

République algérienne démocratique et populaire ministère de
l'enseignement supérieur

Université d'Oran 2 MOHAMED BEN AHMED

Institut de mécanique et sécurité industrielle

Département électromécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences Technique

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Intitulé

Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation MADA

Présenté et soutenu par :

ZIGHEM MOHAMMED

KHELIFATI MOHAMED AMINE ISLAM

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
LALAOUI Med El Amine	MAA	IMSI	Président
BELKACEM Belkacem	MCA	IMSI	Encadreur
BOUHAMRI Nouredine	MCA	IMSI	Examinateur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

*Nous remercions ALLAH, le tout puissant,
De nous avoir donné le courage et la volonté
pour Accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur :
d'avoir accepté de diriger ce travail ;
pour ses conseils, sa disponibilité et pour nous
avoir fait profiter de ses connaissances et de
ses qualités tant professionnelles
qu'humaines.*

*Nos remerciements vont également
à toutes les personnes qui nous ont
aidées à réaliser ce travail.*





DEDICACE

*Avant tout, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour
Réaliser ce travail malgré toutes les difficultés
Rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*mes très chers parents: mon père qui n'a pas
cessé de m'encourager, ma mère (la voix de
la sagesse et de L'amour) a qui je dois beaucoup.
Je sais que je ne pourrai jamais lui rendre
ce qu'elle m'a donné.*

*à Ma sœur pour chaque aide qu'elle m'a donnée
pendant ma carrière scolaire « hayate » et son
mari « adel » et mon frère « hamid » et sa femme
« fatima ».*

A tous qui aime mohamed.

ZIGHEM MOHAMED



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents qui m'ont beaucoup aidé.

A mes sœurs.

*A mes collègues du département
électromécanique.*

*A tous mes enseignants depuis mon primaire
jusqu'au master*

A toute ma famille et à tous mes amis

KHELIFATI Mohamed Amine Islam

Résumé :

Ce travail présente une technique de commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée à travers les grandeurs rotoriques, pour la production de l'énergie éolienne.

De ce fait, nous avons appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Nous nous sommes intéressés au régulateur PI classique qui présente certains inconvénients tels que la sensibilité aux incertitudes paramétriques de la machine et leurs variations. Pour améliorer les performances de système à commander, on a appliqué une technique de contrôle non-linéaire (le contrôle par mode glissant). Les résultats de simulations par Matlab/Simulink et des tests de robustesse sont présentés.

Mots-clés : machine asynchrone à double alimentation (MADA), commande par mode glissant, commande vectorielle, régulateur PI.

Abstract:

This work present a technique of sliding mode control applied to the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production.

We applied the vector control in active and reactive stator power. Using PI regulators wich present some disadvantages such as the sensitivity to parametric uncertainties of the machine and their variations. Against of this disadvantage, and to improve the system performances, a nonlinear control strategy was presented. Results obtained in Matlab/Simulink environment show that the sliding mode control is more robust, have superior dynamic performance and hence found to be a suitable replacement of the conventional PI controller.

Keywords: doubly-fed induction Machine (DFIM), sliding mode control, field-oriented control, PI controller.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE I: Généralités sur l'énergie éolienne.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Présentation de l'énergie éolienne	3
I.2.1 Définition de l'énergie éolienne	3
I.2.2 Fonctionnement d'un système éolien.....	3
I.3 Différents types d'éoliennes.....	4
I.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	4
I.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	5
I.4 Aérogénérateurs à vitesse variable.....	5
I.4.1 Système basé sur les machines asynchrones.....	5
I.4.2 Système basé sur les machines synchrones.....	6
I.4.3 Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées.....	6
I.5 Modélisation du système éolien.....	8
I.5.1 Modèle de la turbine.....	9
I.5.2 Modèle du multiplicateur.....	9
I.5.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	10
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
I.6.1 Avantages.....	11
I.6.2 Inconvénients.....	11
I.7 Conclusion.....	11
CHAPITRE II: Etude et modélisation de la MADA.....	13
II.1 Introduction.....	13
II.2 Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	13
II.3 Principe de fonctionnement.....	14
II.4. Modes de fonctionnement de la MADA.....	15
II.4.1 Fonctionnement moteur.....	15
II.4.2. Fonctionnement générateur.....	16
II.5 Avantages et inconvénients de la MADA.....	17
II.5.1 Avantages de la MADA.....	17
II.5.2 Inconvénients de la MADA.....	17
II.6. Modélisation de la MADA.....	18

