36)[56].

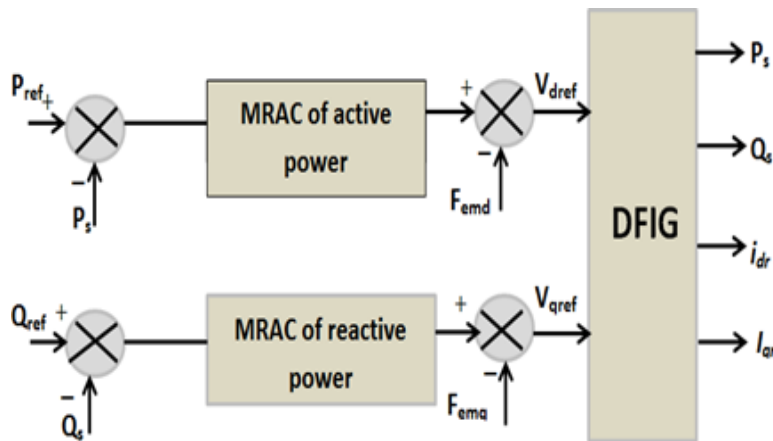


Figure III.36: Modèle de référence de contrôle adaptatif MRAC de puissance active et réactive de GADA

III.14.1 Modèle de simulation par model référence adaptative control MRAC avec (MIT)

