

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

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

Intitulé :

---

# COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'UNE ÉOLIENNE À BASE DE GADA

---

Présenté par :

- MIMOUNI Walid
- CHEKIRINE Mohamed
- AIDAOUI Boudjema

*Soutenu le : ... /06/2021..... devant le Jury :*

<i>M. Brahimi Mohamed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. BenMohamed Fayçal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Habchi Yacine</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

# Remerciement

*Nous tenons à remercier tout premièrement dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Benmohamed Fayssal** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'electrotechnique qui ont contribués à notre formation.*

*Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui on accepté de juger notre travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux que j'aime :*

*Mon père et ma mère qui ont toujours été présent pour me  
soutenir, me conseiller, sacrifient pour moi et m'avoir permis  
d'arriver à ce stade d'éducation.*

*Je le dédie aussi à :*

*Mes frères et soeurs, qui mon soutenus et crus en moi lors de mon parcours  
et à tous mes amis(e).*

---

*Mimouni Walid*

# ***Dédicace***

*Je dédie ce mémoire à :*

*Ceux qui sont les plus chers du monde*

*Mes parents, mes frères et mes sœurs.*

*Toute la famille Chekirine.*

*Tous mes amis sans exception.*

# *Dédicace*

*Je dédie mon travail avant tous*

*A mes chers parents, mes chers frères et sœurs et ses familles*

*A toute la promotion 2021 d'électrotechnique spécialité énergie renouvelable en  
électrotechnique de centre université Salhi Ahmed.*

*A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.*

---

*Aidaoui Boudjema*

**ملخص :**

يقدم هذا العمل تقنية التحكم في الوضع الانزلاقي المطبقة على نظام تحويل طاقة الرياح مزود بمولد غير متزامن مزدوج التغذية تجد هذه التقنية افضل حل لمشاكل الارتياحات في نموذج باستعمال قانون التحكم الغير الخطي. الهدف هو تطبيق هذه تقنية التحكم لمراقبة التغير في الطاقات النشطة والمتفاعلة التي تولدها الآلة غير المتزامن مزدوجة التغذية مع الشبكة من خلال العمل على إشارات (تيار، توتر) . نتائج المحاكاة الرقمية التي تم الحصول عليها تثبت اهمية التحكم في الأنظمة الكهربائية

الكلمات المفتاحية: مولد غير متزامن مزدوج التغذية ، وضع منزلق ، تحكم في القوة الموجهة ، تحكم في الطاقة

**Résumé :**

Ce travail présente une technique de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte solution aux problèmes d'incertitudes du modèle par l'utilisation d'une loi de commande non linéaire. L'objectif est d'appliquer cette technique de commande pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone avec le réseau en agissant sur les signaux (courant, tension). Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

Mots clés : génératrice asynchrone à double alimentation, mode glissant, commande vectorielle, contrôle des puissances.

**Abstract :**

This work presents a sliding mode control technique applied to the wind power conversion system equipped with a dual-feed asynchronous generator. This technique finds its strongest solution to the problems of model uncertainties by the use of a nonlinear control law. The objective is to apply this control technique to control the exchange of active and reactive power generated by the asynchronous machine with the network by acting on the signals (current, voltage). The results of numerical simulations obtained show the growing interest in such a control in electrical systems.

Keywords: doubly-fed induction generator, sliding mode, oriented flux control, power control.

SOMMAIRE.....	i
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES SYMBOLES.....	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes éoliens</i>	
I.1.Introduction .....	3
I.2.Energies renouvelables .....	3
I.3.Les types des énergies renouvelables .....	3
I.3.1.Energie hydraulique .....	3
I.3.2.La biomasse .....	4
I.3.3. L'énergie solaire .....	5
I.3.3.1 L'énergie solaire thermique .....	5
I.3.3.2. L'énergie solaire passive.....	5
I.3.3.3. L'énergie solaire photovoltaïque.....	5
I.3.4. Energie Géothermique.....	6
I.3.5. L'énergie éolienne.....	7
I.4. Histoire de l'énergie éolienne.....	8
I.5. L'éolienne en Algérie .....	10
I.6.Les différents types d'éoliennes.....	12
I.6.1. Eolienne à axe vertical .....	12
I.6.2. Eoliennes à axe horizontal .....	12
I.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	13
I.7.1. Principes des éléments constitutifs d'une éolienne .....	14
I.8. Application des éoliennes.....	16
I.8.1. Systèmes Isolés .....	16
I.8.2. Systèmes Hybrides.....	16
I.8.3. Systèmes Liés au Réseau .....	16

I.8.3.1.Éolienne avec MS a cage et un convertisseur pleine puissance.....	17
I.8.3.2.Éolienne avec un MS à nombre élevé de pôles et un convertisseur pleine puissance .....	17
I.8.3.3.Éolienne avec un MS et un convertisseur pleine puissance .....	18
I.8.3.4.Éolienne avec un MSAP et un convertisseur pleine puissance .....	18
I.9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	19
I.10. Conclusion.....	20
<b><i>Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne</i></b>	
II.1 Introduction .....	21
II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne .....	21
II.2.1 Modélisation de la Turbine.....	21
II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse .....	24
II.2.3 Equation dynamique de l'arbre .....	24
II.3 Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) .....	26
II.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation .....	26
II .3.2 Mode de fonctionnement de la MADA .....	27
II.3.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA .....	27
II.4 Domaines d'application de la MADA .....	28
II.5 Avantages et inconvénients de la MADA.....	29
II.5.1 Avantages de la MADA .....	29
II.5.2. Inconvénients de la MADA .....	29
II.6. Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation .....	29
II.6.1. Hypothèses simplificatrices .....	30
II.6.2. Modèle de la GADA dans le plan ABC.....	30
II.6.3. La transformation de Park .....	33
II.6.3.1. Application de la Transformation de Park à la MADA .....	34
II.6.3.2 Modèle biphasé de la GADA .....	34



II.6.3.3. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park.....	36
II.6.3.4. Choix du référentiel .....	36
II.6.3.5. Modèle d'état de Park de la GADA .....	37
II.6.3.6 Bilan de puissance dans la GADA .....	37
II.7. Modélisation de l'onduleur .....	37
II.8. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) .....	39
II.9. Simulation de la GADA .....	41
II.9.1 Les résultats de Simulation de la GADA (avec une vitesse fixe 150rd/s) .....	41
II.9.2.1 Interprétation des résultats de simulation.....	43
II.10 Conclusion.....	43
<b><i>Chapitre III : La commande vectorielle de la GADA</i></b>	
III.1. Introduction .....	44
III.2. Le principe de la commande vectorielle .....	44
III.3. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique .....	45
III.3.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé .....	45
III.3.2. Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques .....	46
III.3.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques .....	47
III.3.4. Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques .....	47
III.4. La commande vectorielle directe .....	48
III.4.1. Commande directe en puissance active et réactive de la GADA .....	49
III.5. Commande indirecte .....	49
III.5.1. Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA .....	50
III.5.1.1. Commande en boucle fermée .....	50
III.6. Type des régulateurs utilisés .....	50
III.6.1. Système régulé par un régulateur PI .....	51
III.7. Simulation de la commande vectorielle (à vitesse fixe).....	52

III.7.1. Les résultats de simulation la commande directe et indirect (vitesse fixe).....	54
III.7.2. Interprétation des résultats .....	56
III.8 Conclusion.....	57
<b><i>Chapitre IV : La commande par mode glissant</i></b>	
IV.1. Introduction .....	58
IV.2. Historique .....	58
IV.3. Théorie de la commande par mode glissement .....	58
IV 3.1. Système à structure variable .....	59
IV.3.2. Objectif de la commande par mode glissant .....	59
IV .4. Notion de base .....	59
IV.4.1. Conception de la commande par mode de glissement .....	59
IV.4.2. Bases mathématiques de la commande à structure variable .....	60
IV.4.3. Condition d'existence du mode glissant .....	60
IV.4.4. Choix de la surface de glissement .....	61
IV.5. La fonction de Lyapunov .....	62
IV.6. Phénomène de chattering .....	62
IV.6.1 La fonction SAT .....	62
IV.6. 2. La fonction adoucie (Smooth function).....	63
IV.7. Expression analytique de la commande .....	63
IV.8. Commande non-linéaire par mode glissant.....	64
IV.8.1. Modèle de la GADA .....	65
IV.8.2. Loi de commande par mode glissant .....	65
IV.8.3. Choix des surfaces de glissements .....	66
IV.9. Domaines d'application de la commande par mode glissant .....	68
IV.10. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement.....	68
IV.11. simulation de la commande par mode glissant .....	69
IV.11.1. Résultats de simulation .....	70

---

IV.11.2. Interprétation des résultats .....	71
IV.12. Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	73
Annexe	
Références	

<b>Figure I.1:</b> La production d'énergie électrique par énergie hydraulique.....	4
<b>Figure. I.2 :</b> la production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique .....	4
<b>Figure. I.3 :</b> Système Photovoltaïque.....	6
<b>Figure I.4:</b> La production énergie électrique a travers de géothermie .....	7
<b>Figure I.5 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	7
<b>Figure 1.6:</b> Principaux organes du système de conversion éolien.....	8
<b>Figure 1.7 :</b> Moulins à vent « Espagne ».....	9
<b>Figure 1.8 :</b> La première éolienne automatique.....	9
<b>Figure 1.9:</b> Tracé des cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent représentant l'hiver à 10 m du sol (m/s).....	11
<b>Figure 1.10 :</b> Technologie éolienne à axe vertical.....	12
<b>Figure 1.11 :</b> Technologie éolienne à axe horizontale.....	13
<b>Figure1.12 :</b> Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	13
<b>Figure 1.13 :</b> Les composants de l'aérogénérateur.....	14
<b>Figure 1.14 :</b> Les types des mâts. Pour les petites éoliennes, les mâts haubanés (à gauche)..	15
<b>Figure 1.15 :</b> Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un Convertisseur pleine puissance.....	17
<b>Figure 1.16 :</b> Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à nombre élevé de pôle et un convertisseur pleine puissance.....	18
<b>Figure I.17 :</b> Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone et un convertisseur pleine puissance.....	18
<b>Figure 1.18 :</b> Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance.....	19
<b>Figure II.1.</b> Schéma de la turbine éolienne .....	21
<b>Figure II.2.</b> Profil de la vitesse du vent .....	22
<b>Figure II.3.</b> Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.....	23
<b>Figure II.4.</b> Modèle mécanique du multiplicateur.....	24

<b>Figure. II.5:</b> Modèle de transmission mécanique à une masse sur l'arbre rapide .....	24
<b>Figure II.6 :</b> Modèle d'une turbine éolienne.....	25
<b>Figure.II.7 :</b> Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.....	25
<b>Figure. II.8 :</b> Schéma bloc du modèle de la turbine.....	26
<b>Figure II.9 :</b> Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	27
<b>Figure. II.10 :</b> Quadrants de fonctionnement de la MADA.....	27
<b>Figure II.11 :</b> Représentation simplifié de la MADA.....	31
<b>Figure. II.12 :</b> Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	34
<b>Figure. II.13 :</b> Transformation de Park.....	35
<b>Figure.II.14 :</b> Schéma d'un onduleur de tension.....	38
<b>Figure II.15 :</b> Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.....	40
<b>Figure II.16 :</b> Schéma bloc de la GADA.....	41
<b>Figure II.17 :</b> Courant statorique.....	42
<b>Figure II.18 :</b> Courant statorique (zoom).....	42
<b>Figure II.19 :</b> Courant rotorique.....	42
<b>Figure II.20 :</b> Courant rotorique (zoom).....	43
<b>Figure.III.1:</b> Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA.....	45
<b>Figure. III.2:</b> Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	46
<b>Figure.III.3:</b> Schéma synoptique de la commande vectorielle directe de la GADA.....	48
<b>Figure.III.4:</b> Schéma bloc de commande directe des puissances actives et réactives.....	49
<b>Figure. III.5:</b> Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.....	50
<b>Figure III.6:</b> Schéma de la régulation.....	51
<b>Figure III.7:</b> Schéma bloc de la commande vectorielle direct de la GADA (vitesse fixe)....	53
<b>Figure III.8:</b> Schéma bloc de la commande vectorielle indirect de la GADA (vitesse fixe)...	53
<b>Figure III.9:</b> Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la commande directe ( $(P_{s-ref})$ variable, ( $Q_{s-ref}$ ) nulle).....	54

<b>Figure III.10:</b> Courant statorique.....	55
<b>Figure III.11:</b> Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la Commande indirecte ( $P_{s-ref}$ variable, $Q_{s-ref}$ nulle).....	55
<b>Figure III.12:</b> Courant statorique.....	56
<b>Figure IV.1:</b> Existence du mode de glissement.....	60
<b>Figure IV.2:</b> Fonction«SAT ».....	63
<b>Figure IV.3:</b> Fonction « SMOOTH ».....	63
<b>Figure IV.4:</b> Représentation de la fonction « Sign».....	64
<b>Figure IV.5 :</b> Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant de La GADA...	68
<b>Figure IV.6</b> Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA.....	69
<b>Figure IV.7 :</b> La puissance active .....	70
<b>Figure IV.8:</b> La puissance réactive .....	70
<b>Figure IV.9:</b> Courant statorique.....	70
<b>Figure IV.10 :</b> Courant statorique (zoom).....	71

---

MAS	: Machine asynchrone
GADA	: Génératrice asynchrone à double alimenté
MADA	: machine asynchrone à double alimenté
MLI	: modulation de largeur d'impulsion
SVM	: Space Vector Modulation
$\Omega_{tur}$	: vitesse tournant d'arbre
$J_{pal}$	: La même élasticité
$d_a$	: Le coefficient de frottement par rapport à l'aire
$J_a$	: Inertie d'arbre
$K_a$	: San élasticité
$D_a$	: Coefficient de fortement par rapport au multiplicateur
$J_G$	: Une inertie
$D_G$	: Un coefficient de fortement
$F_{rot}$	: Force de rotation
m	: Quantité de mouvement
$P_v$	: Puissance contenue dans le vent sous forme d'énergie cinétique
$\rho$	: Densité volumique de l'aire
$s_b$	: Surface balayée par les pales
$v$	: vitesse filtrée du vent au moyeu de la turbine
$B$	: Angle de calage des pales
$P_{aer}$	: Puissance captée par la turbine
$C_p$	: Coefficient de puissance (sans unité)
$\lambda$	: Rapport de vitesse (sans unité)
$r_t$	: Rayon de la turbine en mètre (m)
$C_{aer}$	: Couple aérogénérateur
$C_g$	: Couple de la machine
$C_{mec}$	: Couple mécanique

---

---

$J$	: L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
$c_r$	: Couple ristance
$P_n$	: Puissance nominale
$V_n$	: vitesse nominale du vent
$V_m$	: vitesse maximale du vent
$V_d$	: vitesse démarrage du vent
$C_{PID}$	: est le régulateur de vitesse
$\Omega_{ref}$	: est la vitesse mécanique de référence
$C_{pmax}$	: Coefficient de puissance maximal
$r_s$	: Résistance d'une phase statorique
$r_r$	: Résistance d'une phase rotorique
$w_r$	: Pulsation de fréquence rotorique
$w_s$	: Pulsation de fréquence statorique
$(x, y)$	: Axes correspondant au référentiel lié au rotor
$(\alpha, \beta)$	: Axes correspondant au référentiel lié au stator
$(d, q)$	: Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	: Flux stator instantané selon l'axe (d, q)
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	: Flux rotor instantané selon l'axe (d, q)
$V_{rd}, V_{rq}$	: Tension rotor instantanée selon l'axe (d, q)
$V_{sd}, V_{sq}$	: Tension stator instantanée selon l'axe (d, q)
$S$	: Opérateur dérivée de Laplace d/dt
$L_s$	: Inductance cyclique propre statorique
$L_r$	: Inductance cyclique propre rotorique
$M$	: L'inductance mutuelle
$M_{sr}$	: Inductance mutuelle stator- rotor
$M_{rs}$	: Inductance mutuelle rotor - stator

---



$I_{sd}, I_{sq}$	: Courant stator instantané selon l'axe (d, q)
$I_{rd}, I_{rq}$	: Courant rotor instantané selon l'axe (d, q)
$P$	: Nombre de paire de pôles
$\Omega$	: vitesse de rotation de la machin
$J$	: Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne
$f_r$	: Coefficient de frottement
$P_s$	: Puissance active transmise par le stator de la machine électrique
$P_r$	: Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique
$P_m$	: Puissance mécanique
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
$Q_r$	: Puissance réactive rotorique
$g$	: Glissement
$\sigma$	: Coefficient de dispersion de blondel ou coefficient de fuit total
$PI$	: Correcteur proportionnelle-intégral
$T_s$	: Constante de temps statorique :
$(u_{an_0}, u_{bn_0}, u_{cn_0})$	: Tension de entrer de l'onduleur
$(u_{an}, u_{bn}, u_{cn})$	: Tension de sortie de l'onduleur
$v_1$	: Gain La surface de glissement de puissance active
$v_2$	: Gain La surface de glissement de puissance réactive
$x^{ref}$	: La référence de la variable x

# **Introduction générale**

L'énergie éolienne ou l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Eole (en grec ancien Αἰολός, Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique. Le développement durable et les énergies renouvelables suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs équipes de recherches. Ainsi, le développement des éoliennes représente 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 fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages. En effet, C'est une énergie complètement propre, elle n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre. Son fonctionnement ne pollue ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et, convertit en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine : le vent. C'est aussi, l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée. [1].

La commande de cette machine est une opération délicate à cause du couplage existant entre leurs différentes variables d'état et du nombre important des variables de commande.

En Allemagne, au début des années soixante-dix, Blaschke et Hasse ont introduit une nouvelle stratégie de contrôle : la commande vectorielle.

La commande vectorielle par orientation du flux (FOC) présente une solution attractive et comparative pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine Asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour GADA. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [2].

Parmi plusieurs types de commandes modernes qui ont attiré l'attention de beaucoup de chercheurs le long de ces dernières années, on trouve la commande par mode de glissement. L'intérêt récent accordé à cette commande est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs très performants.

La stratégie de contrôle d'une structure variable utilisant la commande par mode glissant a fait l'objet de nombreuses études et des recherches. Cependant, ce type de commande a un défaut essentiel, qui est le phénomène de chattering. Une façon d'améliorer les performances de la commande par mode glissant consiste à utiliser un contrôleur par mode glissant en fonction de saturation ou lie de la fonction sign pour éliminer le phénomène de chattering. [3]

Le présent travail s'oriente principalement vers la commande de la génératrice asynchrone double alimentation commandée par mode de glissement. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (Turbine + GADA). Nous présentons aussi la structure de la machine asynchrone a doublé alimentation, son mode de fonctionnement, ses inconvénients et ses avantages.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe (vitesse mécanique constante). Les performances de cette commande vectorielle seront démontrées par des résultats de simulation.

Le quatrième chapitre concerne la commande par mode de glissement avec surface de commutation non linéaire. Nous présenterons tout d'abord, le concept général des systèmes à structures variables. Puis, nous abordons la commande de la GADA par cette technique.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives pour une éventuelle continuité du présent travail.

**Chapitre I :**  
**Etat de l'art sur les**  
**systemes éoliens**

### **I.1.Introduction :**

Les sources d'énergie renouvelables (SER) font l'objet d'un regain d'intérêt ces dernières années. La cause principale de cet essor se cache derrière les pronostiques d'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la planète : fuel, gaz naturel, charbon et même uranium. Au contraire, les SER peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine, puisqu'elles utilisent des flux énergétiques naturels issus du soleil ou de la biomasse. Une autre raison du développement des sources d'énergies renouvelables est la distribution non uniforme des ressources conventionnelles d'énergie sur la Planète, couplée à une consommation non uniforme elle aussi. [4]

### **I.2.Energies renouvelables :**

Les énergies renouvelables c'est un ensemble des sources d'énergie qui sont largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental Elles peuvent être converties selon les besoins en électricité ou en chaleur.

La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [5].

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes.

Pour autant, ces énergies ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité en notant que l'hydroélectricité représente 92,5% de l'électricité issue des énergies renouvelables (biomasse 5,5%, éolien 1,5%, géothermie 0,5% et le solaire 0,05%). Ainsi, la capacité totale de production d'électricité issue d'énergie renouvelable (hors grande hydraulique) s'élève à 160 giga watts (GW), soit 4% de la capacité mondiale du secteur énergétique. Les pays en développement produisent 44% de cette capacité, soit 70 GW [6].

### **I.3.Les types des énergies renouvelables :**

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont : [7]

- l'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- la biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- l'énergie solaire
- la géothermie.
- l'énergie éolienne

#### **I.3.1.Energie hydraulique :**

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité.

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques. [8]



**Figure I.1:**La production d'énergie électrique par énergie hydraulique [9].

### I.3.2.La biomasse :

La conversion de l'énergie solaire par les plantes grâce à la photosynthèse regroupe l'absorption du rayonnement solaire, sa transformation en énergie et le stockage de celle-ci sous forme de matière organique (biomasse). Néanmoins le rendement de cette production est très bas, du fait que seule une fraction très faible de l'énergie solaire parvient aux feuillages.

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre. Cependant, la biomasse ne peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir. [8].



a. [10]



b. [11]

**Figure. I.2 :** la production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique

### **I.3.3. L'énergie solaire :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc /m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [12].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

#### **I.3.3.1 L'énergie solaire thermique:**

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques. [13]

#### **I.3.3.2. L'énergie solaire passive:**

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

#### **I.3.3.3. L'énergie solaire photovoltaïque:**

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou converties à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique. [14]

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [15].





**Figure. I.3 :** Système Photovoltaïque. [16]

### **I.3.4. Energie Géothermique**

Du grec Gé (terre) et thermos (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée [17].

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol (figure I.4). Par tout, la température croît depuis la surface vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuse sou perméables et contiennent des aquifères [17].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage d'aine pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite [17].