II.6.1 Hypothèses simplificatrices.....	18
II.6.2 Modèle de la MADA.....	18
II.6.2.1 Représentation de la machine dans l'espace électrique.....	18
II.6.2.2 Equations électriques de la MADA.....	18
II.6.2.3 Equations magnétiques de la MADA.....	19
II.6.2.4 Equation mécanique.....	21
II.6.2.5 Choix de référentiel.....	21
II.7. Transformation de PARK.....	21
II.7.1 Application de la Transformation de Park à la MADA.....	23
II.7.2 Choix de référentiel de Park.....	24
II.8 Commande vectorielle de la GADA.....	25
II.8.1 But et principe de la commande vectorielle.....	25
II.8.2 Variantes de la commande vectorielle.....	26
II.8.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	28
II.8.4 Contrôle indépendant des puissances actives et réactives.....	28
II.8.5 Commande directe en puissance active et réactive de la GADA.....	33
II.8.5.1 Etude de la régulation pour la commande.....	33
II.8.5.2 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI).....	33
II.9 Commande vectorielle indirecte.....	34
II.9.1 Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA.....	35
II.9.1.1 Commande sans boucles de puissance.....	35
II.9.1.2 Commande avec boucles de puissance.....	36
II.10 Résultats pour la commande vectorielle de la GADA.....	36
II.11 Conclusion.....	37
CHAPITRE III : Commande par mode glissant de la MADA.....	39
III.1 Introduction.....	39
III.2 Principe de la commande par mode de glissement.....	39
III.3 Conception de la commande par mode glissant.....	40
III.3.1 Choix de la surface de glissement.....	40
III.3.2 Condition d'existence de convergence.....	40
III.3.3 Calcul de la commande.....	42
III.4 Commande par mode glissant de la MADA.....	43
III.4.1 Contrôle de la puissance active et réactive.....	44

III.5 Résultats de simulation.....	45
III.6 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Références Bibliographiques.....	48
Annexe.....	54

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

Figure I.1 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	4
Figure I.2 : Éoliennes de Savonius (Eoliennes à axe vertical).....	5
Figure I.3 : Éoliennes à axe horizontal.....	5
Figure I.4.a. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.....	7
Figure I.4.b. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.....	7
Figure I.4.c. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.....	7
Figure I.4.d. Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	8
Figure I.5 : Représentation du système mécanique de l'éolienne.....	8
Figure I.6 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	9
Figure I.7 : Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.....	10

Chapitre II : Etude et modélisation de la MADA

Figure II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	14
Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la MADA.....	16
Figure II.3 : Représentation de la structure principale de la MADA.....	18
Figure II.4 : Transformation de Park.....	22
Figure II.5 : Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu.....	27
Figure II.6 : Orientation du flux statorique sur l'axe d.....	28
Figure II.7 : Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....	31
Figure II.8 : Schéma bloc de la commande directe.....	33
Figure II.9 : Schéma d'un régulateur de type PI.....	33
Figure II.10 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.....	35
Figure II.11 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.....	36
Figure II.12. Puissance Active est Réactive de la commande directe.....	37
Figure II.13. Puissance Active est Réactive de la commande indirecte.....	37

CHAPITRE III : Commande par mode glissant de la MADA

Figure III.1 : Les modes de trajectoire dans le plan de phase.....	39
Figure III.2: Fonction <i>sign</i> (Commande de type relais).....	42
Figure III. 3 : Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant.....	45
Figure III. 4. Puissance Active est Réactive de la commande directe.....	46
Figure III. 5. Puissance Active est Réactive de la commande indirecte.....	46