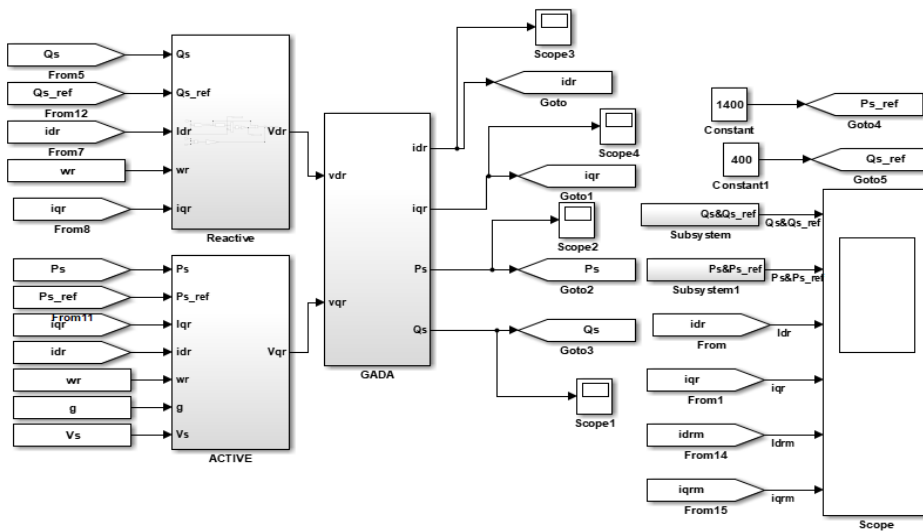
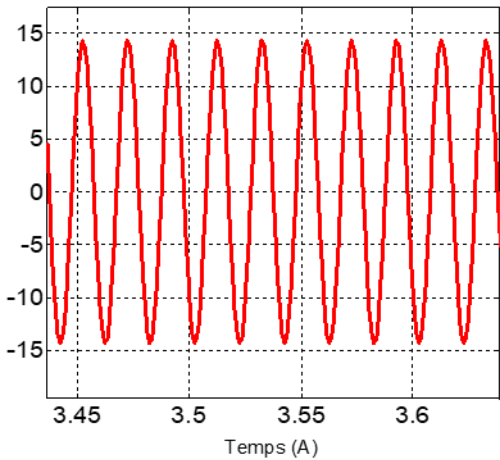
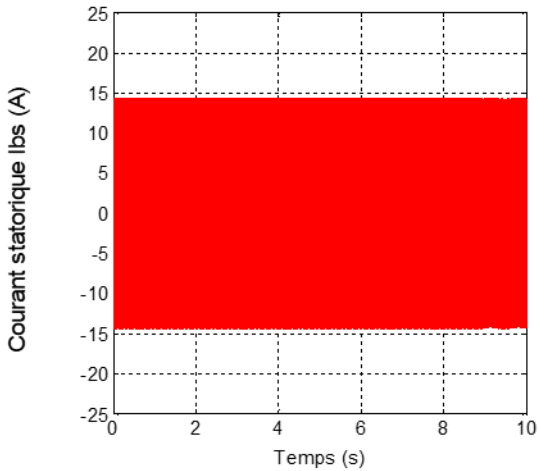
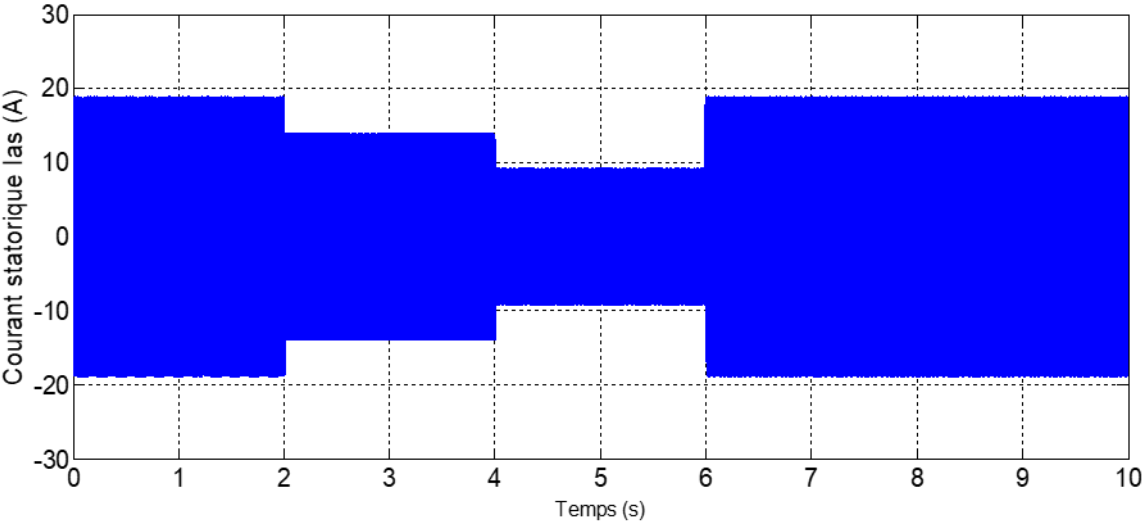
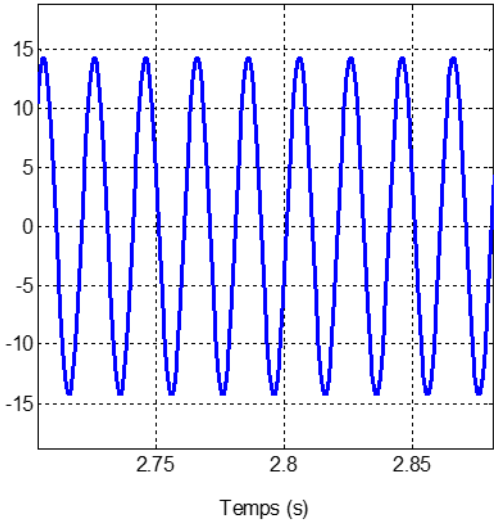
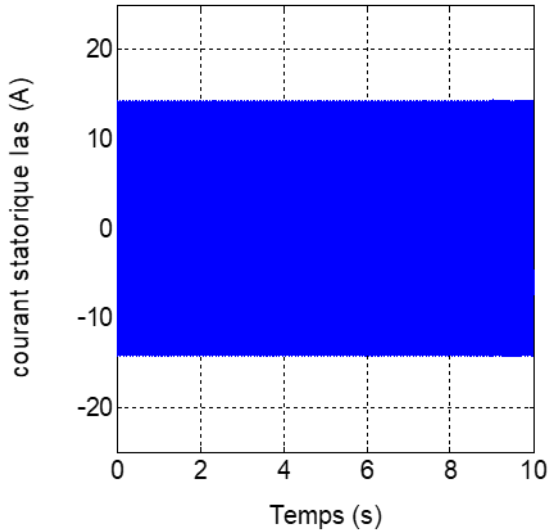