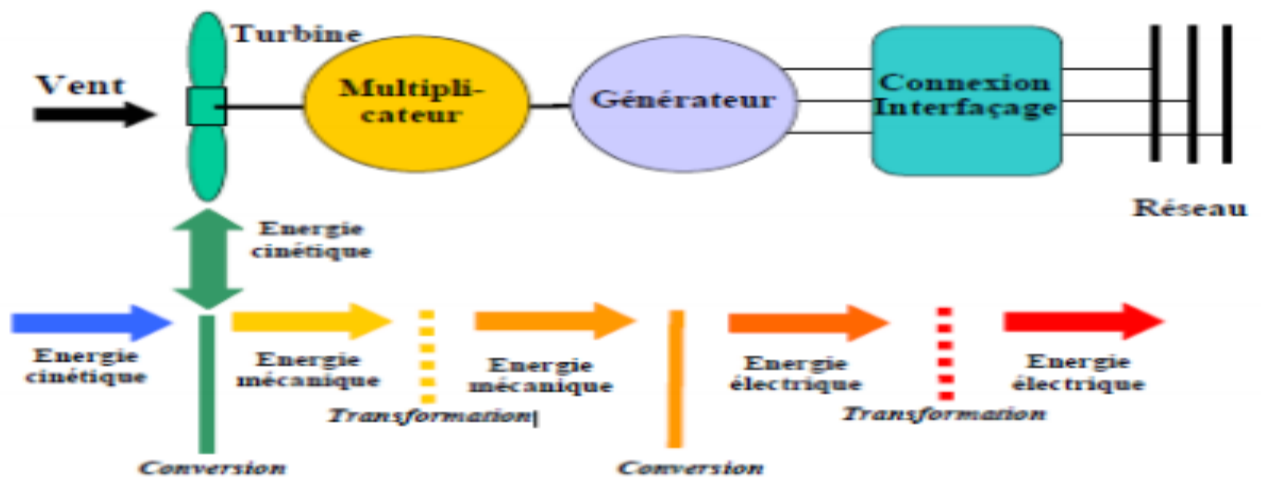
**Figure I.4:** La production énergie électrique a travers de géothermie [18].

### I.3.5. L'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [19].

Il existe deux types d'éoliennes modernes : le système à axe horizontal et à axe vertical.

Les plus courants sont celles à axe horizontal [20].



**Figure I.5 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [21].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Figure I.6 [22].

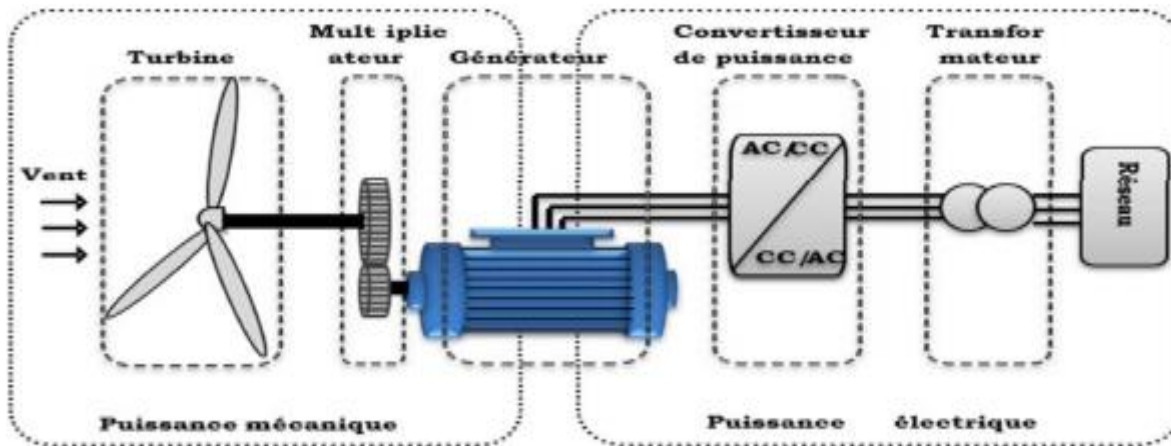


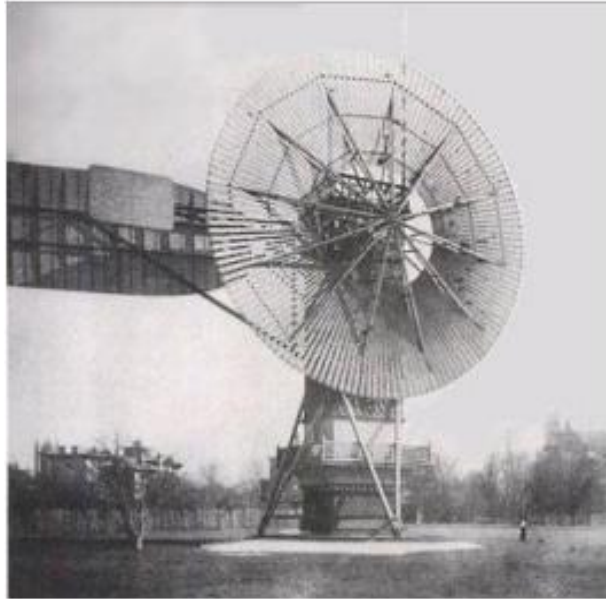
Figure I.6: Principaux organes du système de conversion éolien [22].

#### I.4. Histoire de l'énergie éolienne :

- **VII<sup>e</sup> siècle** : Utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éolienne rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain
- **1100** : En Europe, les premières éoliennes sont construites et utilisées pour pomper l'eau et moudre le blé, ces moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal
- **XIV<sup>e</sup> siècle** : Des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique (la « poussée ») et la vitesse du rotor. Ces améliorations permettent d'obtenir une meilleure mouture et une irrigation plus efficace. Développement en Europe et plus particulièrement aux Pays Bas du moulin à vent pour le meulage du grain, l'irrigation des terres agricoles, le pompage de l'eau de mer, le sciage du bois, la fabrication du papier et de l'huile et le meulage de divers matériaux.
- **1700** : Les turbines éoliennes font leur apparition au Canada grâce aux colons qui les utilisent pour moudre le grain.
- **Fin des années 1700** : Les moulins à vent sont l'équivalent du moteur électrique de l'Europe pré-industrielle. Ils fournissent environ 1 500 mégawatts (un niveau qui n'a été atteint par la suite que vers la fin des années 1980). Cette énergie éolienne est utilisée pour irriguer les terres, moudre le grain, scier le bois d'œuvre et pour traiter des produits comme les épices et le tabac.



**Figure I.7 :** Moulins à vent « Espagne »



**Figure I.8 :** La première Éolienne automatique

- **1800 :** Les homéostat d'ers américains utilisent les moulins à vent pour pomper de l'eau pour alimenter leurs fermes et leurs ranchs lors de leur établissement dans l'Ouest. Les pales de ces premiers moulins à vent de ferme étaient de simples palettes de bois.
- **1887-1888 :** L'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, construit la première éolienne entièrement automatisée qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. Haute de 17mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW. Jusqu'en 1920, la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.
- **1890 :** La première éolienne dite « industrielle » permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Pou l La Cour, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykke gard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.
- **1891 :** l'inventeur danois Pou l La Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. Il découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de nombreuses pales. Il met au point les premières éoliennes conçues à partir des principes modernes de l'aérodynamique. D'une puissance 25 kW grâce à des rotors à quatre pales elles affichent une plus grande efficacité. À la fin de la Première Guerre mondiale, l'utilisation de ces machines était largement répandue au Danemark. Cette éolienne expérimentale existe toujours à Askov (Danemark).
- **1920 :** L'inventeur français Georges J.M. Darrieus développe le concept d'un rotor à axe vertical : éoliennes Darrieus.
- **1920 :** Albert Betz poursuit des recherches sur la physique et l'aérodynamique des éoliennes. Il formule la loi qui porte son nom, selon laquelle l'énergie cinétique du

vent peut être exploitée au maximum à 59,3%. Sa théorie sur le façonnage des ailes est encore appliquée de nos jours.

- **1930** : Développement de petites éoliennes dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une puissance de 1 à 3 kW, elles permettaient d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme. Les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits destinée aux auges pour le bétail
- **Première moitié du XXe siècle** : Les éoliennes sont confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national. En raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient.
- **1955** : En France à Nogent-le-Roi dans la Beauce, une éolienne expérimentale de 800kVA fonctionne de 1955 à 1963. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.
- **1957** : Johannes Juul crée la turbine Gedser pour la compagnie d'électricité SEAS au Danemark qui sert de modèle aux éoliennes modernes, elle se compose d'un générateur et de trois Pales à pivot.
- **1960** : Ulrich Hutter met au point des plans élaborés de turbines à axe horizontal en Allemagne. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'attaque ajustable afin d'en augmenter l'efficacité.
- **1971** : Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de 5 MW.
- **1973** : La crise pétrolière ravive l'intérêt pour le grand éolien et incite les gouvernements de l'Allemagne, de la Suède, du Canada, du Royaume-Uni et des États-Unis à financer des projets de recherche sur les énergies renouvelables. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. Des parcs éoliens sont construits durant les années 1970 aux États-Unis ainsi qu'en Europe.
- **1980** : L'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne et favorise l'installation de 17 000 éoliennes de 20kW à 350 kW entre 1981 et 1990.
- **1984** : Projet Éole, la plus grande éolienne de type Darrieux au monde.
- **2002** : Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde (en 2002) au Danemark (HornsRev)
- **2004** : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 000 MW [23].

### I.5. L'éolienne en Algérie :

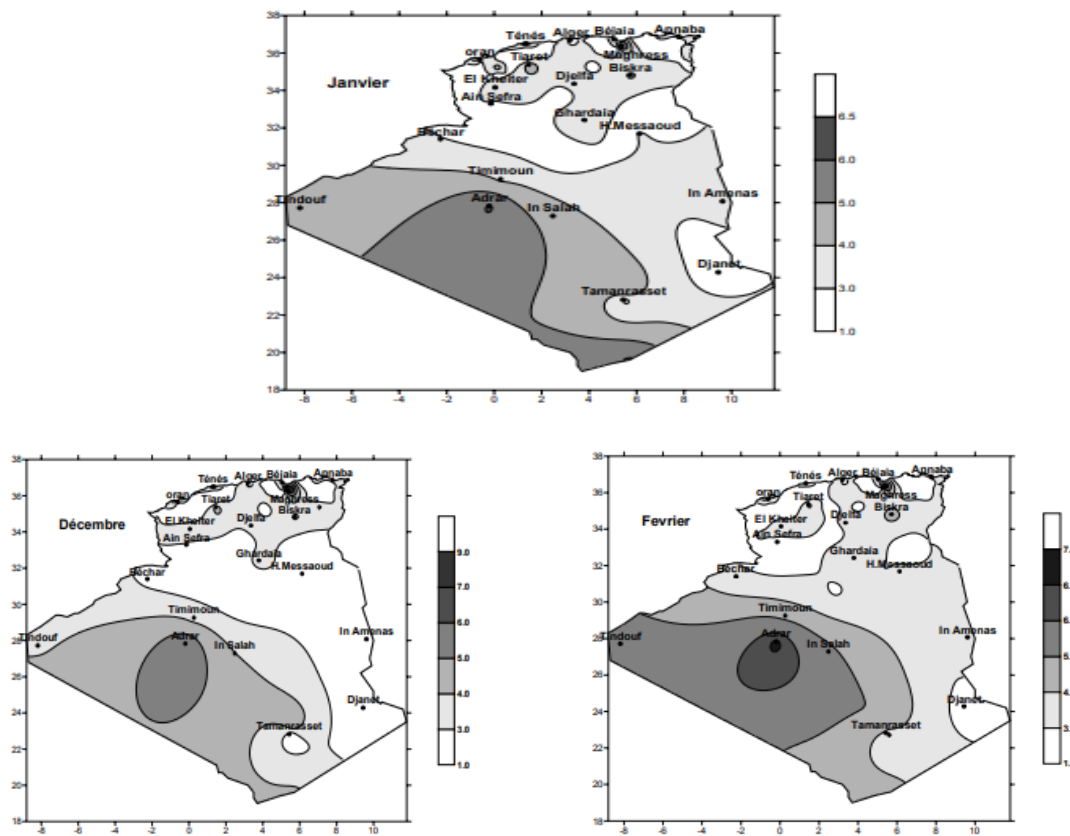
Les exigences du développement durable entraînent une augmentation de la production d'électricité à partir des sources renouvelables. L'éolien et le solaire constituent actuellement la ressource la plus compétitive, l'amélioration des éoliennes et des panneaux solaires conduit à de nombreuses recherches, notamment dans le domaine de l'électrotechnique. L'exploitation



des ressources renouvelables est en plein essor dans les pays industrialisés et même dans certains pays sous-développés. En ce qui concerne l'Algérie, un pays très vaste au climat très diversifié, avec deux grandes zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen et le sud saharien, peut devenir un bon concurrent pour le recours aux énergies renouvelables. [24]

En ce qui concerne l'Algérie, des études ont été entreprise pour l'évaluation de cette ressource à travers l'Algérie. Les résultats ont montré une variabilité importante de la vitesse du vent en fonction des saisons, de l'altitude et une variation substantielle d'un endroit à un autre à cause de l'influence de la topographie. Dans la présente étude nous nous intéressons à la variation mensuelle de la vitesse du vent à travers l'Algérie. Les résultats sont présentés sous forme de cartes afin de faciliter la lecture et de permettre à l'utilisateur d'avoir une idée générale sur la répartition géographique du gisement éolien tout au long de l'année.

Ce travail permet en définitif de faire une première identification des régions ventées. [25]



**Figure I.9:** Tracé des cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent représentant l'hiver à 10 m du sol (m/s) [25]

Les vents « GISEMENT EOLIEN » de l'Algérie commencent à être timidement étudiés. L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Lorsque les vents dans une zone ou une région sont définis comme source d'énergie, des études approfondies doivent être faite selon les aérogénérateurs que l'on désire installer. [26]

## I.6. Les différents types d'éoliennes:

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [19].

### I.6.1. Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [19].



Savonius

Darrieux de type H

Darrieux

**Figure I.10** : Technologie éolienne à axe vertical. [19]

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [19].

### I.6.2. Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [19].



Mouline américain

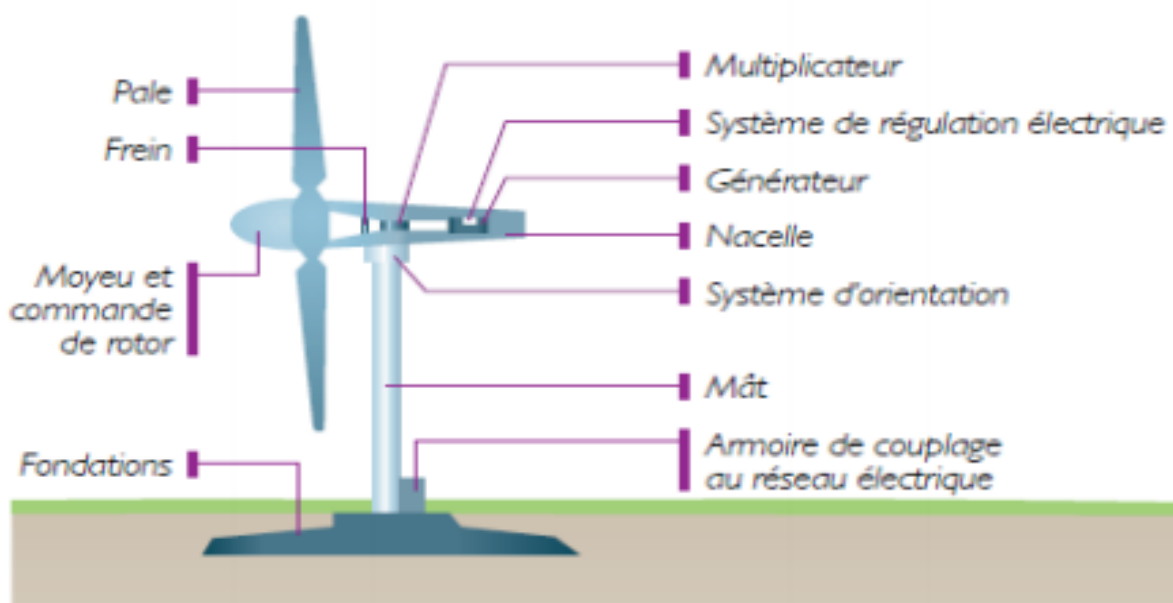
voilure bipale

voilure tripale

**Figure I.11** : Technologie éolienne à axe horizontale [19]**I.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne :**

Héritiers des moulins à vent, les aérogénérateurs - plus souvent appelés éoliennes - utilisent la force du vent pour la transformer en électricité.

La machine se compose de pales (3 en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. Le générateur transforme l'énergie mécanique ainsi créée en énergie électrique injectée dans le réseau en conformité aux normes électriques applicables [27].

**Figure I.12** : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

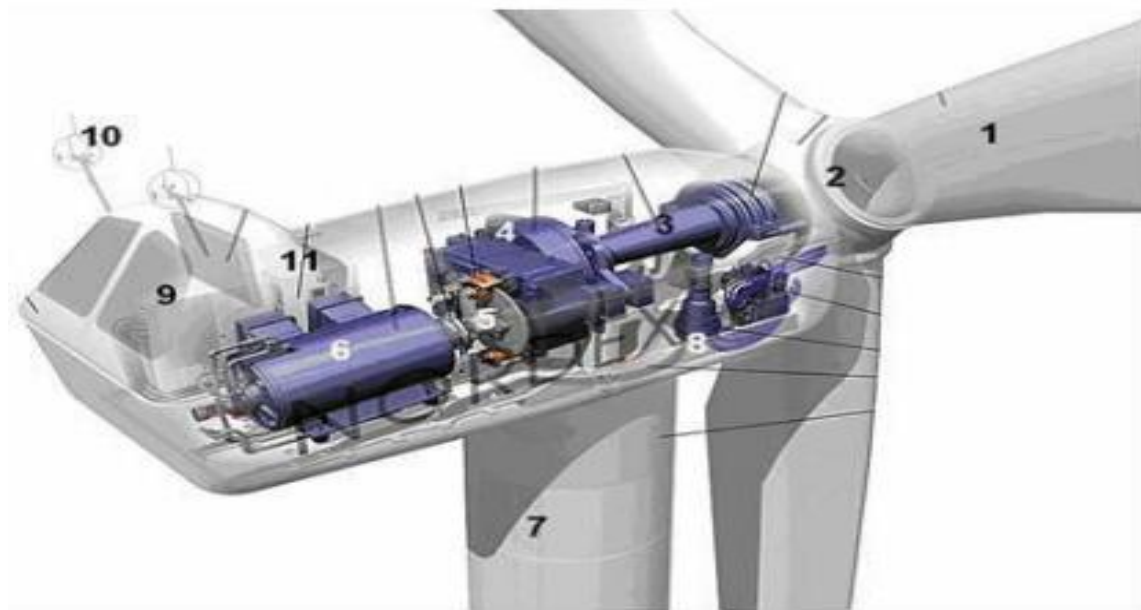


Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

La probabilité d'occurrence de vents plus forts étant faible, il n'est pas économiquement rentable de dimensionner les machines pour résister et produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m / s [27].

### I.7.1. Principes des éléments constitutifs d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne «classique» est généralement constituée de trois éléments principaux [26].



**Figure I.13** : Les composants de l'aérogénérateur

**1- Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes [27].

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde [28].

**2- Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

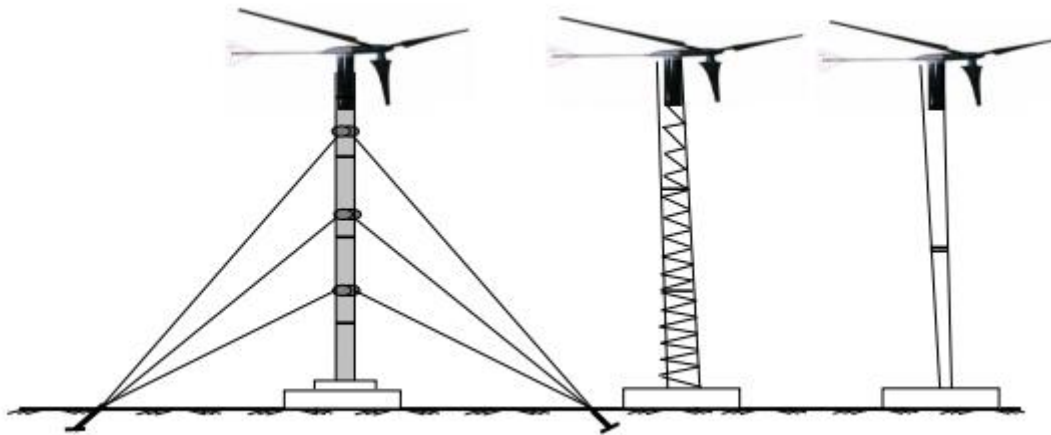
**3- L'arbre primaire (ou arbre lent)** : il relie les pales au multiplicateur.

**4- Le multiplicateur :** il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

**5- L'arbre secondaire :** il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

**6- Le générateur électrique :** il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

**7- Le mât :** c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales [27].



**Figure I.14 :** Les types des mâts. Pour les petites éoliennes, les mâts haubanés (à gauche).

Sont les plus économiques. Les mâts en treillis autoportant (au centre) et les mâts tubulaires en porte-à-faux (à droite) sont plus coûteux, mais restent des options possibles [28].

**8- Le système d'orientation de la nacelle :** c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

**9- Le système de refroidissement :** il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

**10- Les outils de mesure du vent :** girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

**11- Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

**12-** Au pied du mât se trouve un transformateur [27].

### **I.8. Application des éoliennes :**

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage [29]

#### **I.8.1. Systèmes Isolés :**

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs ,ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [30].

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

#### **I.8.2. Systèmes Hybrides**

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme ,par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux .L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur

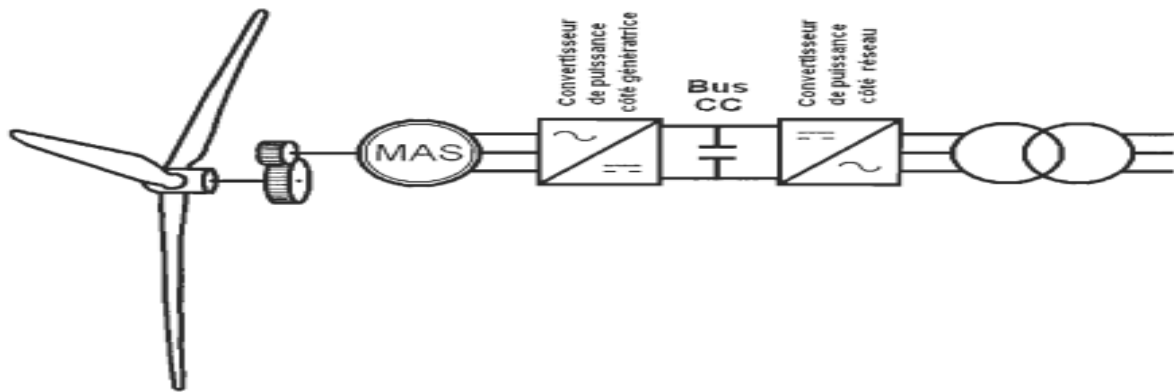
#### **I.8.3. Systèmes Liés au Réseau :**

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie.

Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe. Pour ce faire, l'utilisation de l'électronique de puissance est essentielle. En fait, les convertisseurs de puissance habituellement utilisés sont des convertisseurs de source de tension (VSC - Voltage Source Converter) composés de transistors de type IGBT (Insulate-Gate Bipolar Transistors). [31]

### I.8.3.1.Éolienne avec MS à cage et un convertisseur pleine puissance:

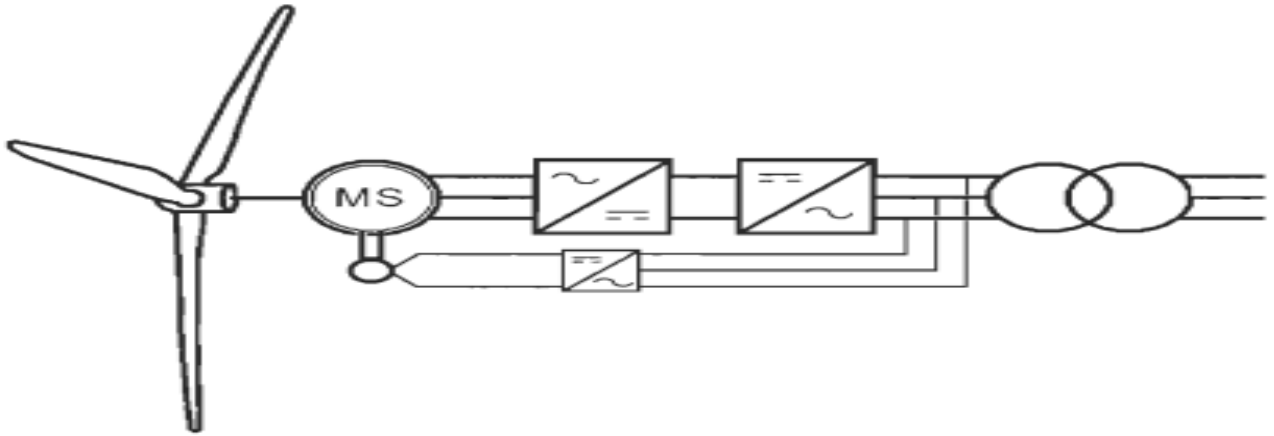
Pour ce qui est des machines asynchrones à cage, le rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse. Étant donné que la fréquence électrique de la machine est indépendante de la fréquence du réseau,



**Figure I.15 :** Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un Convertisseur pleine puissance

### I.8.3.2.Éolienne avec un MS à nombre élevé de pôles et un convertisseur pleine puissance :

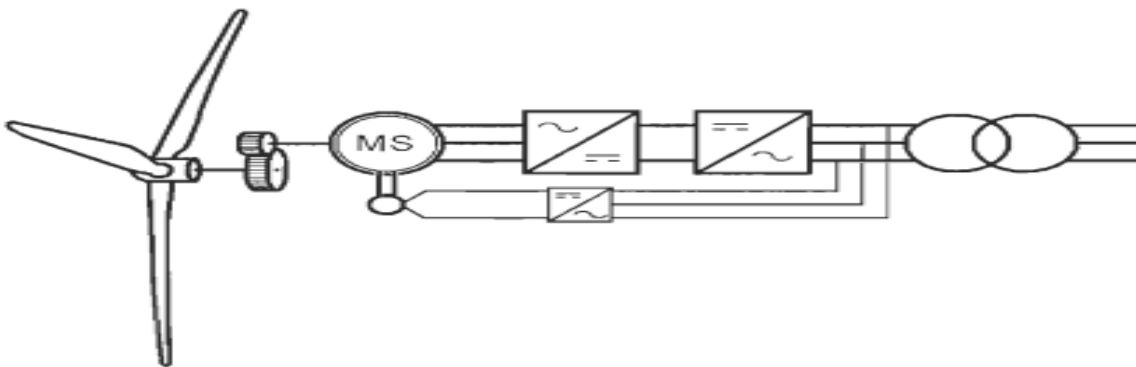
Pour ce qui est des machines synchrones avec un nombre élevé de pôles, le rotor de la machine est directement couplé au rotor de la turbine. C'est ce qu'on appelle une transmission à attaque directe. La génératrice peut posséder un circuit d'excitation externe ou être auto-excitée. Ce type de turbine est offert chez En arçon.



**Figure I.16 :** Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à nombre élevé de pôle et un convertisseur pleine puissance

### I.8.3.3.Éolienne avec un MS et un convertisseur pleine puissance :

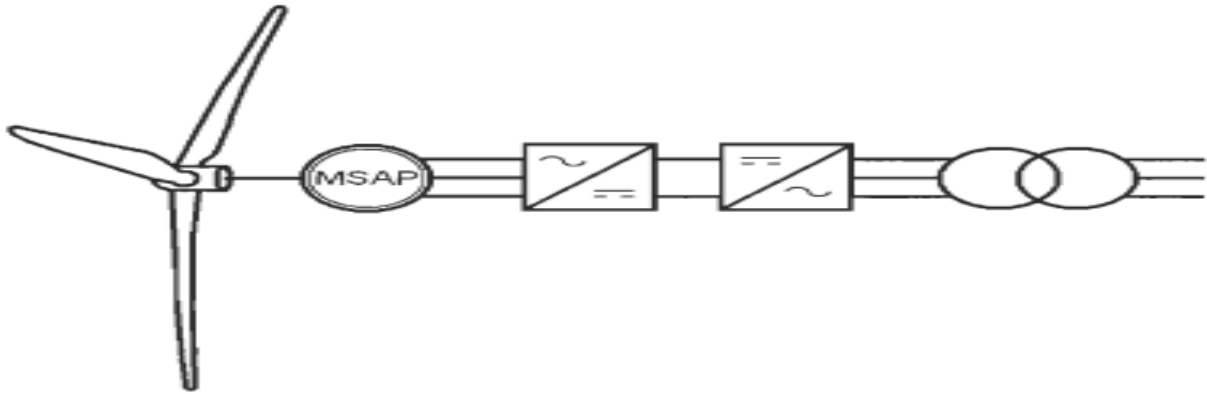
Finalement, pour ce qui est des machines synchrones à aimants permanents, le rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse ou non. Ceci dépend du nombre de paires de pôles de la machine. Par contre, le circuit d'excitation de la machine n'est plus nécessaire à cause de la magnétisation permanente de la génératrice. Cette technologie est présente chez GE et Siemens.



**Figure I.17 :** Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone et un convertisseur pleine puissance

### I.8.3.4.Éolienne avec un MSAP et un convertisseur pleine puissance :

Les éoliennes à vitesse variable avec convertisseur de puissance partiel sont composées de génératrices asynchrones à double alimentation (MASDA). Cette technologie Elle est maintenant la technologie la plus répandue pour les éoliennes de grande puissance



**Figure I.18 :** Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance

### I.9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne:

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients [32] :

**Tableau I.1 :** les avantages et les inconvénients d'une éolienne.

Les avantages les l'énergie éolienne	les inconvénients de l'énergie éolienne
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Énergie propre non polluant, gratuite, abondante et inépuisable</li> <li>• Elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles</li> <li>• Elle ne consomme pas de combustibles</li> <li>• Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple : agricoles</li> <li>• Bas impact environnemental</li> <li>• Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et venté.</li> <li>• Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.</li> <li>• Temps de réalisation d'une centrale éolienne minimum.</li> <li>• Ils ont une longue durée de vie.</li> <li>• On élimine les frais et les risque de transport associé des énergies fossiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instable, elle est sujette à des variations du vent et à des périodes de calme</li> <li>• Difficulté de stockage de l'énergie</li> <li>• Les équipements sont chers et produisent du bruit</li> <li>• Impact visuel (effets d'ombre dus au mouvement et réflexions intermittentes)</li> <li>• Interférences électromagnétiques</li> </ul>

**I.10. Conclusion :**

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement. Dans ce chapitre nous avons mentionné que les énergies renouvelables peuvent être issues de ressource hydraulique, solaire, géothermie, biomasse et éolienne, et nous avons analysé la technique d'une éolienne avec les applications, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. [33]

**Chapitre II :**  
**Modélisation du système de**  
**conversion d'énergie**  
**éolienne**



## II.1 Introduction :

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement.

Dans ce chapitre, on va essayer de modéliser les deux composantes essentielles de notre système éolien (Turbine et GADA) [34].

## II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne :

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II.1) [35].

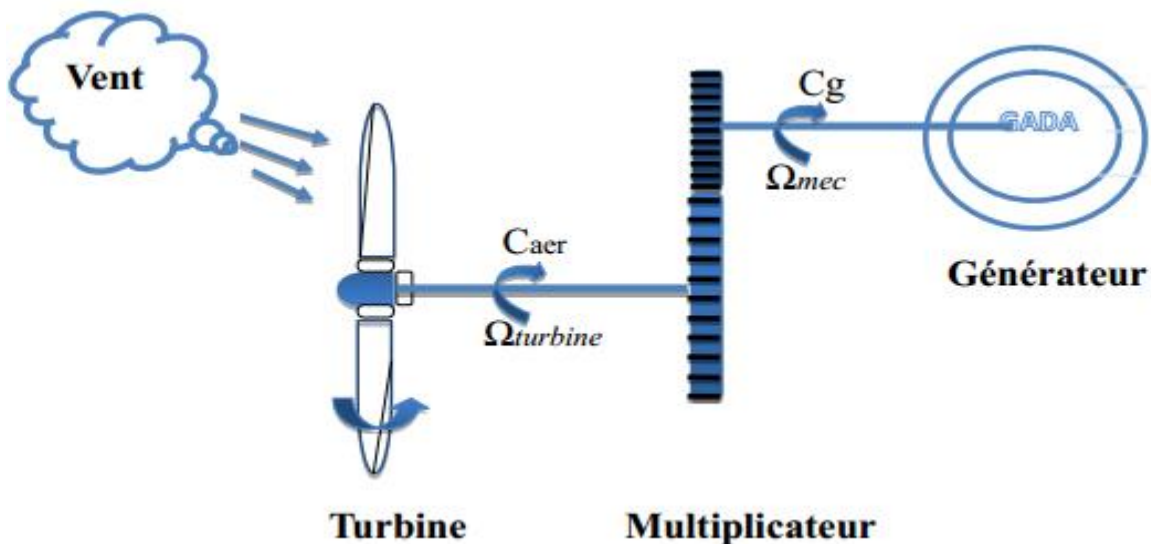


Figure II.1:Schéma de la turbine éolienne [35].

### II.2.1 Modélisation de la turbine:

La vitesse du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [35]:

$$P_{v=\frac{1}{2}}\rho S v^3 \quad (II.1)$$

Où

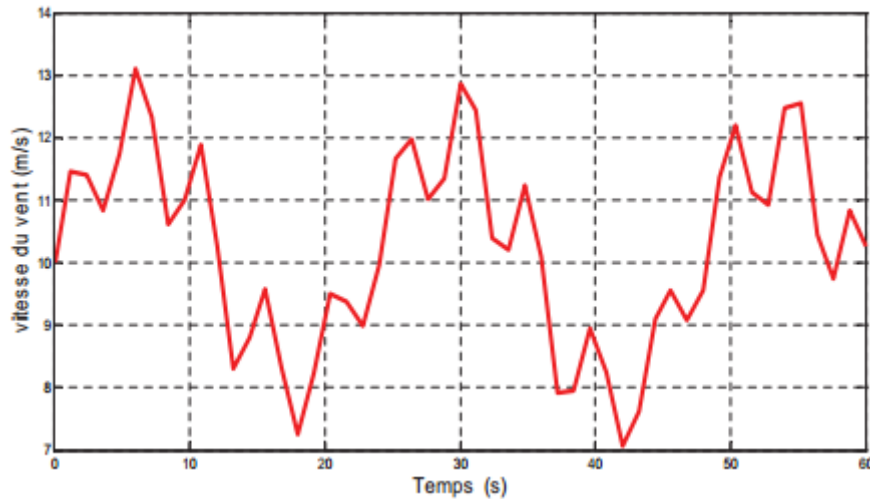
- $P_v$  : est la puissance totale théoriquement disponible.
- $\rho$  : est la densité de l'air ( $1.22 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).

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

-  $v$  : est la vitesse du vent.

L'expression mathématique très souvent utilisée pour modéliser la vitesse de vent est donnée par :

$$V_v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{II.2})$$



**Figure II.2:** Profil de la vitesse du vent

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique  $P_{aer}$  inférieure à la puissance disponible  $P_v$ .

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

Le coefficient de puissance  $C_p$ , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ( $\frac{P_{aer}}{P_v}$ ). Il dépend de la caractéristique de la turbine [35].

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ).

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

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

Où  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.5})$$

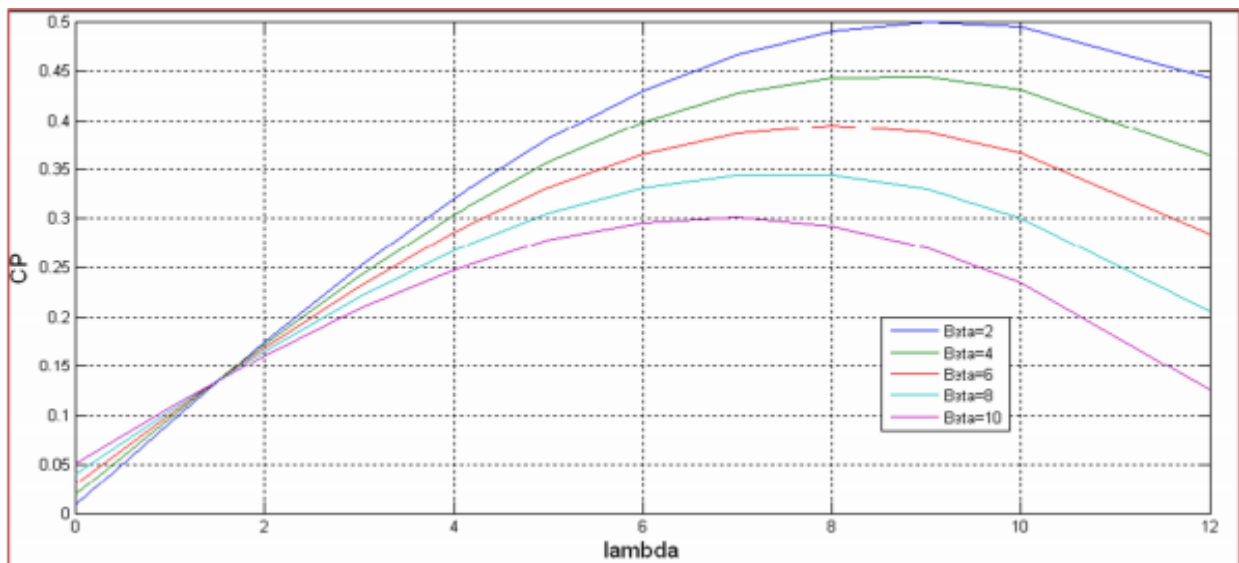
### ➤ Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent. On présente ce pourcentage par  $C_p(\lambda, \beta)$  qui est en fonction de ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de pale  $\beta$  [36].

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 1.5 MW pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique  $\lambda$  (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ . A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 1.5 MW est approximé par l'équation :

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

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.2), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ( $C_p = 0.5$ ) est atteint pour une  $\lambda = 9$ , et de l'angle d'orientation des pales  $\beta = 2$ . Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.



**Figure II.3:** Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Et on observe que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de Betz (0,59).

### II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$ , assez lente à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_g$  [37].



Figure II.4:Modèle mécanique du multiplicateur [37].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [35]:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.7})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.8})$$

### II.2.3 Equation dynamique de l'arbre : [35]

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

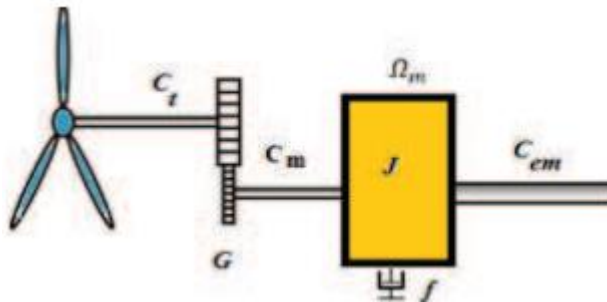


Figure. II.5:Modèle de transmission mécanique à une masse sur l'arbre rapide [38]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.9})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.10}$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

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

$$f: C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.11}$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure (II.5)

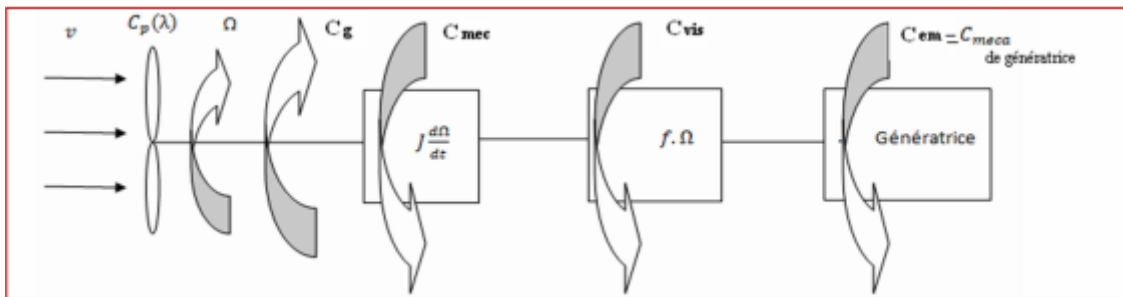


Figure II.6:Modèle d'une turbine éolienne [39].

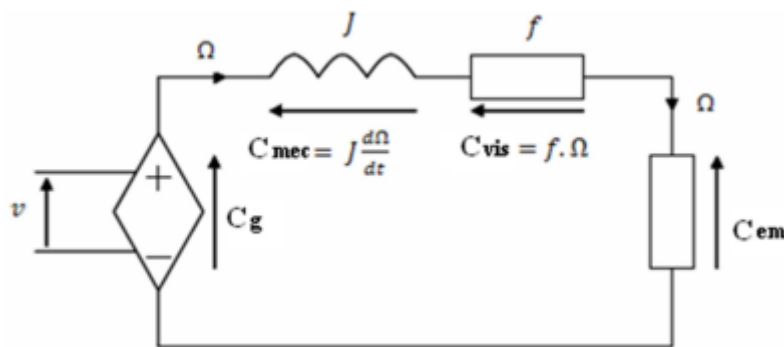


Figure.II.7:Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne [39]

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.12}$$

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.13}$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{J_s + f} (C_g - C_{em}) \tag{II.14}$$

Le schéma bloc (Figure II.7) correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes. Cette dernière génère le couple aérodynamique  $C_{aer}$  qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent V, l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , et la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_{turbine}$ . Le modèle du

multiplicateur transforme la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  et le couple aérodynamique  $C_{aer}$  respectivement en vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  et en couple de multiplicateur  $C_g$ . Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$ , il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur  $C_g$ , le couple électromagnétique  $C_{em}$  fourni par la génératrice. Le schéma montre que la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale  $\beta$  et le couple électromagnétique de la génératrice  $C_g$ . La vitesse du vent  $V$  est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système, [40].

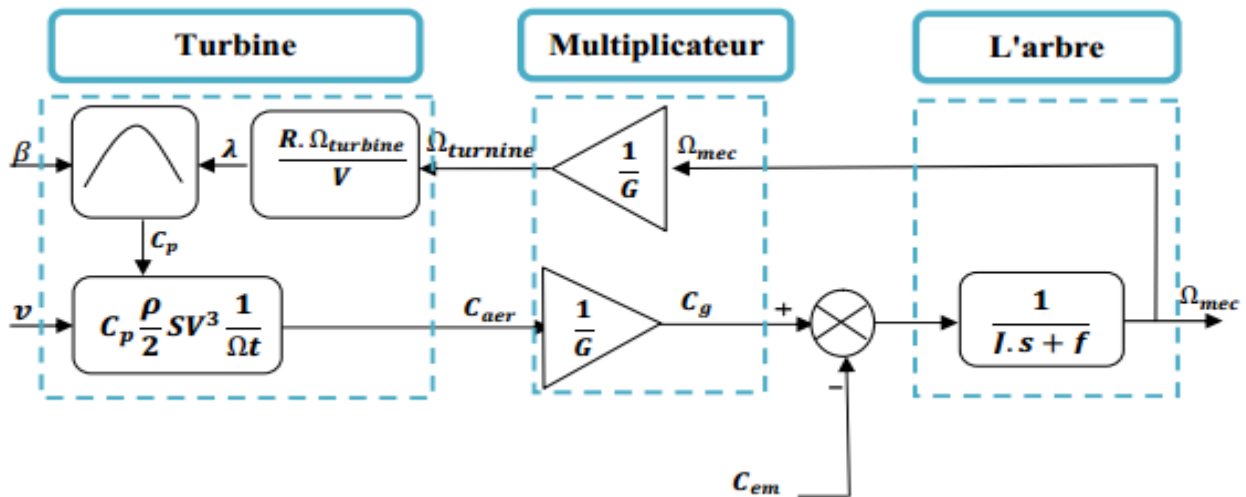


Figure. II.8: Schéma bloc du modèle de la turbine.

### II.3 Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) :

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation (doubly-fed induction machine (DFIM)), date de l'année 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [41]

#### II.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient de fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine [42].