NOTATIONS et SYMBOLES

<i>Paramètres de modélisation de la MADA</i>		
R_s	(Ω)	Résistance statorique par phase
R_r	(Ω)	Résistance rotorique par phase
L_s	(H)	Inductance cyclique statorique par phase
L_r	(H)	Inductance cyclique rotorique par phase
L_m	(H)	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor)
l_s	(H)	Inductance propre d'une phase statorique
l_r	(H)	Inductance propre d'une phase rotorique
m_s	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
m_r	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
M	(H)	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phases statorique et rotorique
p	(-)	Nombre de paires de pôles
f_v	($N.m.s/rd$)	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice
C_{em}	($N.m$)	Couple électromagnétique de la génératrice
<i>Repères</i>		
(s_a, s_b, s_c)	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique	
(r_a, r_b, r_c)	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques	
(d, q)	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)	
(α, β)	Axes de référentiel de Concordia/Clarke (repère de Park fixe au stator)	
θ_{sr} (rad)	Position angulaire du rotor par rapport au stator	
θ_s (rad)	Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d)	
θ_r (rad)	Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d)	

Grandeurs électriques liées au stator

vs a, b, c	(V)	Tensions instantanées statoriques triphasées
vs d, q	(V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q)
vs α, β	(V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β)
Vs	(V)	Module du vecteur de tension statorique
is a, b, c	(A)	Courants instantanés statoriques triphasées
is d, q	(A)	Courants statoriques diphasées dans le repère (d, q)
is α, β	(A)	Courants statoriques diphasées dans le repère (α, β)
Ps	(W)	Puissance active statorique
Qs	(VAR)	Puissance réactive statorique

Grandeurs électriques liées au rotor

vr a, b, c	(V)	Tensions instantanées rotoriques triphasées
vr d, q	(V)	Tensions rotoriques diphasées dans le repère (d, q)
vr α, β	(V)	Tensions rotoriques diphasées dans le repère (α, β)
Vr	(V)	Module du vecteur de tension rotorique
ir a, b, c	(A)	Courants instantanés rotoriques triphasées
ir d, q	(A)	Courants rotoriques diphasées dans le repère (d, q)
ir α, β	(A)	Courants rotoriques diphasées dans le repère (α, β)
Pr	(W)	Puissance active rotorique
Qr	(VAR)	Puissance réactive rotorique

Grandeurs magnétiques liées au stator

ϕ_s a, b, c	(Wb)	Flux instantané magnétiques au stator
ϕ_s α, β	(Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère (α, β)
ϕ_s d, q	(Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q)

Grandeurs magnétiques liées au rotor

ϕ_r a, b, c	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques au rotor
ϕ_r α, β	(Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β)
ϕ_r d, q	(Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q)

Introduction générale

Introduction générale:

L'énergie électrique est utilisée depuis longtemps pour produire de l'énergie mécanique grâce à des convertisseurs électromécaniques réversibles, qui sont les machines électriques. Au fil du temps, cette tendance est accentuée à la fois dans le domaine industriel, tertiaire et domestique. Actuellement, elle constitue la majeure partie de l'énergie consommée dans l'industrie pour fournir la force motrice [1].

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...). Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable.

Pour remédier à ces problèmes environnementaux, les chercheurs étaient dans le besoin de trouver d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

Grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente une solution idéale pour les entraînements à hautes performances et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse. L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche le long de la dernière décennie. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines.

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [2]. Les techniques de commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles.

Un autre type de commandes modernes qui a attiré beaucoup de chercheurs le long de ces dernières années est la commande par mode de glissement [3]. Le mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable.