Figure III.37: Schéma bloc du contrôleur adaptatif de référence de modèle avec règle MIT.

III.14.2 Résultat de simulation par model référence adaptative control MRAC avec Méthode (MIT).

Afin de démontrer l'efficacité et les performances des méthodes proposées, les stratégies de model référence adaptative control MRAC avec (MIT) des puissances active et réactive, ont été mises en œuvre dans l'environnement MATLAB. Les résultats de simulation, présentés dans les figures ci-dessous.



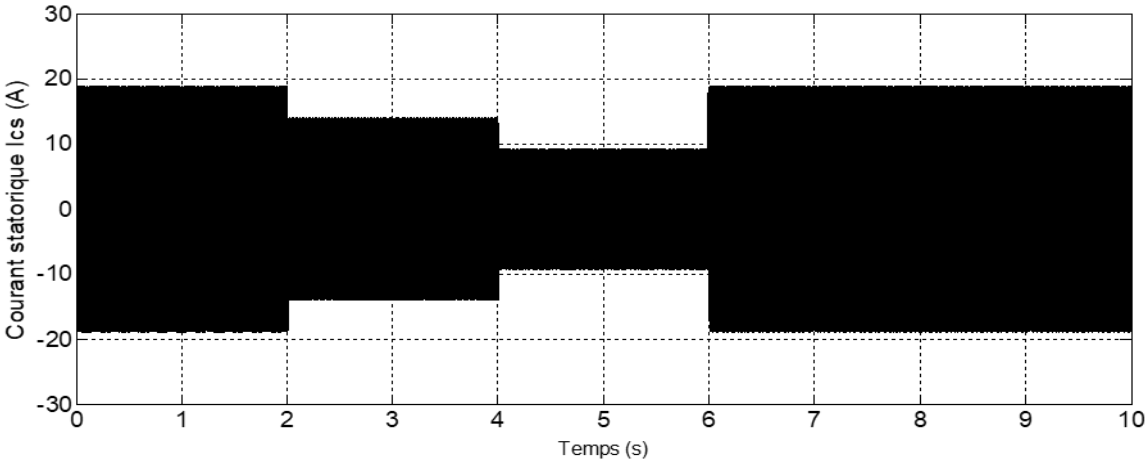
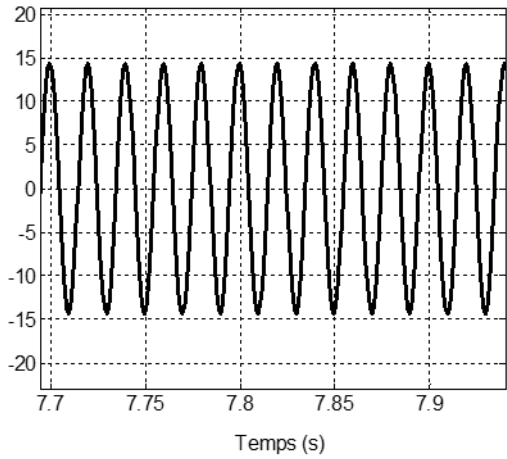
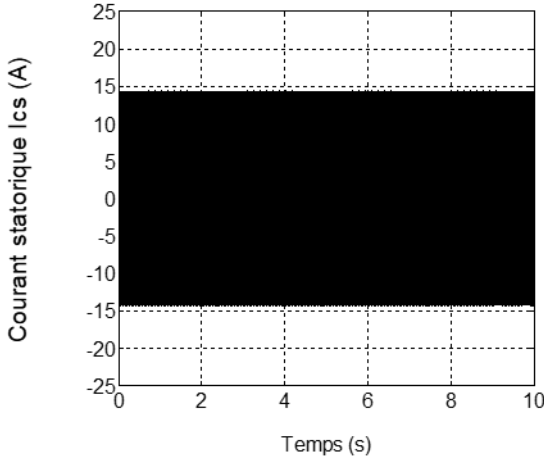
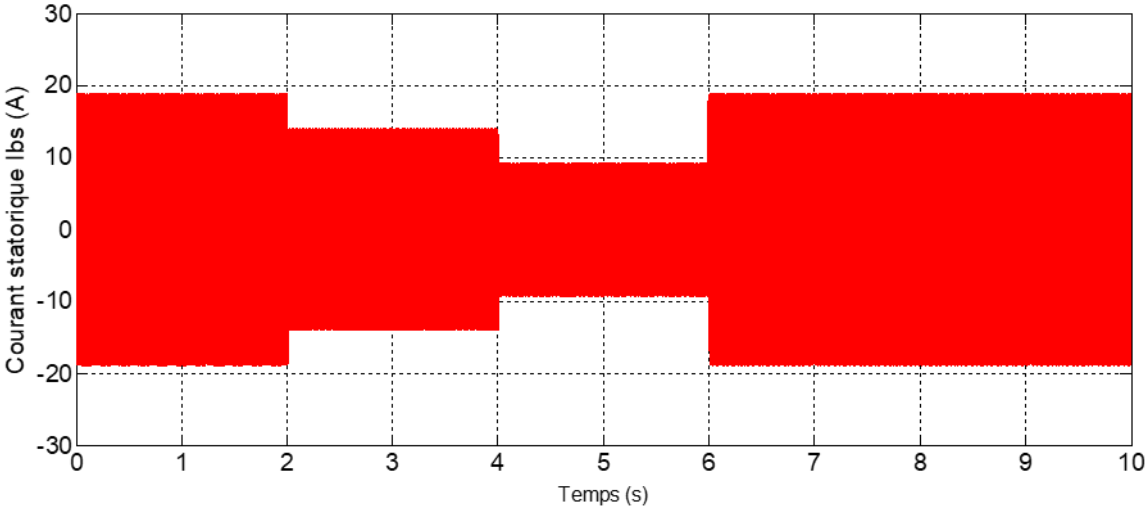


Figure III.38 : Courant statorique générer par phase en fonction du temps.