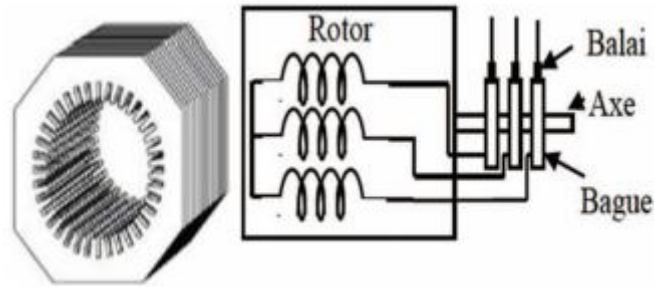


Figure II.9: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

### II .3.2 Mode de fonctionnement de la MADA :

La MADA est une machine réversible, son stator est directement connecté au réseau et le rotor est alimenté par un onduleur. La commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la MADA, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Cependant, dans une machine à cage c'est la vitesse de rotation qui impose la mode de fonctionnement moteur ou générateur, elle doit tourner en dessus de sa vitesse de synchronisme pour être en générateur et au-dessous pour être en moteur.

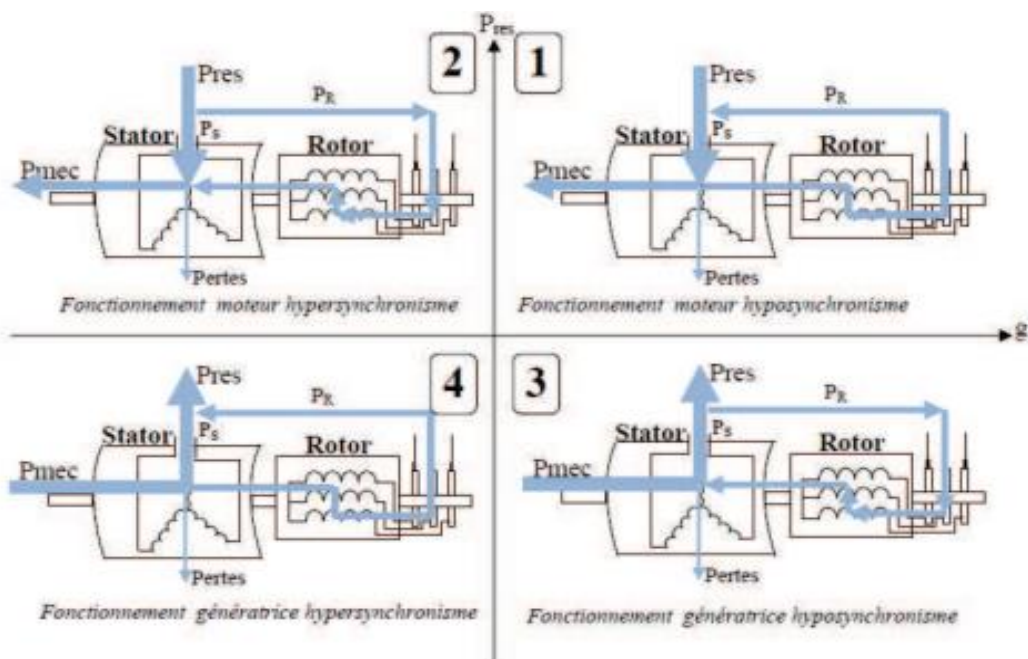


Figure. II.10: Quadrants de fonctionnement de la MADA [43]

### II.3.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

La MADA fonctionne en mode générateur dans les quadrants 3 et 4, et en mode moteur dans les quadrants 1 et 2. La figure (II.10) montre les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA.



➤ **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :**

La figure (II.10.3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [44]

➤ **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :**

La figure (II.10.4) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [44].

➤ **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La figure (II.10.2) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [44]

➤ **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :**

La figure (II.10.1) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [44]

#### **II.4 Domaines d'application de la MADA :**

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la "MADA" est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens, [45]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la "MADA" comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que, [46]

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La "MADA" peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [47]:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines



- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la "MADA" en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [48].

## II.5 Avantages et inconvénients de la MADA :

### II.5.1 Avantages de la MADA : [49]

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

### II.5.2. Inconvénients de la MADA :

- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.

## II.6. Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation :

L'étude du comportement de la GADA est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique. Généralement, ce modèle est défini dans un référentiel diphasé tournant (d, q). Ce référentiel est défini à partir du référentiel triphasé naturel de la GADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées.

Afin d'élaborer un modèle simple de la GADA, il est nécessaire de tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications [44]

### II.6.1. Hypothèses simplificatrices :

Notre modèle est basé sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On néglige les pertes fer, le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault, effet de peau, effet des encoches et l'échauffement.
- On suppose que le bobinage soit reparti de manière à donner une force magnétomotrice sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.
- la machine est symétrique et à entrefer constant.
- La densité du courant est uniforme dans la section des conducteurs.
- Tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements
- Les résistances et les inductances ne varient pas avec la température. [50]

### II.6.2. Modèle de la GADA dans le plan ABC :

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer.

En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre.

La figure (II.11) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique.

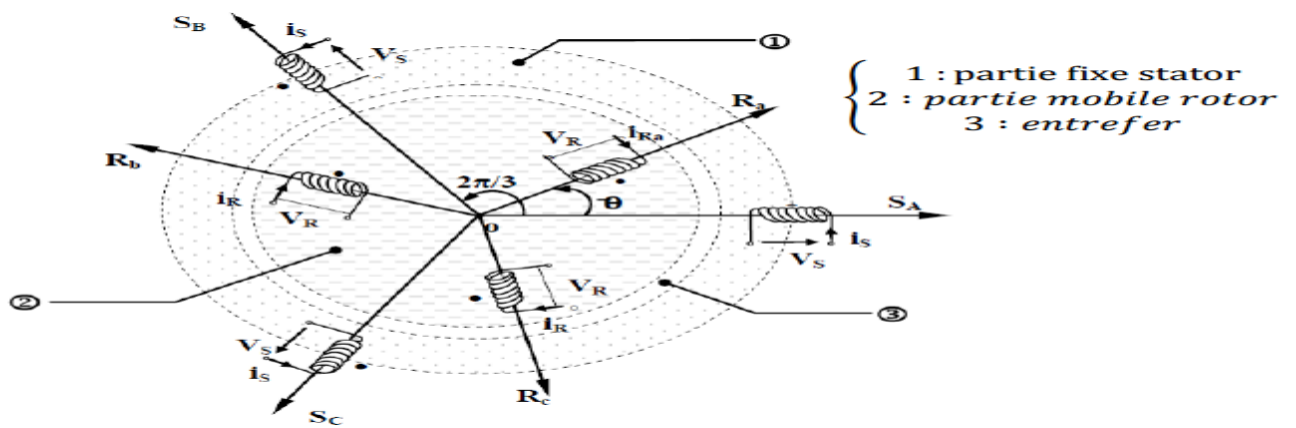


Figure II.11: Représentation simplifiée de la MADA [51].

➤ **Équations électriques :**

Afin d'établir la modélisation de la GADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles.

Nous partons des équations générales de la machine asynchrone à rotor bobine qui s'écrivent à partir de la loi de Faraday qui donne la relation entre la tension V aux bornes d'une bobine de résistance R, d'inductance L, le courant I, et la variation de flux, dans un repère triphasé, de la manière suivante :

$$\frac{d\phi}{dt} = V - R \cdot I \tag{II.15}$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve :

Pour le stator :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \tag{II.16}$$

$$\begin{aligned} V_{sa} &= R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} &= R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} &= R_s I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{aligned} \tag{II.17}$$

Pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \tag{II.18}$$

$$\begin{aligned}
V_{ra} &= R_r I_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\
V_{rb} &= R_r I_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\
V_{rc} &= R_r I_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt}
\end{aligned} \tag{II.19}$$

➤ Les équations magnétiques :

$$\begin{cases}
[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M] \cdot [I_r] \\
[\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M] \cdot [I_s]
\end{cases} \tag{II.20}$$

$$\begin{aligned}
[V_s] &= \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\
[V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}, [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\
[L_s] &= \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$V_s = [V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]^T$  : Tensions instantanées des phases a, b et c statoriques.

$I_s = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  : Courants instantanés des phases a, b et c statoriques.

$\Phi_s = [\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}]^T$  : Flux instantanés des phases a, b et c statoriques.

$V_r = [V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}]^T$  : Tensions instantanées des phases a, b et c rotoriques.

$I_r = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$  : Courants instantanés des phases a, b et c rotoriques.

$\Phi_r = [\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}]^T$  : Flux instantanés des phases a, b et c rotoriques.

$R_s$  et  $R_r$  : Résistances d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

$l_{ss}$  et  $l_{rr}$  : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

$m_{ss}$  et  $m_{rr}$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.

$m_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique.

$$[M] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

### II.6.3. La transformation de Park :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs ds, qs, dr, qr dont les axes magnétiques sont liés aux axes (d-q) conformément à la figure(II.12), [52]

La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réels leurs composantes : Direct selon l'axe (d), quadrature (transversal) selon l'axe (q), homopolaire(o).

- Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q) [53].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[P(\theta)]$  est donnée sous la forme suivante:

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)] = [x_{abc}] \quad (\text{II.22})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

La transformation inverse de Park qui permet le passage du système  $dqo$  au système  $abc$  est donnée par la matrice suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

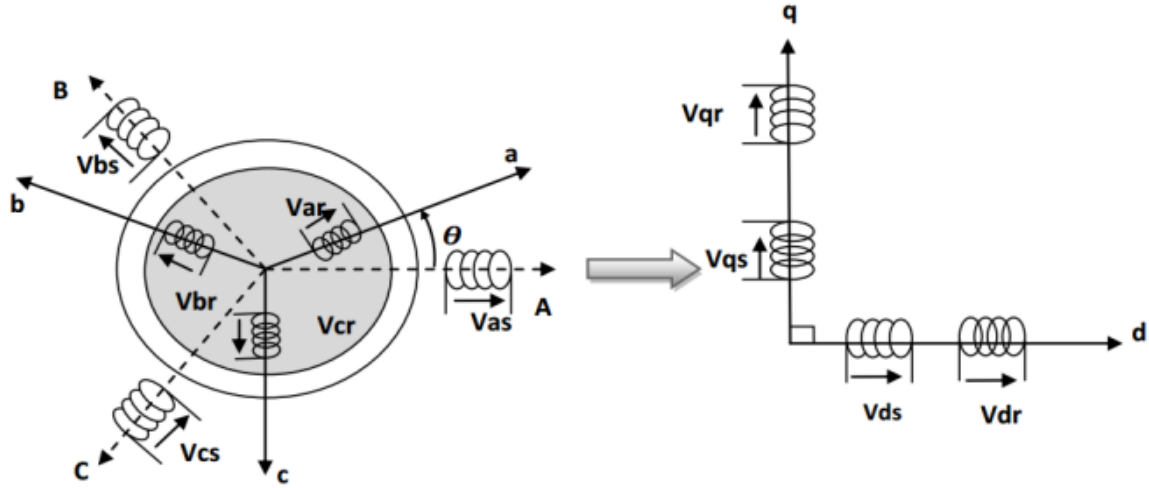


Figure.II.12:Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

### II.6.3.1. Application de la Transformation de Park à la MADA :

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque. Le modèle de la machine est obtenu en compte des composantes homopolaires sous la forme suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} \cdot [V_{sdq}] = [R_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} \cdot [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\Phi_{sdq}] \} + [P(\theta_s)]^{-1} + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] \quad (\text{II. 25})$$

En multipliant les deux membres de l'égalité par  $[P(\theta_s)]$ , nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (\text{II. 26})$$

$$[P(\theta)] \left[ \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.27})$$

Tel que :  $\theta = \theta_s$  pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$  pour les grandeurs rotoriques

En remplaçant la relation (II.26) dans (II.25) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant:

$$\begin{aligned} V_d &= R \cdot i_d \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \\ V_q &= R \cdot i_q \frac{d\Phi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_o &= R \cdot i_o \frac{d\Phi_o}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

### II.6.3.2 Modèle biphasé de la GADA :

En multipliant le système des équations (II.28) par la matrice de Park, on obtient

➤ **Equation électrique :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.29)$$

$w_s$  : Pulsation du référentiel (d, q).

$w$ : pulsation mécanique du rotor.

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statoriques et rotoriques on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (II.30)$$

Il apparaît clairement ensuite que les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celles des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations Ceci se fait en liant les angles :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (II.31)$$

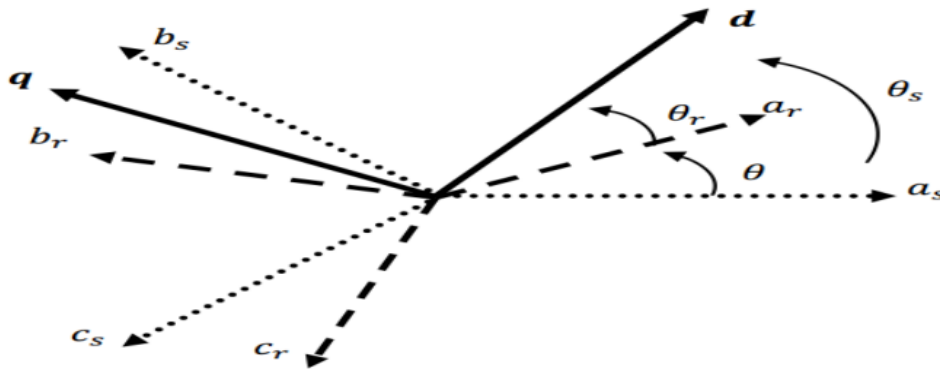


Figure.II.13: Transformation de Park

➤ **Equation mécanique :**

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

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (II.32)$$

### II.6.3.3. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

$$\begin{cases} C_{em} = P(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \\ C_{em} = PM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \\ C_{em} = \frac{P.M}{L_r}(\Phi_{dr}i_{qr} - \Phi_{qr}i_{ds}) \\ C_{em} = \frac{P.M}{L_s}(\Phi_{qs}i_{dr} - \Phi_{ds}i_{qr}) \end{cases} \quad (II.33)$$

### II.6.3.4. Choix du référentiel :

Le choix du référentiel dépend du problème à étudier. Il existe trois types de référentiel pour la machine asynchrone dont le choix dépend du type de problème à étudier [54].

➤ **Référentiel lié au stator :**

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (II.34)$$

Le repère lié au stator est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [55].

➤ **Référentiel lié au rotor :**

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (II.35)$$

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

➤ **Référentiel lié au champ tournant :**

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega = \omega_s$ . Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [54].

Le modèle mathématique de la MADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.36)$$



### II.6.3.5. Modèle d'état de Park de la GADA :

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante [56] :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{M}{L_s} \cdot w_r i_{qr} + \frac{MR_r}{L_s L_r} i_{dr} + w_r i_{qs} + \sigma w_{sl} i_{qs} - \frac{R_s}{L_s} i_{ds} - \frac{M}{L_s L_r} V_{dr} + \frac{1}{L_s} v_{ds} \right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{MR_r}{L_s L_r} i_{qr} - \frac{M}{L_s} \cdot w_r i_{dr} - \frac{R_s}{L_s} i_{qs} - w_r i_{ds} - \sigma w_{sl} i_{ds} - \frac{M}{L_s L_r} V_{qr} + \frac{1}{L_s} v_{qs} \right) \\ \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left( \sigma w_s i_{qr} - w_r i_{qr} - \frac{R_r}{L_r} i_{dr} - \frac{M}{L_r} \cdot w_r i_{qs} + \frac{MR_s}{L_s L_r} i_{ds} + \frac{1}{L_r} v_{dr} - \frac{M}{L_s L_r} V_{ds} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left( -\frac{R_r}{L_r} i_{qr} - \sigma w_s i_{dr} + w_r i_{dr} + \frac{MR_s}{L_s L_r} i_{qs} + \frac{M}{L_r} \cdot w_r i_{ds} + \frac{1}{L_r} v_{qr} - \frac{M}{L_s L_r} V_{qs} \right) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$w_{sl} = w_s - w_r$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

### II.6.3.6 Bilan de puissance dans la GADA :

Les équations des puissances active et reactive au côté stator ce donnée par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Les équations des puissances active et reactive au côté rotor ce donnée par :

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

## II.7. Modélisation de l'onduleur :

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [MAC], ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI [48], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandés par la modulation de largeur d'impulsions. Pour simplifier l'étude supposons que [58] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c.-à-d.

$$K_{ci} (c \in [1,2,3], i \in [1,2])$$

- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure (II.14).

On a, donc :

$I_{Kci} = 0, V_{Kci} \neq 0$  Interrupteur ouvert,

$I_{Kci} \neq 0, V_{Kci} = 0$  Interrupteur fermé

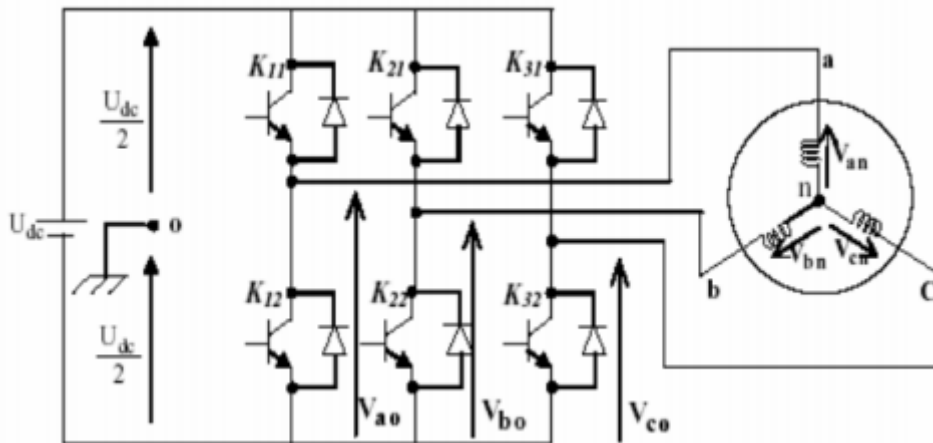


Figure.II.14:Schéma d'un onduleur de tension [59]

Les tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  sont obtenues à partir de ces relations:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} + V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} + V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (II.40)$$

$V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (II.41)$$

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

$V_{no}$  est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système  $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$  équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.42)$$

La substitution de (II.40) dans (II.41) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (II.43)$$

En remplaçant (II.43) dans (II.41), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{DC}] \quad (\text{II.45})$$

Tel que :

$$\begin{aligned} [V_{AC}] &= [V_{an} V_{bn} V_{cn}]^T \\ [V_{DC}] &= [V_{ao} V_{bo} V_{co}]^T \\ [V_{DC}] &= U_{dc} [S_1 S_2 S_3]^T \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale :  $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1, 2, 3\}$

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} +\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & +\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & +\frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

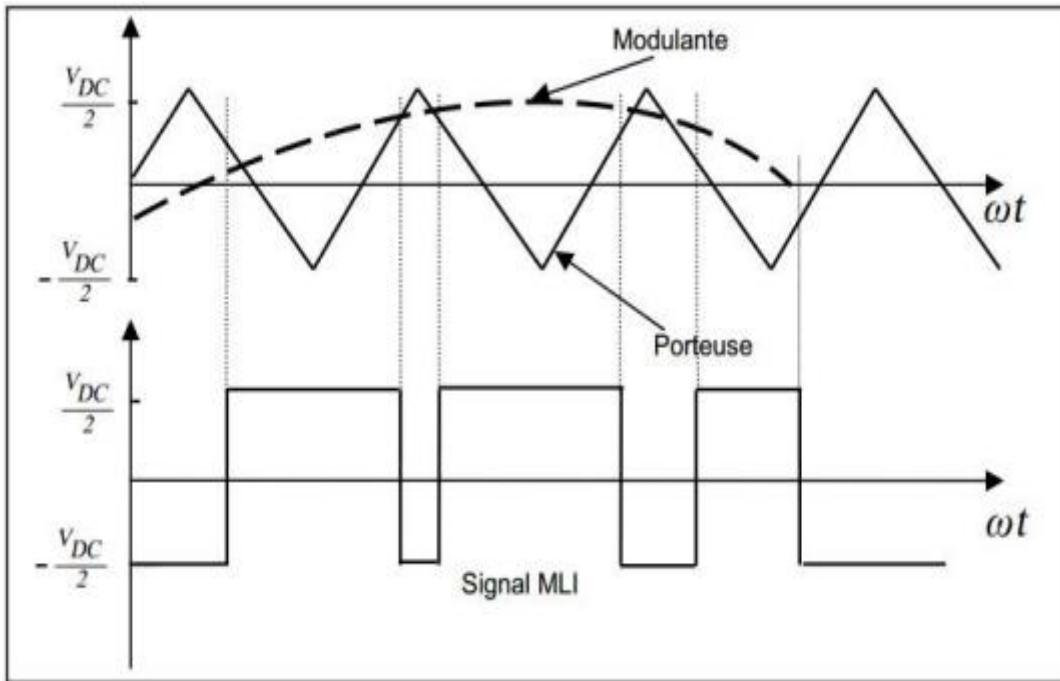
Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion)

## II.8. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation).

La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.



**Figure II.15:**Principe de commande en MLI sinus-triangular. [60]

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (Figure II.15) :

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

## II.9. Simulation de la GADA :

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park. (Plan  $(d, q)$ ) lié aux champs tournant.