La commande par mode glissant, qui a été développée en Union Soviétique il y a plus de 30 ans, est une technique de commande non linéaire. Elle utilise des algorithmes de réglages qui assurent la robustesse du comportement du processus par rapport aux variations paramétriques et

perturbations. Elle présente plusieurs avantages tel que :

- La robustesse, la rapidité de réponse sans dépassement.
- la bonne efficacité aux incertitudes paramétriques et de modélisation

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

Le premier chapitre est consacré à des notions théoriques sur l'énergie éolienne. Les différents types et les zones de fonctionnement de l'éolienne, suivi par un rappel sur les différents types d'éoliennes,

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique orientée vers l'état de l'art sur la MADA.

Un troisième chapitre est consacré à la modélisation des convertisseurs et la commande vectorielle et son résultat de la simulation.

Le quatrième et dernier 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 MADA par cette technique. La structure retenue est une configuration utilisant le principe de la commande équivalente.

Enfin une conclusion générale clôtura notre modeste contribution.

CHAPITRE I:
Généralités sur l'énergie
éolienne

I.1 Introduction :

L'intérêt pour l'utilisation des énergies renouvelables s'est accru ces dernières années. Parmi ceux, on retrouve l'énergie éolienne qui est utilisée pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ; là encore, de nombreux dispositifs existent, et dans la plupart des cas, utilisant des machines synchrones ou asynchrones. Ces stratégies de contrôle doivent pouvoir capter l'énergie maximale qui est présente sur la plus large plage possible de vitesses de vent, ce qui améliorera la rentabilité des installations éoliennes [4].

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, à vitesse fixe et vitesse variable ...etc.), puis on passe à un état de l'art sur les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

I.2 Présentation de l'énergie éolienne :

I.2.1 Définition de l'énergie éolienne :

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [5]. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés.

Les installations de production de l'énergie éolienne peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes Offshore) où la présence du vent est plus régulière.

I.2.2 Fonctionnement d'un système éolien :

Un aérogénérateur a pour rôle de, convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière

générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Pour parvenir à cet objectif, idéalement. Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet un contrôle mécanique (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système capable de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

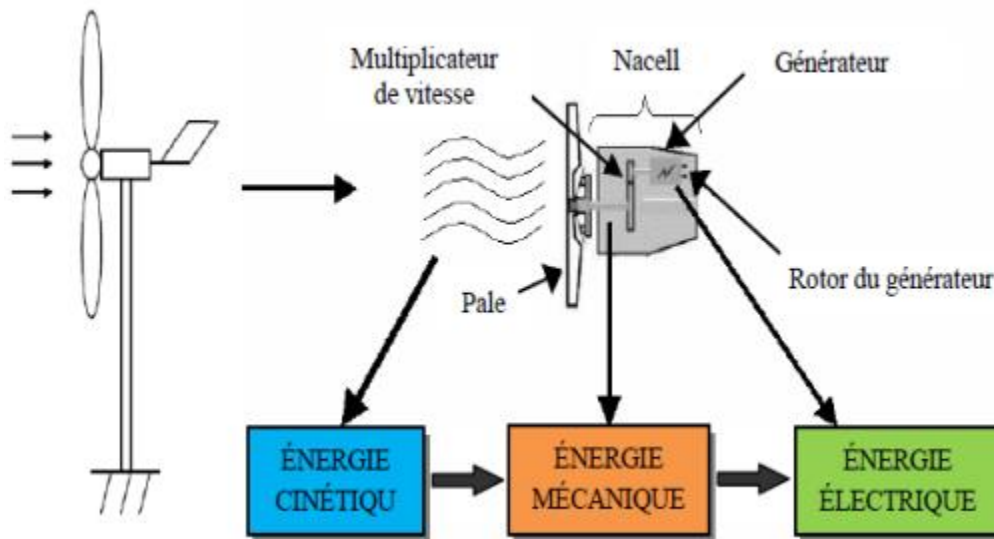


Figure I.1 : Principe de la conversion d'énergie éolienne [6]

I.3 Différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.3.1 Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [7].