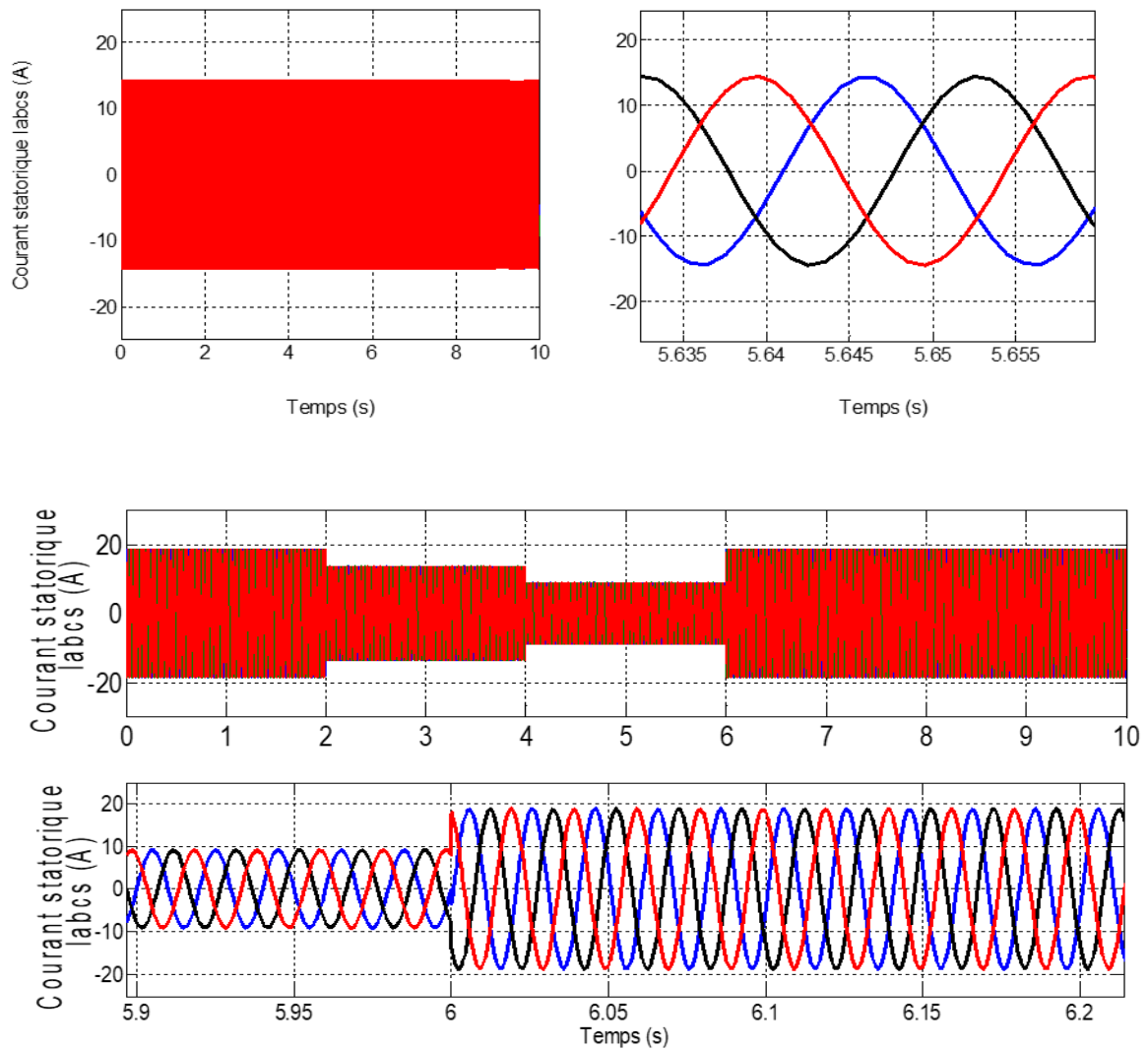


Figure III.39 : Courant statorique triphasé généré par le système en fonction du temps.

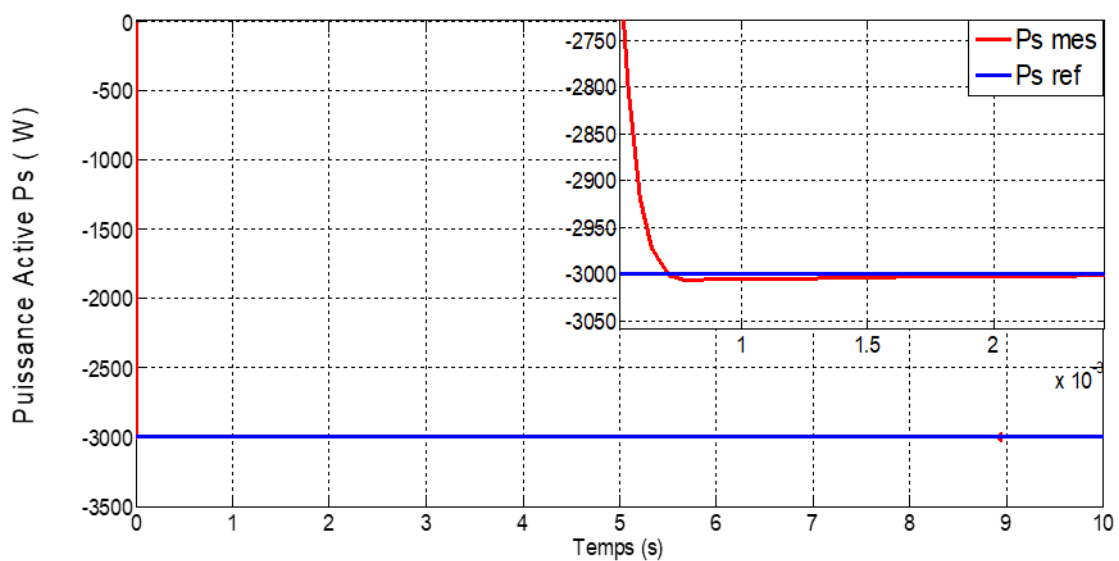


Figure III.40 : Evolution de la puissance Active statorique en fonction du temps.