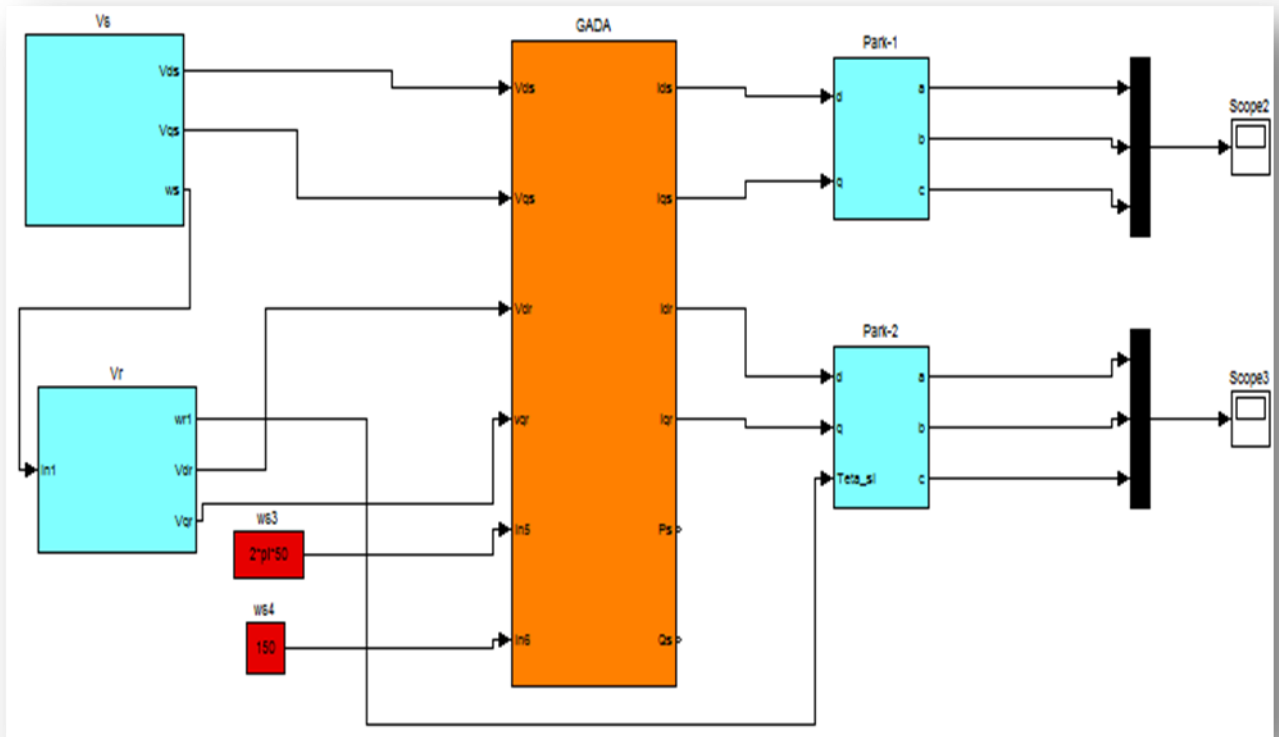


Figure II.16:Schéma bloc de la GADA

### II.9.1 Les résultats de Simulation de la GADA (avec une vitesse fixe 150rd/s) :

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 2 KW. Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 150 rad/sec, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

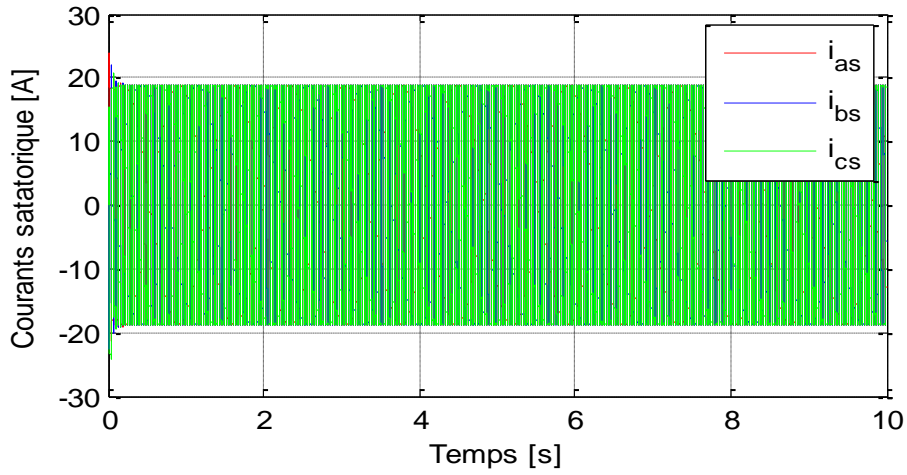


Figure II.17: Courant statorique

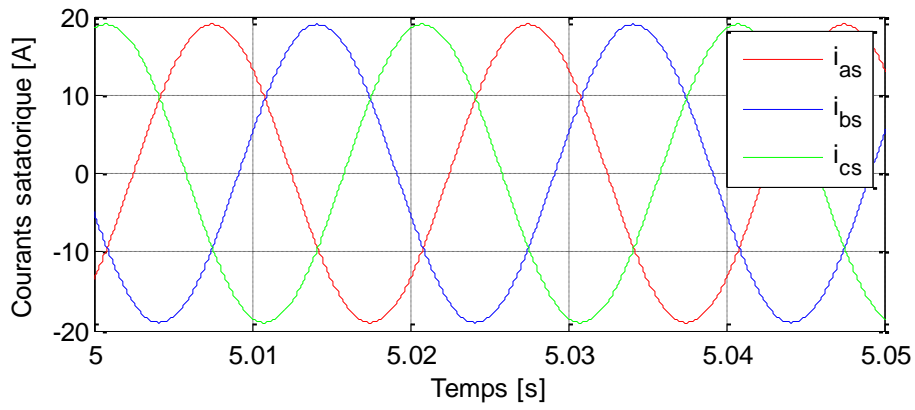


Figure II.18: Courant statorique (zoom)

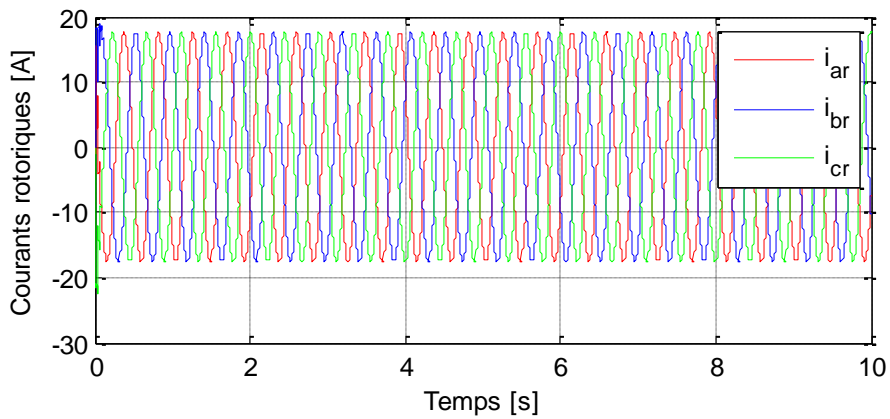


Figure II.19: Courant rotorique

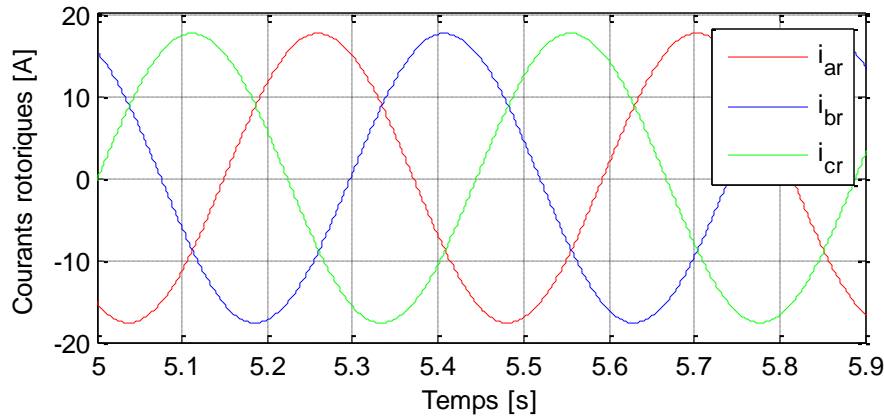


Figure II.20: Courant rotorique (zoom)

### II.9.2.1 Interprétation des résultats de simulation

A partir de ces résultats de simulation des différentes allures de la génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une vitesse fixe de 150 tr/mn, nous remarquons que les courants statoriques et rotoriques sont stable et prennent la forme sinusoïdale

## II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les parties essentielles de système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié par la suite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

La troisième partie dans ce chapitre représente la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Les résultats de simulation montrent que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement générateur. Ainsi que l'étude de fonctionnement de la MADA faite apparaître la stabilité pour le cas de fonctionnement générateur.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

**Chapitre III :**  
**La commande vectorielle**  
**de la GADA**



### III.1. Introduction :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de BLONDEL sur la théorie de la réaction des deux axes [61]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [62].

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère  $(d - q)$  tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. [63].

Plusieurs méthodes de commande des "MADA" sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée [64].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur. Mise en équation de la "MADA" nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur « Proportionnel – Intégral » est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la "MADA" en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

### III.2. Le principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit).

Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [65]. Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator, la puissance active dépend uniquement du courant rotorique  $I_{qr}$ , et la puissance réactive dépend uniquement du courant  $I_{dr}$ .

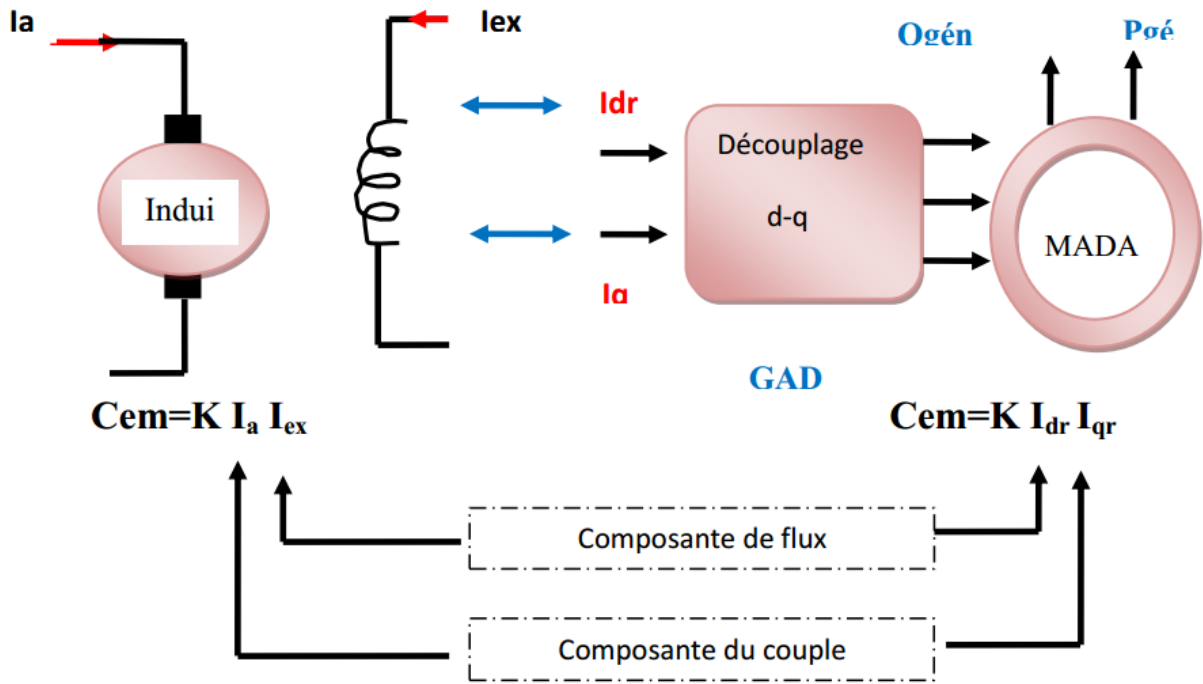


Figure.III.1 :Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA

**III .3. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique :**

Dans ce qui suit nous allons supposer que l’axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n’est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [66]. Rappelant le système d’équations différentielles (II.30), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

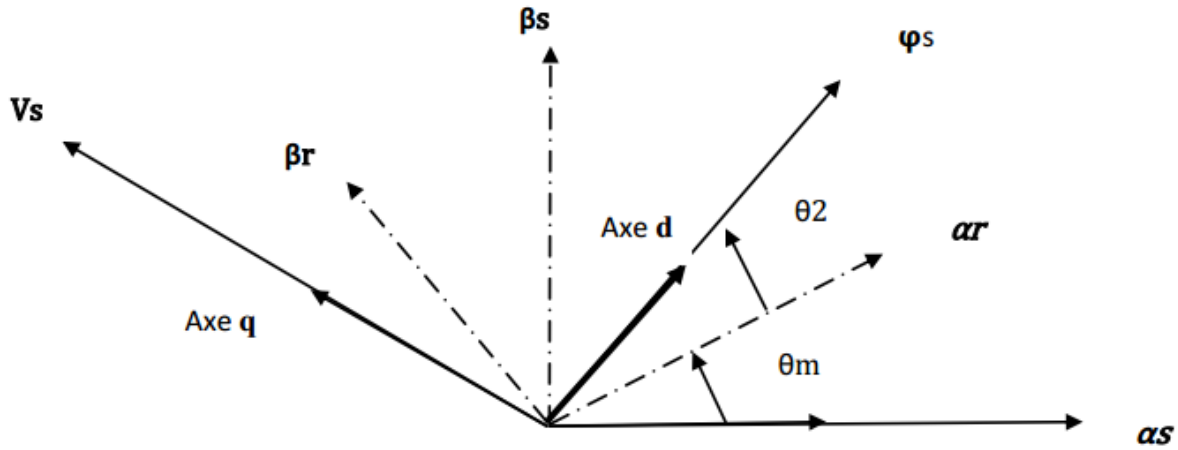
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \tag{III.1}$$

**III 3.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :**

En choisissant un référentiel diphasé (x,y) lié au champs tournant, et en alignant le vecteur flux statorique  $\varphi_s$  .

Avec l’axe 'd' (afin de réaliser un découplage), nous pouvons écrire : [67]

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= \varphi_s \\ \varphi_{qs} &= 0 \end{aligned} \tag{III.2}$$



**Figure. III.2 :**Orientation de l'axe d sur le flux statorique. [67]

A travers les équations (III.1) et (III.2) on peut simplifier par le système d'équations comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Si on néglige la résistance  $s$ , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [68], [69] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \Phi_{ds} = V_s \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

### III.3.2. Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques :

A partir de l'équation (III.5), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique :

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{M}{L_s} I_{dr} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} &= \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

### III.3.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère biphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s &= V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

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

$$\begin{aligned} P_s &= V_s I_{sq} \\ Q_s &= V_s I_{sd} \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadratures par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s &= \frac{V_s^2}{W_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Il ressort de l'expression que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe  $q$  et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe  $d$  à une constante près  $\frac{V_s^2}{W_s L_s}$  imposée par le réseau [70].

### III.3.4. Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques :

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.5) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.6) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.1). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rd} - g W_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rq} - g W_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [71]:

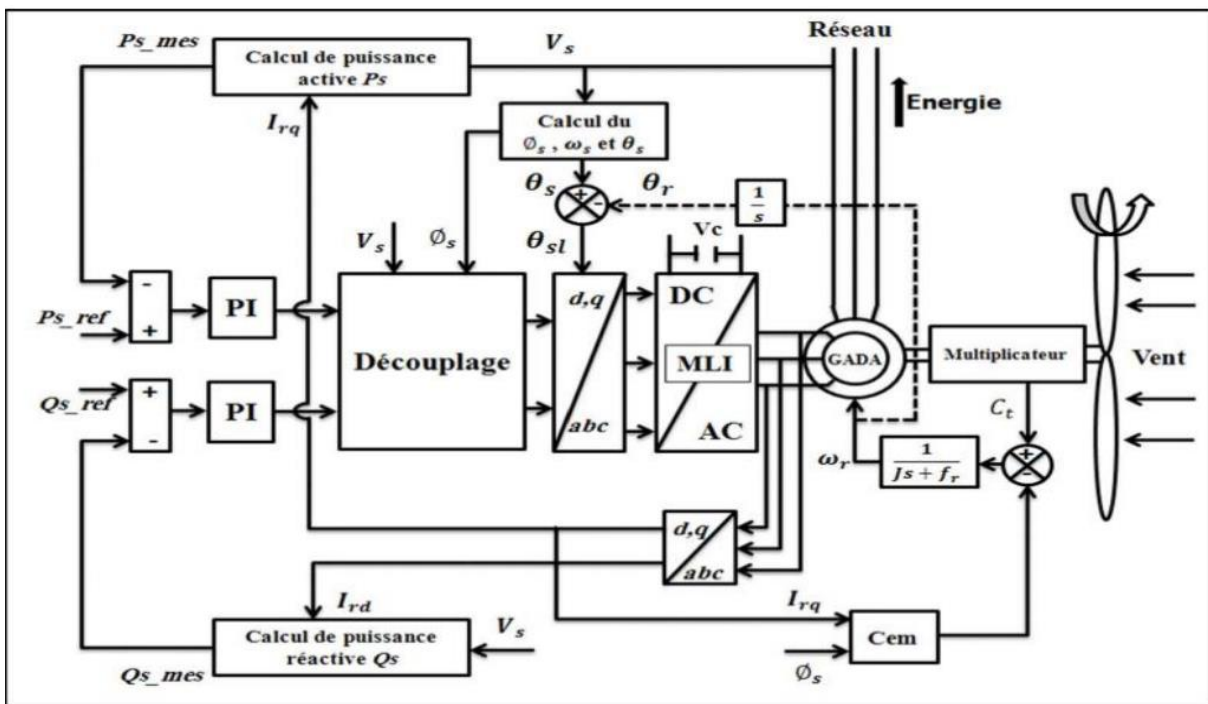
$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} - g W_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} - g W_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme  $g \frac{M V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [72]

**III.4. La commande vectorielle directe :**

Cette méthode de commande a été proposée par BLASCHKE, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué. En effet le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine).



**Figure.III.3:**Schéma synoptique de la commande vectorielle directe de la GADA. [73]

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement. [74]

### III.4.1. Commande directe en puissance active et réactive de la GADA :

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{rq}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{rd}$  (Figure III.4).

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure III.3 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation.

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ . Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la GAD A, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure III.3 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui nous donne le schéma simplifié représenté dans la figure III.5. [71]

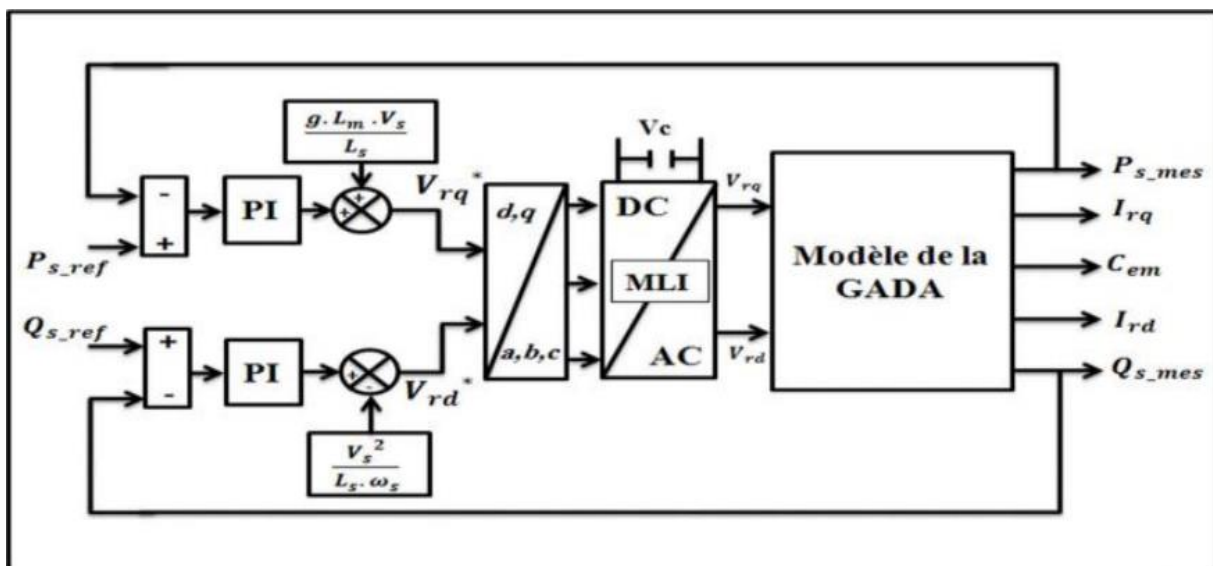


Figure.III.4 :Schéma bloc de commande directe des puissances actives et réactives. [73]

### III.5. Commande indirecte :

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position, l'idée est proposée par Hasse. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire [75]. Cette méthode a été favorisée par le développement des

microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [76]

**III.5.1. Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA :**

**II.5.1.1. Commande en boucle fermée :**

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la GADA [69].

Cette commande ne consiste pas à réguler directement les puissances comme la commande précédente, mais elle est basée sur la régulation indirecte des courants rotoriques mesurées qui seront asservis avec les courants de références déjà déterminés par les puissances statoriques de références imposés à la machine.

$$\begin{aligned}
 I_{rq}^{ref} &= -\frac{L_s}{MV_s} \cdot P_s^{ref} \\
 I_{rd}^{ref} &= \frac{V_s}{Mw_s} - \frac{L_s}{MV_s} \cdot Q_s^{ref}
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

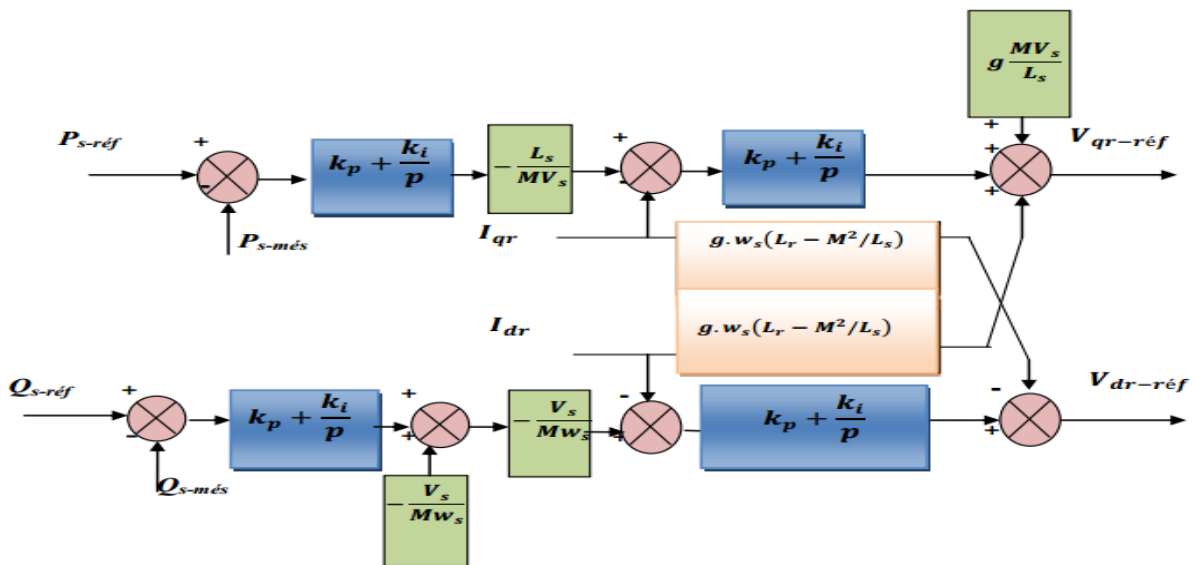


Figure. III.5 :Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.