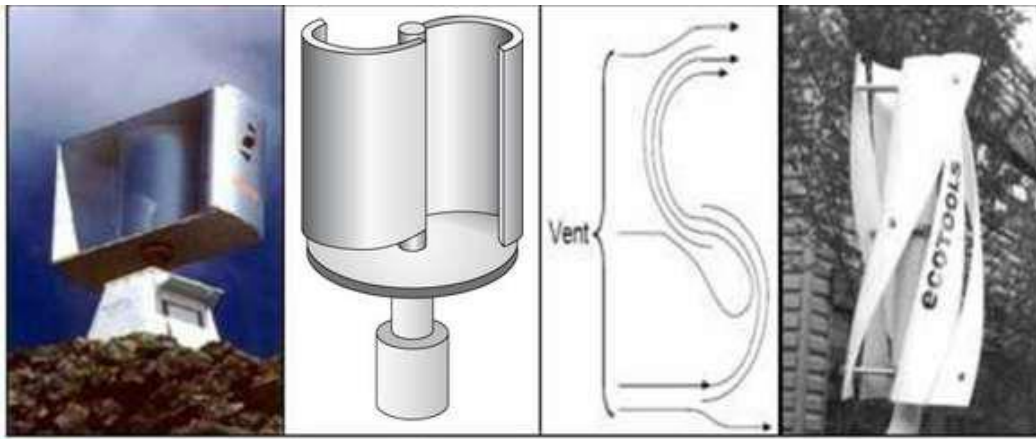


Figure I.2 : Éoliennes de Savonius (Eoliennes à axe vertical) [8]

I.3.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les aérogénérateurs à axe horizontal ont été inspirés des moulins à vent. Cette technologie ancestrale est devenue largement dominante de nos jours, car la plupart des éoliennes commerciales et industrielles installées sont à axe horizontal. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ; ces pales sont couplées à un rotor, ce qui va générer un couple moteur entraînant sa rotation.



Figure I.3 : Éoliennes à axe horizontal [9]

I.4 Aérogénérateurs à vitesse variable :

Il existe plusieurs variantes d'éoliennes à vitesse variable : ceci se base principalement sur le choix d'utilisation de la génératrice.

I.4.1 Système basé sur les machines asynchrones :

La configuration de la figure (Figure I.4.a) est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La machine est couplée à la turbine via un multiplicateur, sa vitesse de rotation est maintenue constante grâce au système mécanique d'orientation des pales [10].

I.4.2 Système basé sur les machines synchrones :

Il existe deux possibilités de coupler la machine synchrone à la turbine :

❖ Couplage direct (Figure I.4.b)

Certains constructeurs se sont spécialisés dans la réalisation d'éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné couplées directement à la turbine, et ayant un grand nombre de paires de pôles, L'avantage de ce système étant d'éviter l'installation du multiplicateur, source de bruit. L'inconvénient d'utilisation des bagues et de balais serait exclu, si la génératrice était à aimants permanents. L'ennui de cette structure, est qu'elle nécessite pour une connexion au réseau des convertisseurs de puissance doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice [11].

❖ Couplage via un multiplicateur (Figure I.4. c).

On trouve également chez certains constructeurs des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent généralement sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la Figure [12].

I.4.3 Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées :

Une des configurations qui se développe dans le marché des turbines éoliennes est sans doute la machine asynchrone doublement alimentée, utilisée en génératrice (GADA). Le stator est relié directement au réseau, tandis ce que le rotor est connecté via un convertisseur de tension en « back-to-back », utilisé comme variateur de fréquence. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure I.4.d). Les avantages de cette configuration sont [13] :

- Aptitude de réguler la puissance réactive, par conséquent un découplage de la commande des puissances active et réactive peut se réaliser.