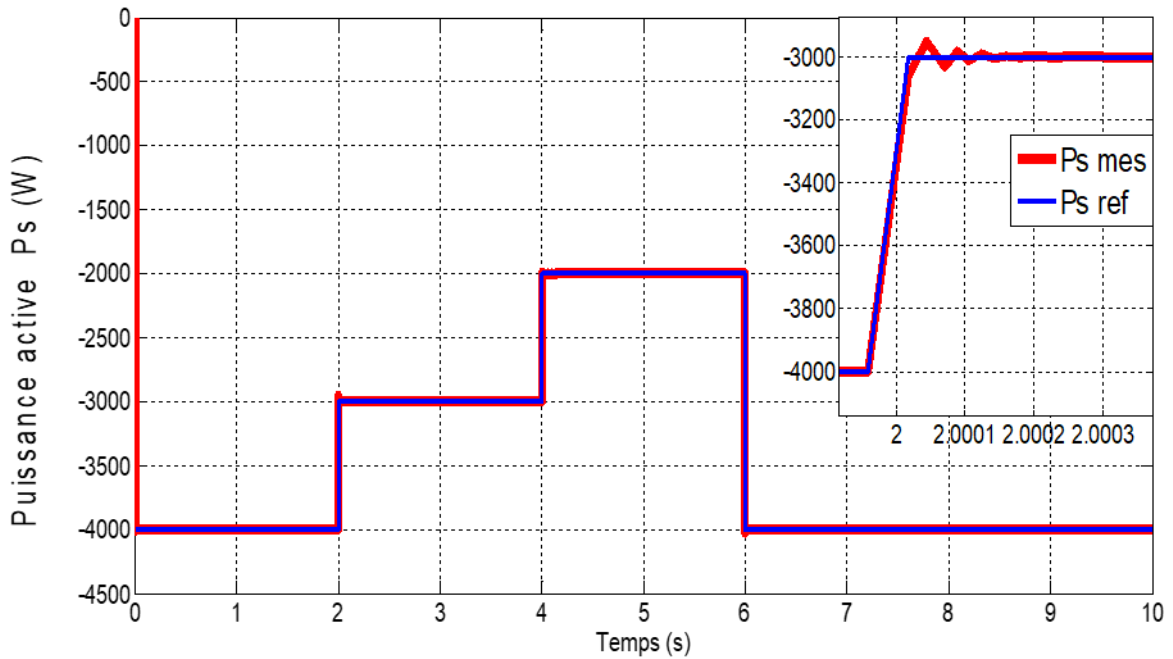


Figure III.41 : Comparaison entre les puissances active statorique mesuré et référence en fonction du temps.

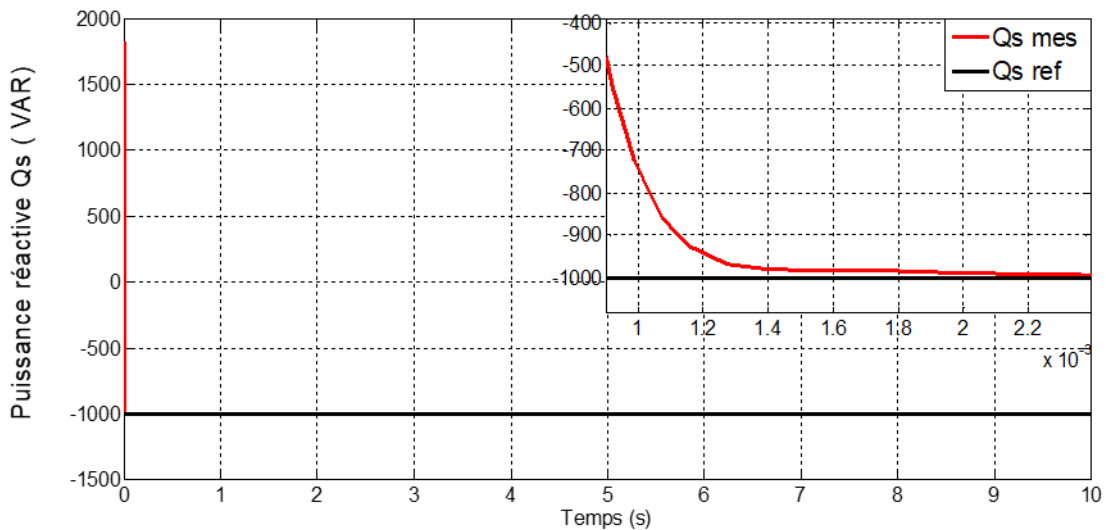


Figure III.42 : Evolution de la puissance réactive statorique en fonction du temps.