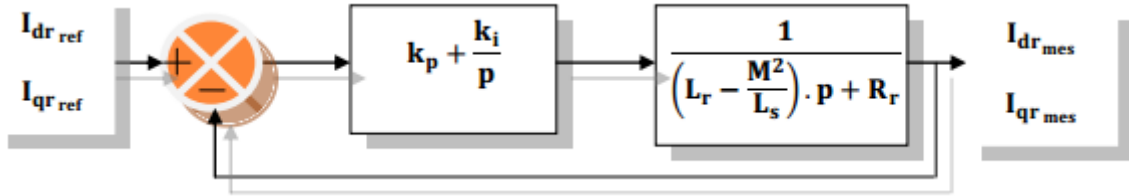
**III.6. Type des régulateurs utilisés :**

Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la Commande en puissance active et réactive de la GADA. Le régulateur Proportionnel

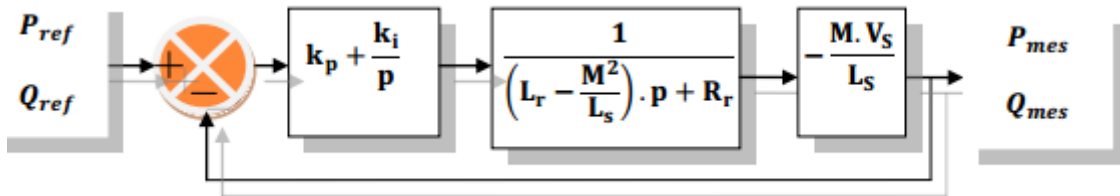
Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle [73].

La fonction de transfert du régulateur (PI) est de la forme :  $K_p + \frac{K_i}{p}$

**III.6.1.Système régulé par un régulateur PI :**



**a) Schéma de la régulation des courants rotoriques**



**b) Schéma de la régulation des puissances statoriques**

**Figure III.6:Schéma de la régulation**

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s’écrit alors [69]:

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p} \frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{\frac{P}{K_p} (P + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})})} \tag{III.13}$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs.

Les zéros de la fonction de transfert seront compensés .Ainsi nous aurons l’égalité suivante :

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

Il est à noter que la compensation des pôles n’a d’intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{\frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \tag{III.15}$$



En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau_r} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad (\text{III.16})$$

Le temps de réponse  $\tau_r$  sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables.

Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine Comme suit :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} ; K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \quad (\text{III.17})$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative Permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être Rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre [77].

### III.7. Simulation de la commande vectorielle (à vitesse fixe) :

A l'aide de logiciel MATLAB, Les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la génératrices asynchrone à double alimentation, avec application d'une puissance active , $P_s = 2KW$ , et une puissance réactive  $Q_s = 0$ .

Afin d'analyser les performances de la stratégie de commande vectorielle directe et indirecte, nous allons effectuer un essai à vitesse fixe.

#### ➤ Essai à vitesse fixe :

Afin de tester la poursuite de la GADA, ce premier essai consiste à appliquer aux entrées de référence des échelons de puissance active et réactive d'amplitudes variables, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 150 rad/s.

❖ La commande directe :

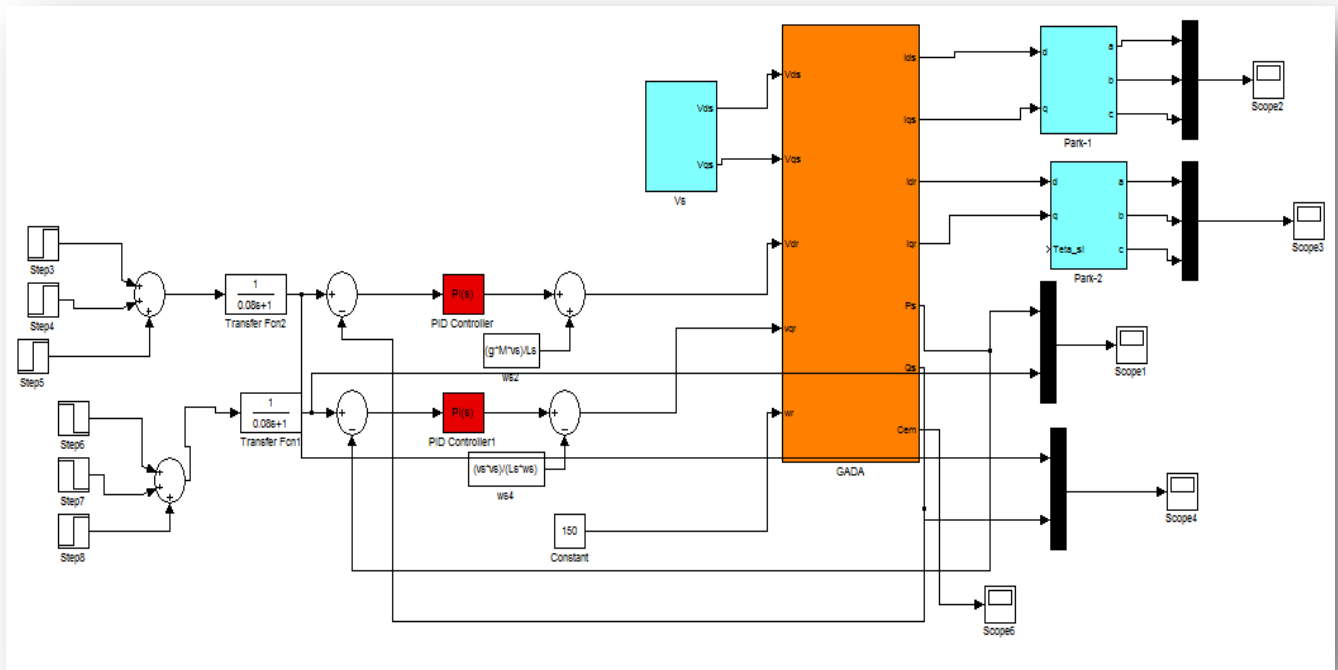


Figure III.7: Schéma bloc de la commande vectorielle direct de la GADA (vitesse fixe).

❖ La commande indirecte :

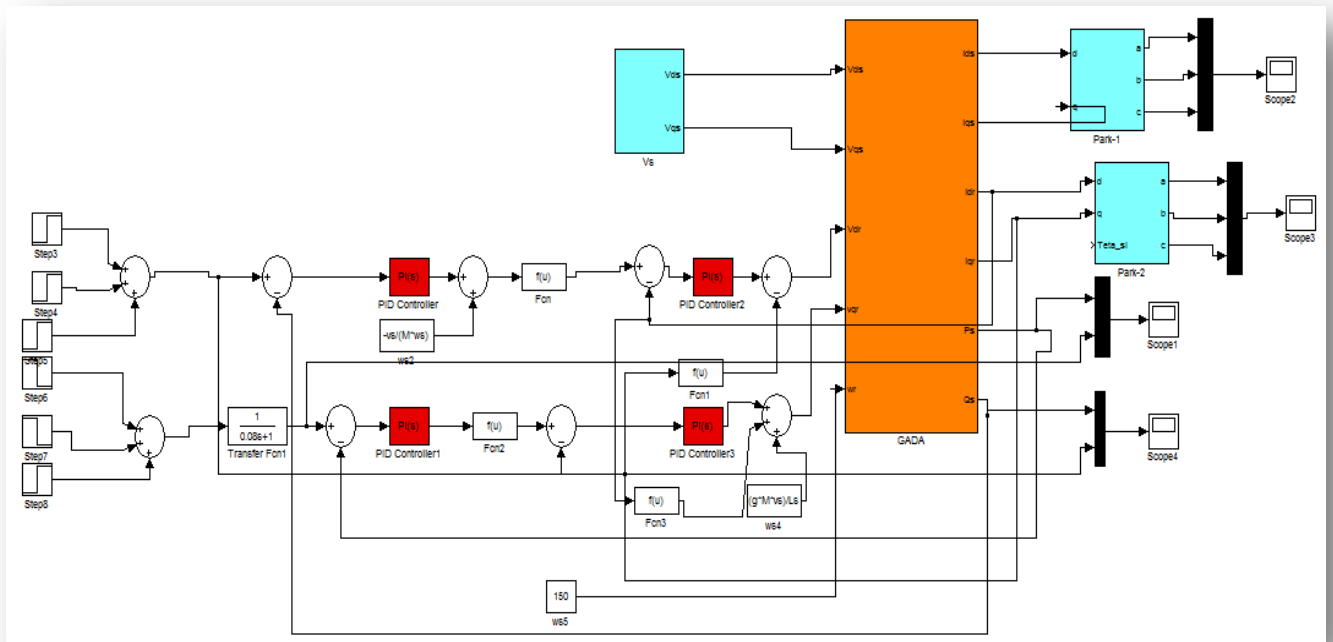


Figure III.8: Schéma bloc de la commande vectorielle indirect de la GADA (vitesse fixe).

III.7.1. Les résultats de simulation de la commande directe et indirecte (vitesse fixe):

❖ Commande directe :

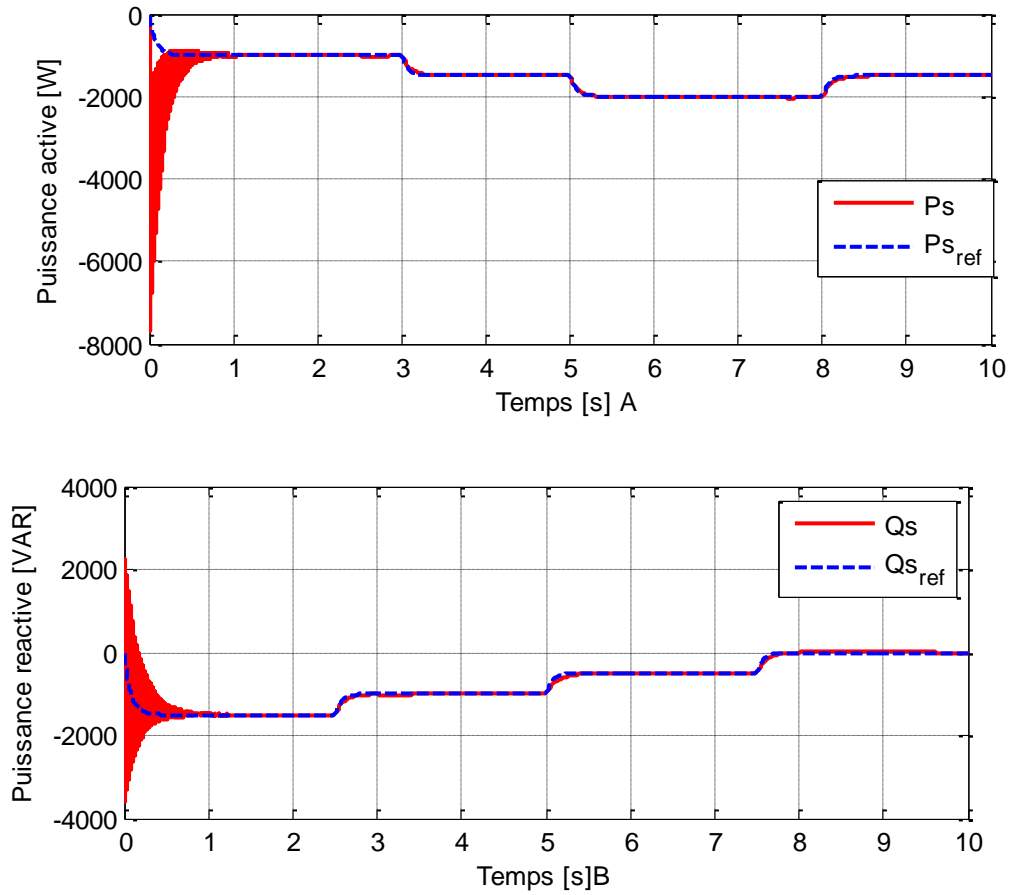
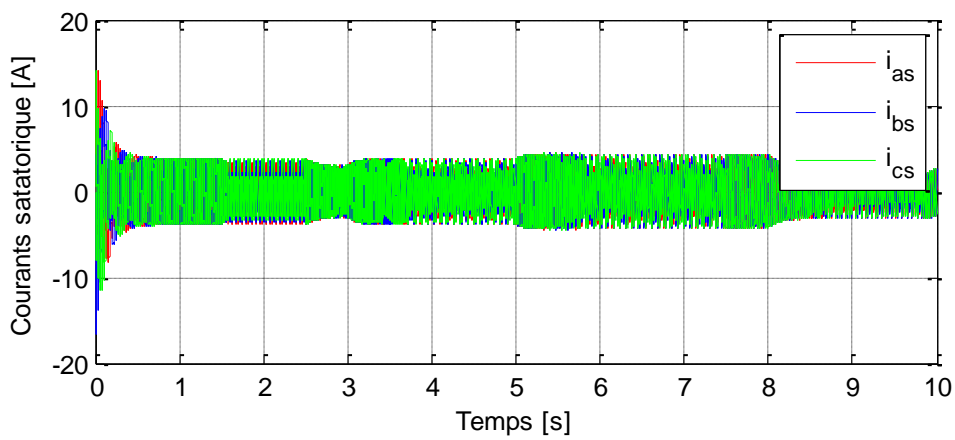


Figure III.9: Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la commande directe ( $P_{s\_ref}$  variable, ( $Q_{s\_ref}$  nulle).



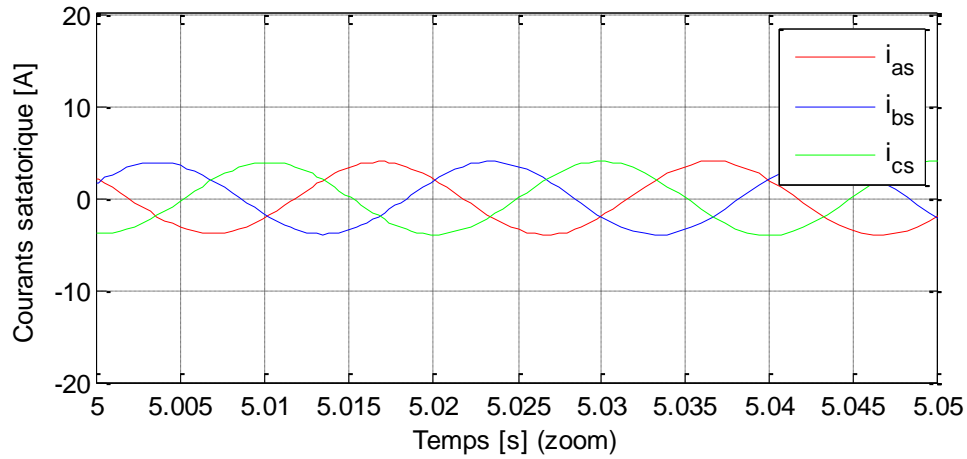


Figure III.10: Courant statorique

❖ Commande indirecte :

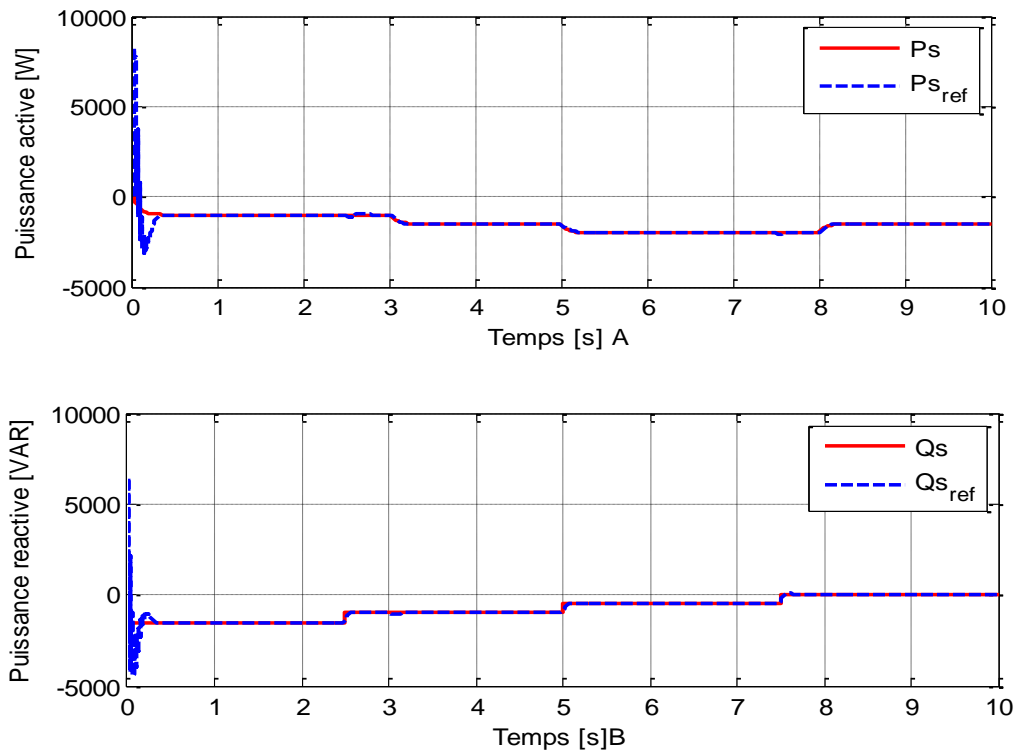
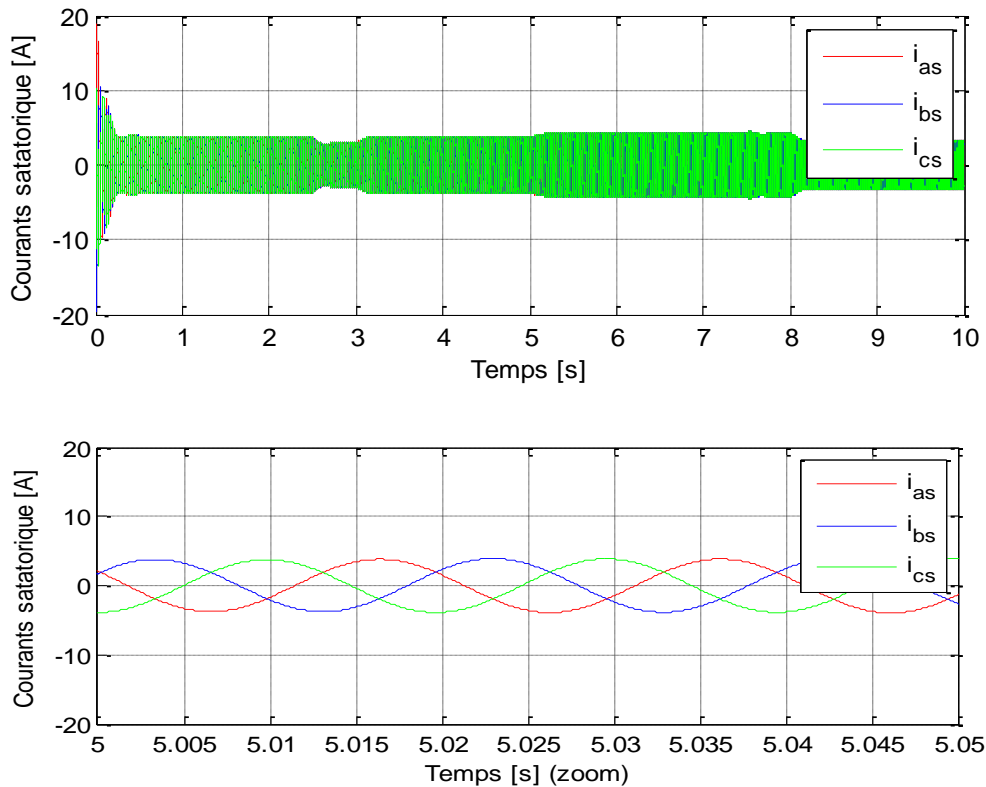


Figure III.11: Suivi de consigne de puissance active et réactive statorique avec la Commande indirecte ( $P_{s-ref}$  variable,  $Q_{s-ref}$  nulle)



**Figure III.12:** Courant statorique

### III.7.2. Interprétation des résultats :

Pour évaluer les performances de la commande vectorielle directe et indirecte du GADA, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes:

- Application d'un échelon de puissance active statorique référence égale à -1000,-1500,-2000 et -1500 w aux instants  $t=0s$ ,  $t=2.5s$ ,  $t=5s$  et  $t=7.5s$  respectivement.
- Application d'un échelon de puissance réactive statorique référence égale à -1500,-1000,-500 et 0 w aux instants  $t=0s$ ,  $t=2.5s$ ,  $t=5s$  et  $t=7.5s$  respectivement.

Les figures montrent une comparaison de réglage la puissance active et réactivé statorique par la méthode vectorielle directe et indirecte. Observant les résultats de la simulation : les figures III.9 et III.11 montrent que le réglage par un régulateur PI dans les commandes vectorielles directe et indirecte donne des résultats satisfaisants : La puissance active et réactivé statorique suit la valeur de référence désirés précisément. Le courant est bien limité à sa valeur admissible (figures III.10 et III.12). On remarque que la réaction du régulateur PI de la commande indirecte dans le régime transitoire est plus performante que la commande directe (présence des oscillations)

**III.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons développé deux méthodes de la commande vectorielle en puissance de la GADA à savoir : la commande directe et la commande indirecte. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante.

En revanche, la méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

**Chapitre IV :**  
**La commande par mode**  
**glissant**

### IV.1. Introduction :

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de la recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commandes robustes. Ces techniques évoluent avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. Nous pouvons citer à titre d'exemple la commande floue, la commande adaptative, la commande par mode de glissement...etc. L'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants [78].