- Magnétisation à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux,

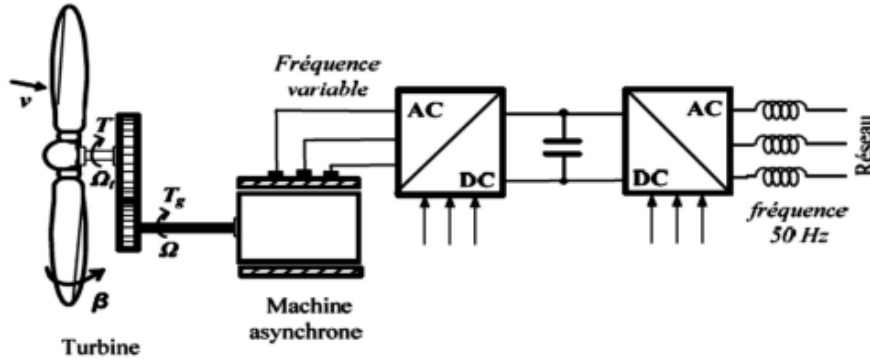


Figure I.4.a. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone [15]

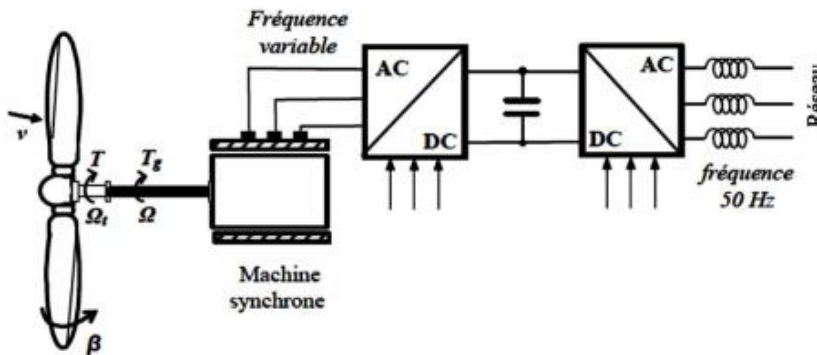


Figure I.4.b. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine [15]

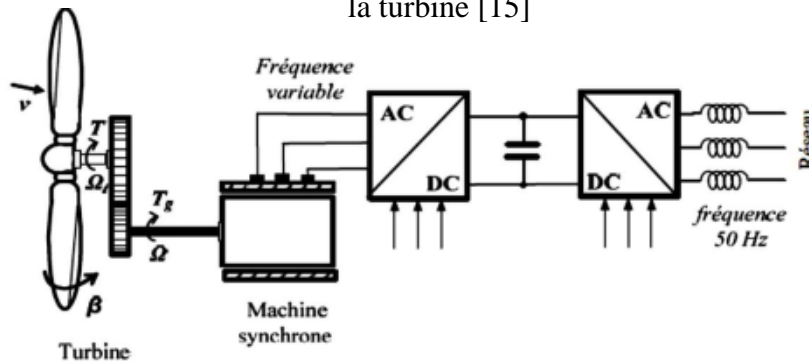


Figure I.4.c. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur [15]

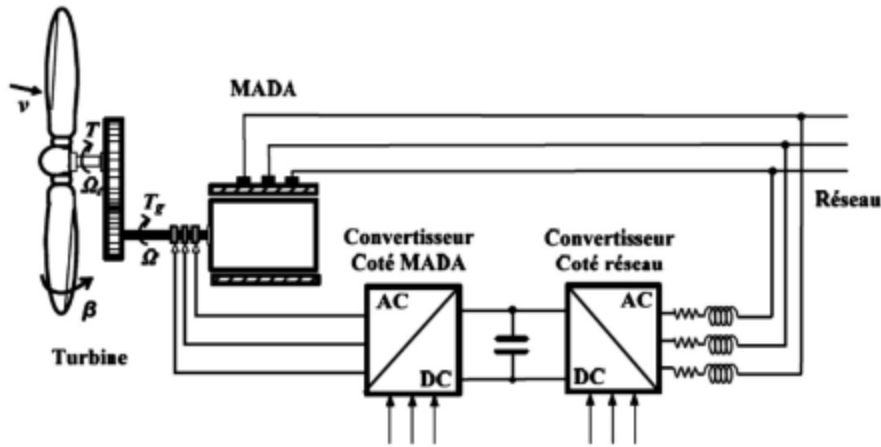


Figure I.4.d. Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [15]