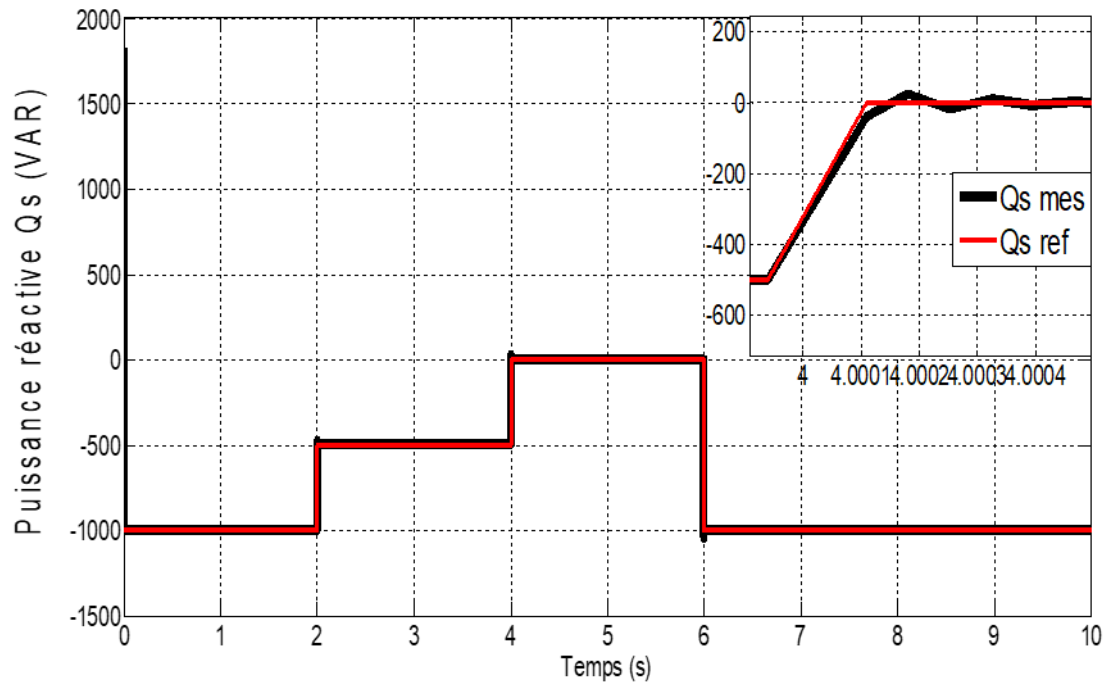


Figure III.43: Comparaison entre les puissances réactive statorique mesuré et référence en fonction du temps.

III.15 Interprétation des résultats

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Les figures (figure.III.40, III.42) représentent respectivement l'évolution de la puissance active et réactive générée par la GADA. Au démarrage, l'allure de la puissance active et montre que l'évolution de cette puissance est vers la valeur de -3000(W) et la puissance réactive vers la valeur de -1000(VAR) jusqu'à $t=0.1(S)$. Après le temps $t=0.1(S)$, les deux puissances sont stabilisées à ces dernières valeurs.

Les figures (figure.III.41, III.43) représentent respectivement Régulation de la puissance active et réactive statorique en fonction du temps. A l'instant $t= 2s$, nous avons adaptés la puissance active à la valeur 3 kw et la puissance réactive à la valeur 1kvar.

A : $t= [4\ 6]$ s : la puissance active est adaptée à la valeur 2 kw

$t= [4\ 6]$ s : la puissance réactive est adaptée à la valeur 0 kvar.

III.16 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle de référence adaptative Algorithme de contrôle adaptatif (MRAC) Utilisation de l'intégrale adaptative Ce qui permet de garantir la stabilité avec un niveau de performance satisfaisant. Premièrement, un modèle de référence d'ordre fractionnel Le contrôle adaptif (MRAC) est conçu pour La puissance active et réactive d'un Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) Conversion de l'énergie éolienne. Résultats de la simulation démontrer que le contrôle MRAC proposé La stratégie est plus puissante que la classique Contrôles MRAC en ce qui concerne l'erreur, la réponse Temps et excès. Ensuite, y compris le l'intégrale adaptative dans la loi de contrôle présentée à niveau de performance satisfaisant. Simulation Les résultats illustrent la fiabilité et la robustesse du contrôle MRAC vers ce changement de paramètres, où l'activité et la réactivité Les pouvoirs suivent parfaitement les propositions des références.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié la commande des puissances générées par une éolienne dont la génératrice est une machine asynchrone double alimentation.

Nous avons commencé par l'état de l'art, ainsi la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et puis nous avons présenté la commande vectorielle et le contrôle adaptatif modèle-référence (MRAC).