Le mode de glissement est un mode de fonctionnements particulier des systèmes à structure variable. La commande par mode de glissement est une méthode de réglage dans laquelle la structure est commutée de manière à ce que le vecteur d'état "x" suit une trajectoire  $S(x)=0$  dans l'espace d'état [79]. Cette technique de commande s'adapte aux variations des paramètres du procédé à commander. Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande par mode glissant à la génératrice asynchrone à double alimentation dans le but d'obtenir de bonnes performances même en présence des perturbations

### IV.2. Historique :

Une attention considérable a été concentrée sur la commande du système non linéaire à dynamique incertaine, souvent sujet aux perturbations et aux variations paramétriques. La théorie des systèmes à structure variable et les modes glissements associés a fait l'objet d'études détaillées au cours des trente dernières années [80]. Des contrôleurs à structure variable ont fait leur application dans la littérature soviétique (Emelyanov 1967, Utkin 1974), et ont été largement identifiés comme une approche potentielle à ce problème (Gao et Hung 1993).

Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par Decarlo et d'autre (1998), Hung et d'autre (1993), l'action de commande force la trajectoire de systèmes à intercepter l'espace d'état intitulé surface du glissement. Les trajectoires de système sont alors confondues avec la surface de glissement durant l'utilisation des commandes à une grande vitesse de commutation. L'avantage saillant de la commande à structure variable avec le mode glissant, est la robustesse contre des changements des paramètres ou des perturbations. Le phénomène "chattering" associé à la commande par mode glissant, présente un inconvénient majeur parce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable. Plusieurs méthodes pour réduire ce phénomène ont été proposées [81].

### IV.3. Théorie de la commande par mode glissement :

La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une "variété" ou "hyper surface" dite de



glissement dont le but est de forcer la dynamique du système de correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface.

Quand l'état est maintenu sur cette hyper surface, le système est dit en régime glissant .Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.[82]

### IV 3.1. Système à structure variable :

Un système à structure variable en anglais "saxon variable system VSS" est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure a une autre à tout instant. De plus, un tel system peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface .puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface .Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement produit est appelle mouvement de glissement.

### IV.3.2. Objectif de la commande par mode glissant :

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

- Synthétiser une surface  $S(x, t)$ , telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Déterminer une loi de commande (commutation)  $U(x, t)$  qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

### IV .4.Notion de base :

Avant d'entamer les méthodes utilisées dans la synthèse de contrôle par mode de glissement, nous allons expliquer quelques notions de bases du régime glissant [83].

#### IV.4.1.Conception de la commande par mode de glissement :

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

- 1- Le choix de la surface ;
- 2- L'établissement des conditions d'existence de la convergence ;
- 3- La détermination de la loi de commande.

**IV.4.2. Bases mathématiques de la commande à structure variable :**

La modélisation mathématique de la commande à structure variable conduit à des équations différentielles de la forme :

$$X(t) = f(x, t) + B(x, t)V \tag{IV.1}$$

Avec :

$x = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$  : Vecteur d'état,

$f$  : vecteur en fonctions de  $x$  et  $t$

$B$  : matrice de fonctions de  $x$  et  $t$  (une matrice  $m \times n$ ),

$V$  : un vecteur commande de dimension  $m$ , dont chaque composante subit une discontinuité sur une surface  $S_i(x) = 0$

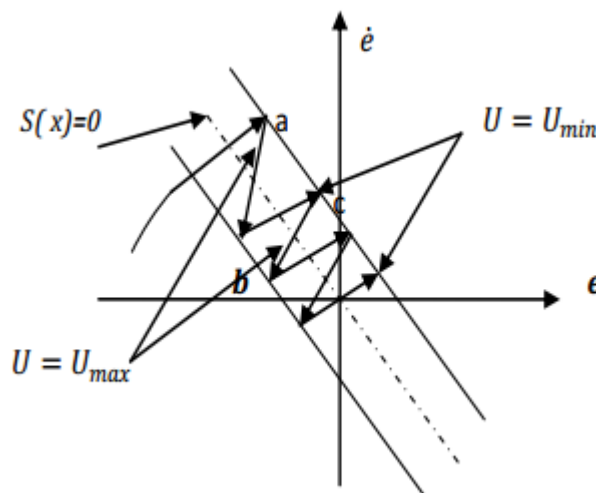
Avec :

$$\begin{aligned} V_i(x) &= V_i^+(x) && \text{si } S_i > 0 \\ V_i(x) &= V_i^-(x) && \text{si } S_i < 0 \end{aligned} \quad i = 1, 2 \dots \dots m \tag{IV.2}$$

Dans le cas multi variables le régime glissant s'effectue sur une variété  $S(x)=0$  de dimension  $(n \times m)$ .

**IV.4.3. Condition d'existence du mode glissant :**

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre  $u_{max}$  et  $u_{min}$ . Figure (IV.1), lorsque le système réglé est considéré du deuxième ordre, les grandeurs d'état sont  $X_{s1}$  et  $X_{s2}$ .



**Figure IV.1:** Existence du mode de glissement

Les commutations ont lieu sur les droites décalées parallèlement de  $\pm \Delta S_h$ . Une trajectoire avec  $u = u_{max}$  touche au point (a) le seuil de basculement inférieur. Si avec  $u = u_{min}$ , la

trajectoire est orientée vers l'intérieur de la zone montrée par la figure (IV .1). Elle touche au point (b) le seuil de basculement ou a lieu une commutation sur  $u = u_{\min}$ . Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'intérieur, elle touche le point (c) le seuil de basculement inférieur et ainsi de suite. Il y a donc un mouvement continu à l'intérieure de cette zone.

Ce mouvement s'approche du régime stationnaire dans une certaine zone ou des commutations continues existent. La fréquence de commutation est finie.

On suppose dans le cas idéal que cette zone est infiniment petite. La loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de  $S(x_s)$ . Par conséquent, le vecteur d'état  $x_s$  suit une trajectoire qui respecte cette condition. La fréquence de commutation est donc infiniment élevée [84].

#### IV.4.4. Choix de la surface de glissement :

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (\text{IV.3})$$

Où  $[X] \in R^n$  est le vecteur d'état, et  $[U] \in R^m$  le vecteur de commande, avec  $n > m$

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $[U]$ . Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état  $X$  vers sa valeur de référence  $X^*$ , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$s(x) = \left( \frac{d}{dt} - \lambda \right)^{r-1} \cdot e(x) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$\lambda$ : Gain positif.

$e(x) = X - X^*$ : Écart de la variable à réguler.

$r$  : Degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande. Tel que :  $\frac{ds}{dt} \neq 0$  assurant la contrôlabilité.

$$\text{Pour } r = 1 \quad s(x) = e(x)$$

$$\text{Pour } r = 2 \quad s(x) = \lambda_x \cdot e(x) + \dot{e}(x)$$

$$\text{Pour } r = 3 \quad s(x) = \lambda_x^2 \cdot e(x) + 2 * \lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$$

$s(x)$  : est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse  $e(x)$  tend vers zéro pour un choix correct du gain  $\lambda$  et c'est l'objectif de la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ . Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence [82][85][86].

### IV.5. La fonction de Lyapunov :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction ( $\dot{V}(x) < 0$ ). Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{IV.5})$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x).S(x) \quad (\text{IV.6})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (\text{IV.7})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par  $S^2(x)$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal [87].

### IV.6. Phénomène de chattering :

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées. Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence. Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction « sign » par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences. On donne ci-dessous des exemples de ces fonctions [88].

#### IV.6.1 La fonction SAT :

$$\text{Sat}(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s > u \\ -1 & \text{si } s < -u \\ \frac{s}{u} & \text{si } |s| < u \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

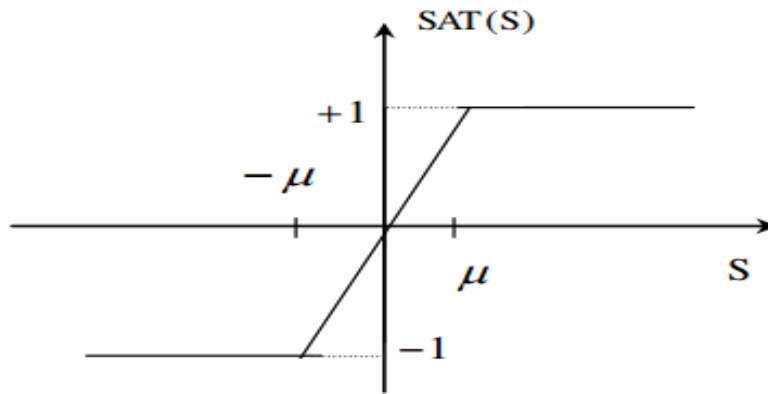


Figure IV.2: Fonction «SAT »

**IV.6. 2. La fonction adoucie (Smooth function):**

On peut aussi remplacer la fonction « sign » par une fonction de adoucie soit :

$$\text{Smooth}(s) = \frac{s}{|s|+u}$$

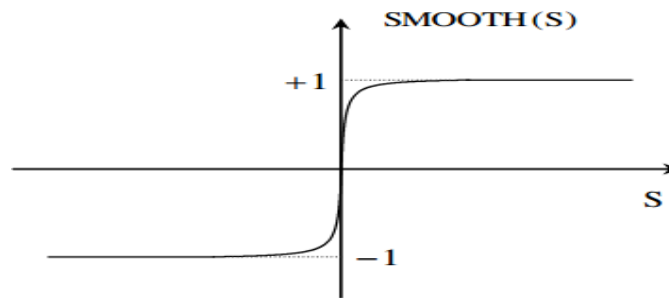


Figure IV. 3: Fonction « SMOOTH »

**IV.7.Expression analytique de la commande :**

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.1).

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t).u(t) \tag{IV.9}$$

Le vecteur u est composé de deux grandeurs :  $u_{eq}$  et  $u_N$  soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \tag{IV.10}$$

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t).u_{eq}(t)\} + \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x, t).u_N\} \tag{IV.11}$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro) .Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq} = \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x, t)\}^{-1} \left\{ \frac{\partial s}{\partial t} f(x, t) \right\} \right\} u_N = 0 \quad (\text{IV.12})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme  $u_{eq}$  par sa valeur (IV.12) dans l'équation (IV.11) Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

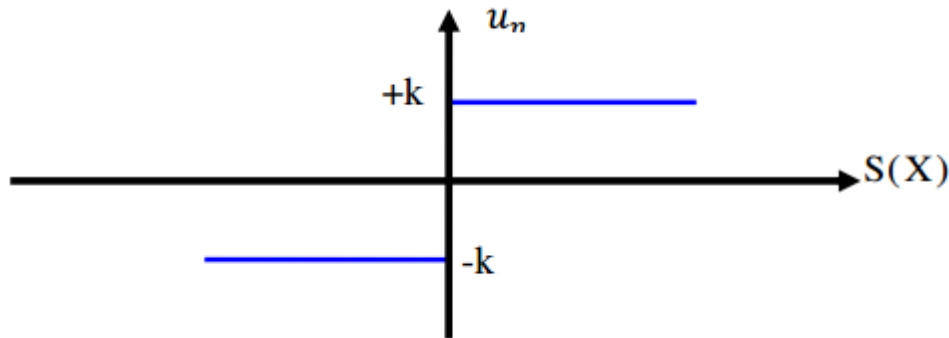
$$\dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x, t) \cdot u_N\} \quad (\text{IV.13})$$

Le problème revient à trouver  $u_N$  tel quel :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x, t) \cdot u_N\} < 0 \quad (\text{IV.14})$$

La solution la plus simple est de choisir  $u_N$  sous la forme de relais (Figure IV. 4) .Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = -K \text{sign}(s(x)) \quad (\text{IV.15})$$



**Figure IV.4 :** Représentation de la fonction « Sign ».

En remplaçant l'expression (IV.15) dans (IV.14) on obtient :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x, t) K |s(x)| < 0 \quad (\text{IV.16})$$

Où le facteur  $\frac{\partial s}{\partial x} g(x, t)$  est toujours négatif pour la classe des systèmes que nous considérons. Le gain  $K$  est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.16). Le choix de ce gain est très influé sur la commande car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande .Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande.

#### **IV.8. Commande non-linéaire par mode glissant :**

Ce travail présente une stratégie de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire robuste aux incertitudes du modèle. L'objectif est d'appliquer cette

commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques

#### IV.8.1. Modèle de la GADA :

Le modèle utilisé est le modèle a flux statorique orienté trouvé dans le chapitre (II) dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator et qui sera qualifié de modèle (d, q). Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne. (Avec  $\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0$ )

Les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (IV.17)$$

➤ **Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :**

$$\begin{cases} P_s^{ref} = \frac{-MV_s}{L_s} I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{MV_s}{L_s} I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (IV.18)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = \frac{-L_s}{MV_s} P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{MV_s} Q_s^{ref} \end{cases} \quad (IV.19)$$

➤ **Relations de la dérivée de courants rotoriques :**

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r I_{rd} + g\omega_s L_r \sigma I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r I_{rq} - g\omega_s L_r \sigma I_{rd} - g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (IV.20)$$

#### IV.8.2. Loi de commande par mode glissant :

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à régler vers la surface, ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence du mode glissant. La commande doit commuter entre  $U_{max}$  et  $U_{min}$ , en fonction du signe de la surface de glissement. Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées « Chattering » apparaissent dans le mode de glissement [89].

Nous posons donc :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (IV.21)$$

$U_{eq}$  Correspond à la commande équivalente proposée par FILIPOV et UTKIN. Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par :  $\dot{S}(x) = 0$

Alors pour la valeur de la commande discontinue  $U_n$ :

$$U_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (IV.22)$$

Avec : K est un gain positif.

- Si K est très petit donc le temps de réponse sera très long.
- Si K est très grand donc il existe des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering).

### IV.8.3. Choix des surfaces de glissements :

#### ➤ Contrôle de la puissance active et réactive :

Afin de contrôler les puissances, active et réactive statoriques on choisit un degré relative  $r=1$ , l'expression de la surface a pour forme :

$$\begin{cases} S(P) = P_s^* - P_s \\ S(Q) = Q_s^* - Q_s \end{cases} \quad (IV.23)$$

Avec :

$P_s^*$  et  $Q_s^*$  sont successivement les consignes des puissances active et réactive.

La dérivée de la surface est :

$$\begin{cases} \dot{S}(P) = \dot{P}_s^* - \dot{P}_s \\ \dot{S}(Q) = \dot{Q}_s^* - \dot{Q}_s \end{cases} \quad (IV.24)$$

On remplace les dérivées de la puissance active et réactive par leurs expressions dans (IV.24), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{S}(P) = \dot{P}_s^* + \frac{3}{2} V_s \frac{M}{L_s} (f_2 + \frac{V_{rq}}{\sigma L_r}) \\ \dot{S}(Q) = \dot{Q}_s^* + \frac{3}{2} V_s \frac{M}{L_s} (f_1 + \frac{V_{rd}}{\sigma L_r}) \end{cases} \quad (IV.25)$$



Avec :

$$\begin{cases} f_1(x) = -\frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rd} + g w_s i_{rq} \\ f_2(x) = -g w_s i_{rd} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rq} - \frac{g M V_s}{\sigma L_s L_r} \end{cases} \quad (IV.26)$$

D'après la théorie du mode glissant, nous remplaçons respectivement  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  par  $V_{rd}^n + V_{rd}^{eq}$  et  $V_{rq}^n + V_{rq}^{eq}$  dans les équations (IV.25) :

$$\begin{cases} \dot{S}(P) = \dot{P}_s^* + \frac{3}{2} V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (\sigma L_r f_2 + V_{rq}^{eq} + V_{rq}^n) \\ \dot{S}(Q) = \dot{Q}_s^* + \frac{3}{2} V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (\sigma L_r f_1 + V_{rd}^{eq} + V_{rd}^n) \end{cases} \quad (IV.27)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$\begin{cases} S(P) = 0, \dot{S}(P) = 0, V_{rq}^n = 0 \\ S(Q) = 0, \dot{S}(Q) = 0, V_{rd}^n = 0 \end{cases} \quad (IV.28)$$

On tire de l'équation (28) les grandeurs des commandes équivalentes  $V_{rq}^{eq}$  et  $V_{rd}^{eq}$  :

$$\begin{cases} V_{rq}^{eq} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{M V_s} P_s^* - \sigma L_r f_2 \\ V_{rd}^{eq} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{M V_s} Q_s^* - \sigma L_r f_1 \end{cases} \quad (IV.29)$$

Par définition, les termes discontinus  $V_{rd}^n$  et  $V_{rq}^n$  sont donné par :

$$\begin{cases} V_{rq}^n = K_1 \text{sign}(S(P)) \\ V_{rd}^n = K_2 \text{sign}(S(Q)) \end{cases} \quad (IV.30)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, les paramètres  $K_1$  et  $K_2$  doivent être positifs. Afin d'atténuer tout dépassement possible des tensions des références  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$ , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$\begin{cases} V_{rq}^{lim} = V_{rq}^{max} \text{sat}(S(P)) \\ V_{rd}^{lim} = V_{rd}^{max} \text{sat}(S(Q)) \end{cases} \quad (IV.31)$$

La figure (IV.5) présente le schéma bloc de la commande des puissances statoriques active et réactive de la GADA par mode glissant basée sur des convertisseurs statiques à trois niveaux de tension à structure NPC.

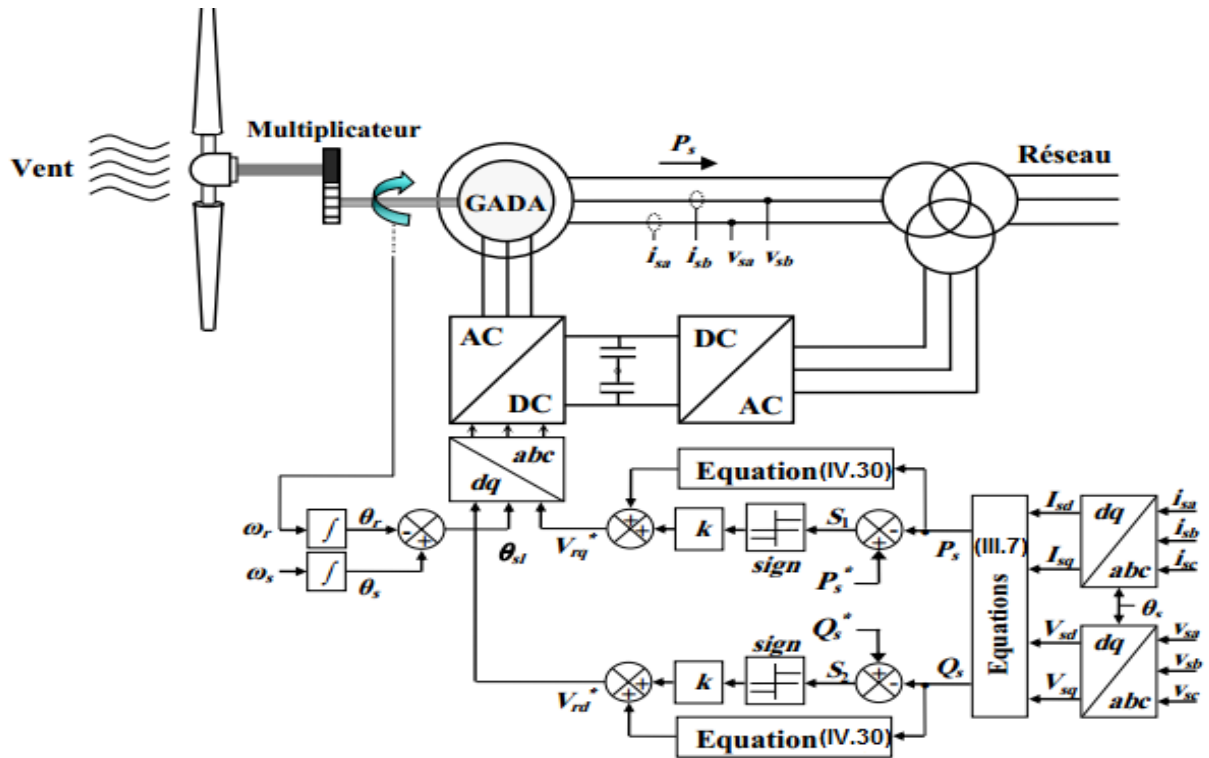


Figure IV.5 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant de La GADA

#### IV.9. Domaines d'application de la commande par mode glissant :

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydraulique ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables, ou complètement ouvertes ou fermées.

Les entraînements électriques pour les machines électriques, ou robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation).

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que, les processus chimique et métallurgiques, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions [87].

#### IV.10. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement :

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle présente le point fort d'une commande par mode de glissement. Contrairement à une loi de commande classique, les performances dynamiques sont maintenues quelles que soient les variations des paramètres et quelle que soit l'amplitude des perturbations appliquées au système.

De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, il permet de simplifier la complexité du système.

Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

- 1- Un phénomène de chattering où broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.
- 2- Le système est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable.

Parmi les solutions proposées à ces problèmes on peut citer la commande par mode glissant à bande limite qui consiste à remplacer la fonction de commutation dans la commande par une fonction de saturation (hystérésis, arc tangente,... etc.)[90]

Il est connu que les techniques exploitant les modes glissant, appliquées pour synthétiser une loi de commande, ont l'avantage de présenter une certaine robustesse par rapport aux dérives paramétriques du système à commander avec des réponses dynamiques rapides et précises [91], [92] , [93].

#### IV.11. simulation de la commande par mode glissant :

Dans cette partie, la commande par mode glissant de la GADA de 2KW a été testée par simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Avec test de robustesse vis-à-vis la variation de l'inductance mutuelle de la GADA à vitesse du vent fixe.