Dans la première partie, nous avons commencé par l'état de l'art sur les éoliennes (types, leurs composants principaux, énergie cinétique du vent.....).

Dans la deuxième partie, on a établi le modèle de la machine asynchrone à double alimentation ou le stator est alimenté par le réseau et le rotor par une source supposée parfaite, équilibré, sinusoïdale, et d'amplitude et de fréquence réglable à partir de ses équations (électrique, mécanique), le but de cette modélisation est de voir l'influence des variations appliquées aux tensions rotoriques.

Dans la troisième partie, on a étudié la commande vectorielle de la MADA qui utilise un réglage classique (régulateurs PI) et qui nécessite une parfaite connaissance du modèle du système à régler. Cette approche conduit à des lois de commande dont les performances sont fortement liées à la fidélité du modèle dynamique utilisé pour décrire le comportement du système. Des erreurs de modélisation ou des variations paramétriques du système peuvent détériorer les performances de réglage puisqu'elles contribuent directement au calcul de la commande.

A la fin nous avons étudié le contrôle de la machine asynchrone à double alimentation par le contrôle adaptatif modèle-référence (MRAC) .

Ce travail, nous a permis d'une part de connaître les principes de base pour l'étude et la simulation des systèmes électro énergétique complexe tel que les éoliennes, leur constitution, leur modélisation ainsi que les stratégies de commande et le réglage des puissances électriques générées. L'application des techniques de commande avancées devient intéressante en termes de précision et de robustesse.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Conclusion générale

Références Bibliographiques

- [1] D. YOUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.
- [2] H. M. Amine, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif, 2012.
- [3] B. BELTRAN, Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation, BRETAGNE OCCIDENTALE, 6 juillet 2010.
- [4] GUASMI.A, GUELMINE.S, « Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA », université Mohammed Boudiaf - Msila ,2017.
- [5] B. TOUAL, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », Université de Batna, 2010.
- [6] ARAMA.M. A, « Commande non linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentions », université Ahmed Draïa Adrar,2021.
- [7] L. KHELFIAT, L. MAATAOUI, « Etude et simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone doublement alimentée » ; mémoire de fin d'étude master en électrotechnique, université de Annaba,2017.
- [8] N.Cherfia « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » ,Université Constantine, juin2007.
- [9] Thèse R. BAÏLE « Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne », université de Corse, 18 Octobre 2010.
- [10] K. GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [11] B. MERIEM "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation GADA " Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.
- [12] Ben Kadem. S, Ben mebarek. D « commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne », université Ahmed Draïa Adrar.

Conclusion générale

- [13] W Eole ; énergie éolienne : ww7. Eole. ORG/ (consulté le 22 /01/ 2023).
- [14] Arama. M, « commande non linéaires d'une éolienne base sur la machine asynchrone double alimentation », université Ahmed Draïa Adrar 2021.
- [15] Mebarki.W, Sadaoui.S, « gestion de l'énergie éolienne en fonctionnement autonome à base d'une GADA », université Abderrahmane Mira de Bejaia 2020.
- [16] B. A. Asma, « étude de la commande d'un système éolienne base sur un GADA », université Hadj Lakhdar, Batna 2016.
- [17] Francois B, Cambronner J, Hautier J. P. A new approach for synthesizing logic connection controllers in power converters. EPE'95, Sevilla, Spain.
- [18] [http :1 /wind turbine. me/windpower.html](http://1/wind_turbine.me/windpower.html).
- [19] 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.
- [20] BOUDIA SIDI MOHAMMED «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013.
- [21] AHMED.M, KAIS.N, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation apport des techniques de l'intelligence artificielle », université Djillali Liabes de Sidi Belabes ,2017.
- [22] MOHAMMED MALKI « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret» Mémoire Master en Electrotechnique, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 20/10/2014.
- [23] Belouafi .A , Belabali. M, « L'utilisation du mode glissant pour la commande d'une éolienne a basé de la MADA », université Tahri Mohamed Bechar ,2018 .
- [24] Kaoua. Dj, Yahyaoui. Z, « commande linéaires d'une éolienne base sur la machine asynchrone à double alimentation », université Ahmed Draïa Adrar 2020.
- [25] www. Ceireifo. COM CENTRE Canadien d'information sur l'énergie.
- [26] D. KAOUA and Y. ZIDELMAL, “Commande linéaire d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation,” Université Ahmed Draïa Adrar, 2020.

Conclusion générale

[27] A. BOYETTE, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” I   TM Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.

[28] B.A. Asma, «   tude de la commande d’un système éolienne base sur un GADA », université Hadj Lakhdar, Batna 2016.

[29] : H . Amimeur., « Contribution à la commande d’une machine asynchrone double étoile par mode de glissement » ,Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008

[30]AHMIDAT Z, KOUIDRI Z, Commande d’une éolienne à base d’une GADA par un onduleur multi-niveaux, mémoire Master 2, Spécialité :commande électrique, Université Ahmed Draia, Adrar, 2018.

[31]Ben Amar A, étude de la commande d’un système éolien base sur une GADA, mémoire magister spécialité : Maîtrise des Energies, Université hadj Lakhdar Batna,2016

[32]Benabdallah M, Abdellaoui Y, Goffa N, UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR LA COMMANDE D’UNE ÉOLIENNE    BASE DE LA MADA, spécialité:   nergies Renouvelables en électrotechnique, centre universitaire Salhi Ahmed, N  ama, 2022

[33]Zelaci S,Beddi A, Omran I, Commande prédictive d'une génératrice asynchrone à double alimentation, mémoire master2, spécialité:machines électrique, universit  EchahidHammaLakhdar, El-Oued, 2022

[34]Leghrib Mohammed B, Modélisation et Commande d’un Système de Production de l’énergie Electrique,mémoire master,Spécialité : Réseaux Electriques,universit  Larbi Ben Mhidi–Oum El Bouaghi, 2021.

[35] Islam Jar Allah Boulegroun,étude et r  alisationd’une turbine éolienne,mémoire master 2,s  p  cialite :Automatique et informatique industrielle, universit  Mohamed Khider Biskra 2020

[36] MAAMRI A, MADANI H, SEGHIERI B,commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation, mémoire master, spécialité: Machine électriques,université d’EL-Oued, 2021

[37] DEHIRI r,AICHAOUI F, Commande par mode glissant et flou d’une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) « Application à l’énergie éolienne », mémoire master, spécialité:AUTOMATIQUE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M’SILA 2017

Conclusion générale

- [38] Ben kadem S, Ben mebarek D, Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne, mémoire master, spécialité: Réseaux Electriques, université Ahmed Draia, Adrar, 2018.
- [39] GUASMI A, GUELMINE S, Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA, mémoire master, spécialité: RESEAUX ELECTRIQUES UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2017.
- [40] megaes el Mokhetar, Joka t, Modélisation et identification d'une génératrice asynchrone (GADA), mémoire master, spécialité: machines électriques, université Saad Dahlab, Blida, 2018
- [41] Ilyas MESSAI, Etude et simulation d'un onduleur cinq niveaux, mémoire master, spécialité: Électromécanique, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
- [42] Ziraoui Salah Eddine, Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau, mémoire master, spécialité: Electromécanique, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [43] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz, SOUMANA NOUHOU « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » mémoire fine d'étude de Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [44] Bekakra Youcef, « Commande de la puissance active et réactive du GADA par la Méthode de mode glissant », mémoire de master de l'université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2015.
- [45] Labani Zineb, Ouzene kheira « Commande par mode glissant d'ordre supérieur d'une machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien » mémoire master de l'université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [46] Frédéric POITIERS « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne :-Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [47] Azzouz TAMAARAT « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » Thèse de doctorat de l'université Mohamed Khider – Biskra, 2015.

Conclusion générale

- [48] DJERIRI YOUCEF «Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien» mémoire Magister en Électrotechnique de l'UNRSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BELIVE -ABBÈS ,2009.
- [49] AGGOUN GHANIA «Etude qualitative de association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », mémoire de magister de l'Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou,
- [50] Mohamed Adjoudj « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne», article de l'université Djilali Liabes Sidi Bel Abbas ,2010.
- [51] B.Benyachou« Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)», article de l'université Mohammed 5 (Meknès, MAROC) , 2017
- [52] K. BEDOUD « Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation», article de l'université Badji Mokhtar, Annaba ,2013.
- [53] Kendzi Mohammed «Commande des Génératrices Asynchrones Utilisées Dans les Systèmes Eoliens» », mémoire de magistère de l'université de Bechar,2012
- [54] F. SENANI, « La machine asynchrone à double alimentation : Stratégies de Commande et Applications » ; thèse doctorat en électrotechnique, Université de Constantine, 2018.
- [55] ABADA A, ZELLAGUI M ; COMMANDE ADAPTATIVE PAR MODELE DE REFERENCE, APPLICATION SUR LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS (MSAP) ; UNIVERSITE DE M'SILA ; 2007
- [56] Commande adaptative de la machine à courant continu, Zerfa h,mémoire master, Spécialité : Informatique industrielle, Université Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi ,2015
- [57] BENMOUSSA A,ABADA A,COMMANDEADAPTATIVEFLOUE DECENTRALISEE POUR UNE CLASSE DES SYSTEMES NON LINEAIRES INCERTAINS ,mémoire master, Spécialité : Automatique,UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2019
- [58] Priyank Jain et Dr. MJ Nigam Électronique et communication, IIT Roorkee, S-116, Govind Bhawan, IIT Roorkee, Roorkee, Uttarakhand, INDE 2Électronique et communication, IIT Roorkee, Roorkee, Uttarakhand, INDE

Conclusion générale

[59] Sihem Djebri, Hanane Balaska, Samir Ladaci, Département de Génie Electrique, Université du 20 août 1955, Skikda.