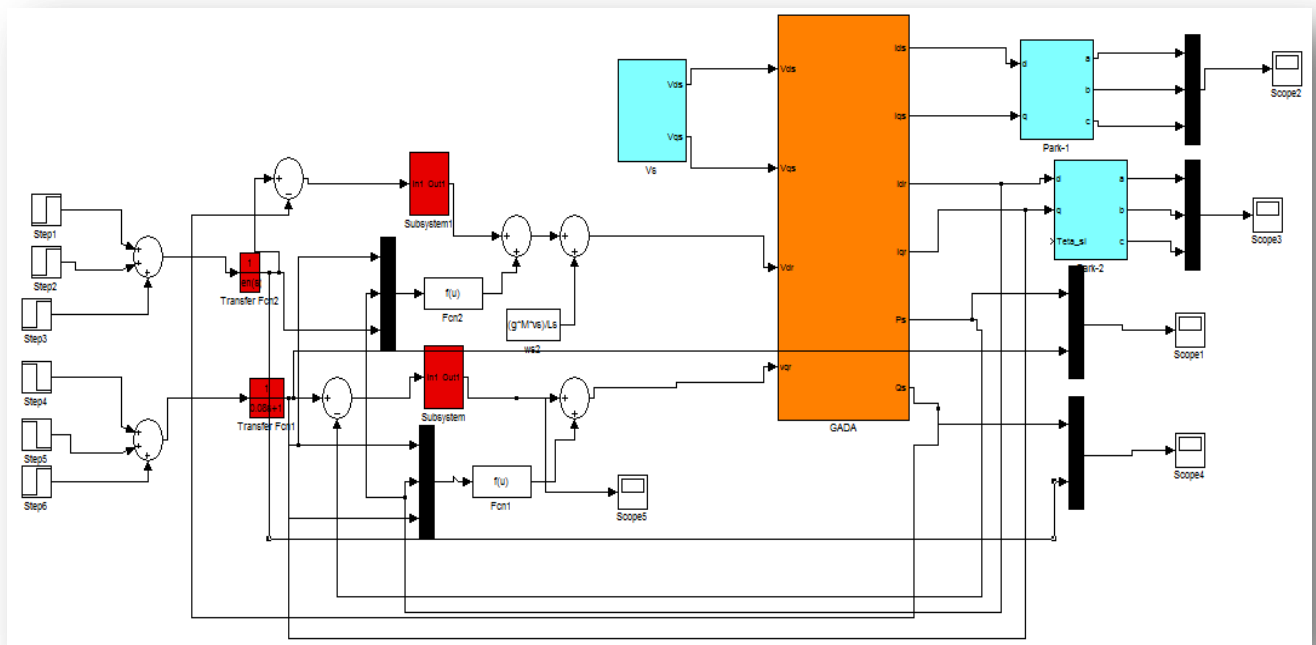


Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA.

### IV.11.1. Résultats de simulation :

Afin de tester la robustesse de la commande par mode glissant de la GADA, nous avons également étudié l'influence de la variation paramétrique sur les performances de la stratégie de contrôle proposée.

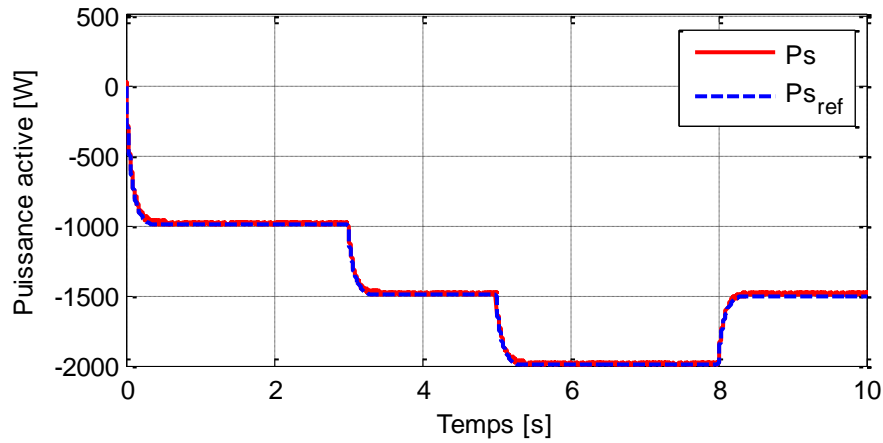


Figure IV.7: La puissance active

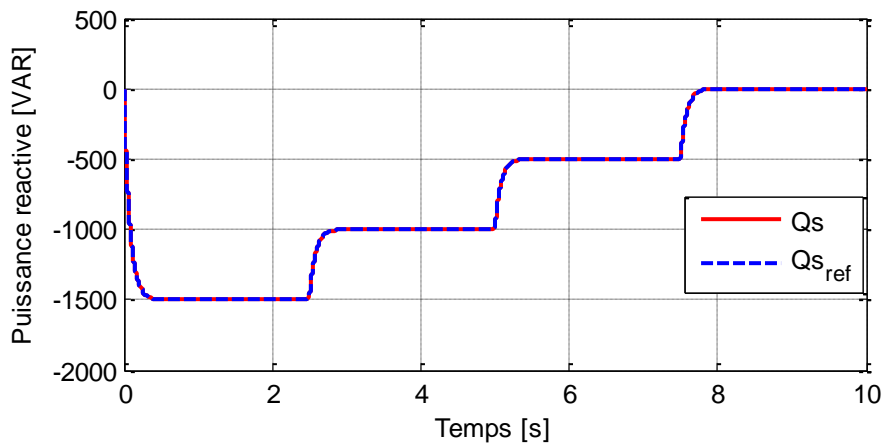


Figure IV.8 : La puissance réactive

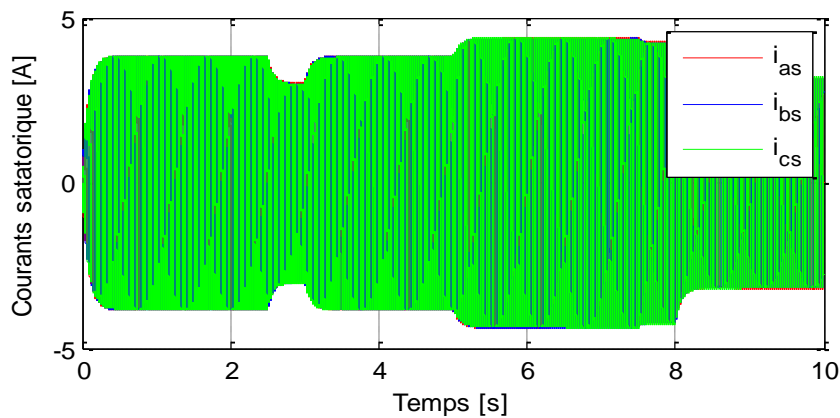


Figure IV.9 : Courant statorique

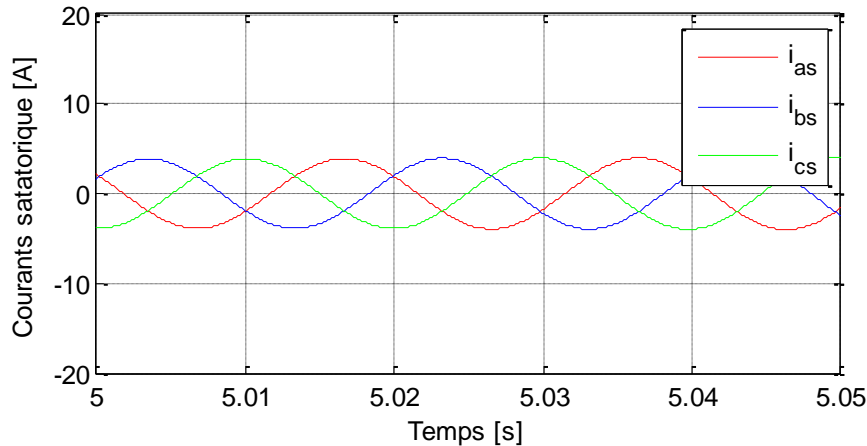


Figure IV.10 : Courant statorique (zoom)

#### IV.11.2. Interprétation des résultats :

Pour évaluer les performances de la commande par mode de glissement du GADA, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes:

- Application d'un échelon de puissance active statorique référence égale à -1000,-1500,-2000 et -1500 w aux instants  $t=0s$ ,  $t=2.5s$ ,  $t=5s$  et  $t=7.5s$  respectivement.
- Application d'un échelon de puissance réactive statorique référence égale à -1500,-1000,-500 et 0 w aux instants  $t=0s$ ,  $t=2.5s$ ,  $t=5s$  et  $t=7.5s$  respectivement.

Les figures IV.7 et IV.8 montrent le comportement du GADA lors du réglage de la puissance active et réactive statorique par la commande mode de glissement. L'analyse des courbes de simulation donne : un rejet de perturbation est parfait, pas de dépassement et un bon découplage a été maintenu. On constate que la commande par mode glissant présente une grande robustesse vis-à-vis à la variation des puissances actives et réactives statoriques référence, contrairement à la commande vectorielle, où cette dernière perde sa robustesse dans le régime transitoire.

#### IV.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'aspect théorique de la commande à structure variable et ces différentes structures. Nous avons d'abord fait un rappel sur le mode glissant. Ensuite on a défini les conceptions nécessaires de cette commande comme le choix convenable de surface de commutation et la loi de commande.

Ce travail présente une stratégie de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire robuste aux incertitudes du modèle. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les résultats de simulations

numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

Enfin, on peut conclure que le réglage par mode de glissement présente une meilleure robustesse que celle de la commande vectorielle, en plus des avantages inhérents à l'utilisateur de la GADA (robustesse, fiabilité), cette robustesse garantit une bonne insensibilité aux perturbations. On ne peut a priori affirmer que telle ou telle méthode est adéquate pour la régulation des puissances active et réactive avec les différents contrôles des grandeurs électriques qui accompagnent cette régulation.

# **Conclusion générale**

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et à la commande d'une chaîne de conversion éolienne par régulateur à mode glissant. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettant d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice éolienne jusqu'à sa mise en œuvre.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génération éolienne est présenté dans le premier lieu, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK. Une étude comparative entre les deux types de fonctionnement Moteur et Générateur a été effectuée dans le but de connaître le comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab/Simulink nous confirment la possibilité de la double alimentation de la machine par la stabilité de ces différentes grandeurs étudiées pour un fonctionnement générateur et moteur.

Ensuite, nous avons consacré la troisième partie à l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Nous avons introduit ensuite le contrôle vectoriel par orientation du flux statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau.

Ainsi, les algorithmes de réglage classiques, tel que les PI peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop strictes.

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'application de l'une des techniques de commande par mode de glissement. Les résultats obtenus ont montrés que cette technique de réglage à apporté des améliorations remarquables par rapport aux régulateurs classiques PI. En générale, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances statiques et dynamiques, un rejet quasi-total de la perturbation, comme ils accordent aussi une meilleure poursuite.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant

Contribuer à l'amélioration de l'ensemble chaîne de conversion éolienne –réseau de distribution parmi les perspectives futures suivantes :

- Développement d'un contrôle sans capteur mécanique.
- Etude de la GADA associée à d'autres stratégies de commande.
- La réalisation pratique de la stratégie de contrôle proposée.



# **Annexe**

## Annexe

## 1. Paramètres de la GADA

Paramètre	Valeur numérique
<b>Tension nominale statorique <math>V_s</math></b>	230 V
<b>Résistance statorique <math>R_s</math></b>	4.850 $\Omega$
<b>Résistance Rotorique <math>R_r</math></b>	3.8 $\Omega$
<b>Inductance statorique <math>L_s</math></b>	0.274 H
<b>Inductance rotorique <math>L_r</math></b>	0.274 H
<b>Inductance mutuelle M</b>	0.258 H
<b>Nombre de pair de pole P</b>	2
<b>Glissement g</b>	0.05
<b>Vitesse statorique <math>w_s</math></b>	314tr/min
<b>Coefficient de dispersion <math>\sigma</math></b>	0.1133

# Références

- [1] Beltran, B. (2010). contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- [2] (2012) بنور, & الشريف. Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [3] Kahal, H., Taleb, R., Boudjema, Z. E., & Bouyekni, A. (2018). Commande par mode glissant d'ordre supérieur d'une GASDE intégrée dans un système éolien à double rotor. *Revue des Energies Renouvelables*, 21(1), 111-119.
- [4] Stoyanov, L. (2011). Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- [5] Nesmat Abu-Tabak, «Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation», Thèse de Doctorat, Lyon, France, Novembre 2008.
- [6] SoltaneBelakehal, «Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées énergies renouvelables», Thèse de Doctorat, Univ. Constantine, Juin 2010.
- [7] KHADRAOUI ZAKARIA « Etude d'une centrale solaire thermique » MASTER GENIE MECANIQUE-UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA-2017
- [8] D.Tran, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne (passive) : Analyse de robustesse, validation expérimentale » , thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse le 27 septembre 2010.
- [9] Multon, B. (1999, January). L'énergie électrique: analyse des ressources et de la production. In *Journées de la section électrotechnique du club EEA 1999* (p. 22p).
- [10] N.A. Hidayatullah "Impacts of Distributed Generation on Smart Grid" Master of Engineering (Electrical Engineering), Victoria University February 2011
- [11] Didden, I., Destain, J., & Thonart, P. (2010). La production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Forêt. Nature*, (104), 43-49.
- [12] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [13] A. Harrouz, Harrouz Omar, "Application of Solar Energies to Reinforce the Flow Water of Foggara in the Adrar Region", *International Journal of Smart Grids*, ijSmartGrid, Vol.2, N. 4, March, p. 203-208, Dec. 2018. ISSN 2602-439X.
- [14] W. Lawrence Neuman, *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches*, 7ème édition, Pearson, 2011

- [15] Tolfree, David; Mark J. Jackson (2007). Commercializing Micro-Nanotechnology Products. CRC Press. p. 33. ISBN: 0849383153.
- [16] Arab, A. H. (2011). L'énergie Solaire Photovoltaïque'. Bulletin des Energies Renouvelables, CDER, Algérie, (19).
- [17] j. Martin, « Energies éoliennes » Technique de l'ingénieur, traité de Génie énergétique, pp, B85851-B858521
- [18] Ignatius, A. (1983). Énergie géothermique. CRDI explore, v. 12, no. 1.
- [19] Mohammed Tahar LATRECHE, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » , Mémoire de Magister; Université Ferhat Abbas de Sétif , UFAS –ALGERIE ; Pages (4 et 5), 24 /06 /2012.
- [20] S. Lazaar, « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa », Mémoire de Magister Université de Tlemcen, Tlemcen 2009.
- [21] Kelkoul Bahia, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire Magister API Option: Automatique université de Tlemcen 2011.
- [22] Tir Zoheir, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade », mémoire de magister Université de Sétif, 2010.
- [23] [http://eolienne.f4jr.org/histoire\\_energie\\_eolienne](http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne)
- [24]..... MOKHTAR, M., NASSER, T. M., & HAMID, B. LA METHODE DES ESSAIS DE PARTICULES ET CELLE DU LOUP GRIS POUR L'OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE D'ENERGIE RENOUVELABLE EN ALGERIE. Mars, 26(16.9), 26-8.
- [25] Aiche-Hamane, L., & Khellaf, A. (2003). Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie. Revue Energ. Ren.: ICPWE, 147-152
- [26] Helal, M. T., & Ghellai, N. (2003). Le gisement éolien à Béni-saf région côtière de l'ouest algérien. Rev. Energ. Ren.: ICPWE, 143, 146...
- [27] [http://ademe.typepad.fr/files/guide\\_ademe\\_energie\\_eolienne-1.pdf](http://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne-1.pdf)
- [28] AbdoulaybMamadie Sylla « Modélisation d'un émulateur éolien a base de machine asynchrone a double alimentation » l'université du Québec à Trois-Rivières ; pages (8 et 9) hiver 2013.
- [29] <http://www.networkhaiti.com/resource/energy/eolienne3.pdf>
- [30] Paul Gipe. Le grand livre de l'éolien : Editions Le Moniteur. Paris. France.

- [31] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [32] Moussa siddoabdoulaziz "étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de L'énergie éolienne", mémoire ingénieur école nationale polytechnique 2007.
- [33] T.J. Hammons, M. Willingham, K.N. Mak, M. Silva, M. Morozowski, B.K. Blyden, « Generation and Transmission Improvements in Developing Countries », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 760-765. Septembre 1999.
- [34] F. KENDOULI, "centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine. 2012.
- [35] S. AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 06/12/2004.
- [36] Y. BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014.
- [37] F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [38] N. AIT RAMDANE « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012
- [39] F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El- oued. 2013.
- [40] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [41] S. ARDJOUN, « Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbes, 2010.
- [42] A. CHAIBA, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle » mémoire de magister, Université de Batna, 2010
- [43] POITIERS .F « Etude et commande de génératrices synchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat de l'université NANTES 2000
- [44] A.TELLIA « Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT » Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2012.
- [45] F. MERRAHI. « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) ». Mémoire de Magister ENP 2007.

- [46] I. BOLDEA. « Variable speed generators ».Taylor & Francis 2006.
- [47] M. GARCÍA, M. PAZ COMECH. « Voltage dip generator for wind energy systems up to 5 MW ».Applied Energy, Volume 86, Issue 4, pp 565-574, Elsevier 2009.
- [48] F. IOV, A. D. HANSEN, P. SØRENSEN, F. BLAABJERG. « Wind turbine block set in matlab/Simulink, general overview and description of the models ».Institute of Energy Technology, Aalborg University. Denmark, March 2004.
- [49] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005
- [50] BEN AMAR. ASMA, « ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA ». Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université El-Oued, soutenue le 24/04/2016.
- [51] Moussaoui TahaYacine, Hada Mounir « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie Éolienne », Mémoire de master académique, Université d'El-oued, 2015.
- [52] K. Hamza << Commande d'un Aérogénérateur Basé sur une Génératrice à Double Alimentation>> Mémoire Master Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa ,2013.
- [53] T . Fatma Zahra << Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques >> memoire de magister université d'eloued ,2013.
- [54] F . Atmane << Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)>> MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.
- [55] B . Hocine . B . Abdallah << commande de la puissance active et réactive du G A DA par Méthode de mode glissant >> Mémoire Master Université Echahid Hamma LakhdarElOued ,2015.
- [56] Suman,M.(2010) .« Grid-connected vector-controlled slip-ring induction machine drive with out speed sensor. journal homepage,18,4-14.
- [57] SALMA EL AIMANI, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Co habilité avec l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1 (USTL), décembre 2004.
- [58] H. Tamrabet «robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une MAS » mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna soutenu le 20/05/2006
- [59] I.HAMZAOUI, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.

- [60] YDJERIRI, « Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien» Thèse de Magister en Électrotechnique, UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BELABBÈS, 2009.
- [61] B. HAMANE, «Contrôle robuste d'aérogénérateur», mémoire de magister, université d'oran, 2012.
- [62] N.AKKARI, «Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse De Doctorat De L'université El Hadj Lakhdar De Batna, 2010.
- [63] G. SALLOUM, «Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation», Thèse De Doctorat, Institut Polytechnique De Toulouse, 2007.
- [64] A. MEROUFEL, Y. DJERIRI, A. MASSOUM ET A. HAMMOUMI, «Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien», Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682
- [65] F.Merrahi, « Alimentation et commande d'une machine
- [66] F. Akel, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire De Magister En, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2009.
- [67] F.Dehoum, « Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur d'état, université de m'sila , Algérie , 2011.
- [68] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11, France, 2006.
- [69] Imad MEZERZI , « Contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation», Mémoire de Master, Université de M'sila, Algérie, 2013.
- [70] D . redha. A . Farouq<< Commande par mode glissant et flou d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) « Application à l'énergie éolienne>> Mémoire Master universite mohamed boudiaf - m'sila,2017.
- [71] AM.SIDDO, I.S.NOUHOU, « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, EI-Harrach, 2007.
- [72] F.POITIERS, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [73] HAMANE Bekhada, << CONTROLE ROBUSTE 'AEROGENERATEUR » Thèse de magistère ENSET – ORAN,2012



- [74] B. AKIN « State Estimation Techniques For Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motors »; In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, the Middle East Technical University, August, 2003.
- [75] G. GRELLET, G. CLERC « Actionneurs Électriques Principes, Modèles, Commande », Deuxième tirage, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [76] A.L.Nemmour, "Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002 .
- [77] " SAKI ALI- BELAIDI MOURAD" Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne -juin 2006.
- [78] HADDAD Salah ; CHARIF Mourad "Etude comparative de la commande vectorielle et celle par mode glissement de moteur asynchrone" Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA, 2005.
- [79] KAHIL Zoubir ; LATRECHE Houari " Commandes par retour d'état non linéaire d'un moteur asynchrone " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA , JUIN 2006.
- [80] H. S. KIM, J. H. PARK, Y. K. CHOI, « Variable Structure Control of Brushless DC Motor using Evolution Strategy with Varying Search Space », IEEE, 1996.
- [81] H. S. CHOI, Y. H. PARK, Y. CHO and M. LEE, « Global Sliding-Mode Control Improved Design for a Brushless DC Motor», IEEE Control Systems Magazine, June 2001.
- [82] NAIDJI Omar "Commande à structure variable appliquée au simulateur de vol d'hélicoptère" mémoire de master Université de M'SILA, JUIN 2012.
- [83] BOUKHELKHAL Abdelouahab ; HACHEMI Ahmed adel "Commande par mode de glissement d'une suspension active d'un vé chile" Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2006
- [84] YAHIAOUI Omar ; LABZA Tahar " Etude et simulation d'association onduleur de tension -moteur asynchrone et réglage par mode glissant" Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2007.
- [85] IHADDADENE Kerim ; CHAIBI Madani ; ABDELATIF Billal " Etude comparative entre la commande pi et celle par mode glissant d'un moteur asynchrone triphasé" Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2009.
- [86] AMGHAR Billal ; HEDID Abdelkader " Commande par Fuzzy Sliding Mode d'un variateur de vitesse hydrodynamique " Mémoire d'Ingéniorat Ecole Nationale Polytechnique2007.
- [87] BELKHEiR Med elamine ; HAMDY Mohamed ; ROUMAIR Tariq " Synthèse de lois de commande par floue mode glissement avec une surface de glissement non linéaire appliques a système Hydraulique " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2010

- [88] ACHOUR Abdelmalak ; AICHOUCHE Azedine " Réglage par mode glissant d'un machine asynchrone" Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2005.
- [89] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems", Taylor & Francis, London, 1999.
- [90] DJERIOUI Ali ; KHELIFI Faris "Commande et observation par mode glissant des convertisseurs multicellulaires séries " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2009
- [91] A.Benchaib, « Application de mode de glissement par la commande en temps réel de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, soutenue au laboratoire des systèmes automatiques d'Amiens, université de Picardie Jules Vernes 1998.
- [92] A.Benchaib, A.Rachid and E.Audrezet, « sliding mode input output linearization and field orientation for reel time control of induction motors», IEEE Transaction on Power Electronics. V14. N0 1mpp. 3-13 January 1999
- [93] A. Sabanovie et D.B.Izozimov, « Application to sliding mode to induction motor control» , IEEE Transactions and Application, V.IA-17, N01, pp. 41-49 Jan/Feb 1981.