I.5 Modélisation du système éolien :

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Les facteurs déterminant la puissance mécanique, sont la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Ce système peut être représenté sur la figure (I.5), il comporte :

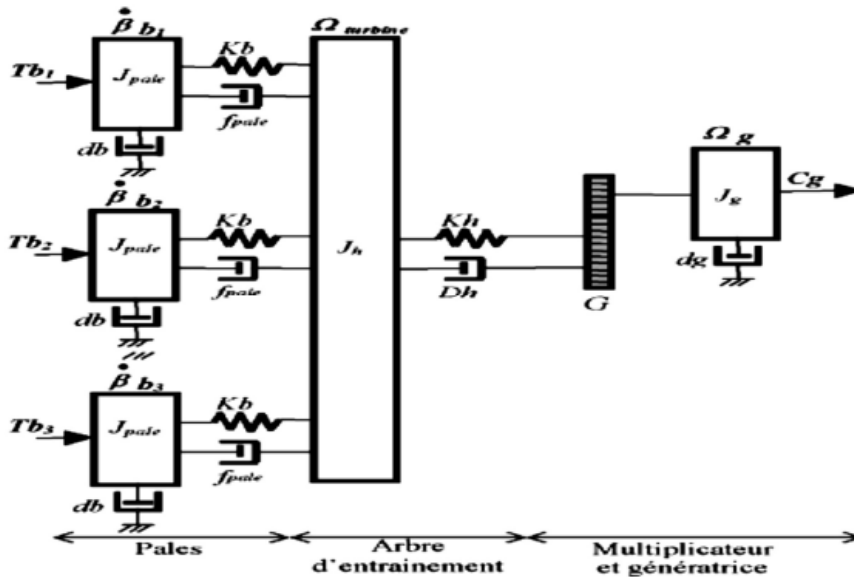


Figure I.5 : Représentation du système mécanique de l'éolienne [16]

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :
 - la même inertie J_{pales}
 - la même élasticité K_b
 - le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement f pale par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [17].

- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par : son inertie (J_h), son élasticité (K_h) et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur (D_h). Le rotor de la génératrice possède aussi son inertie (J_g), et son coefficient de frottement par rapport à l'air (d_g) ; ce rotor transmet un couple (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec}

I.5.1 Modèle de la turbine :

On peut simplifier le schéma de la figure I.5, si l'on considère les forces de poussée égales ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$), puisque qu'on a une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales. L'ensemble des trois pales peut être simplifié comme un seul système. Le coefficient de frottement des pales, (d_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique simplifiée (figure I.6) [18].

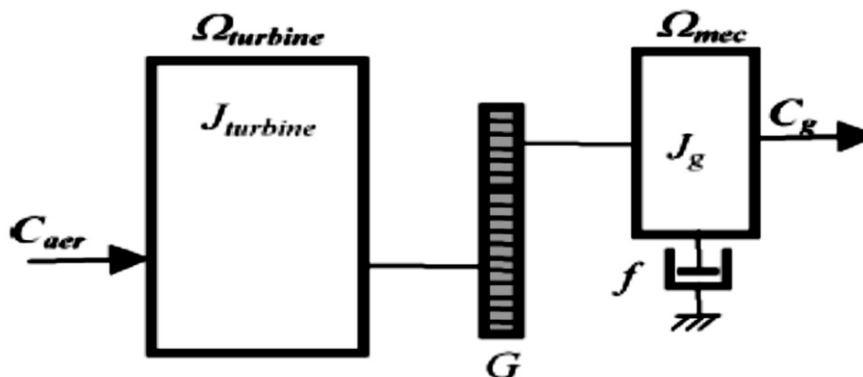


Figure I.6 : Modèle mécanique simplifié de la turbine [17].

I.5.2 Modèle du multiplicateur :

L'aérogénérateur tourne généralement à une vitesse nominale. Le multiplicateur ajuste cette vitesse à celle du générateur électrique à travers un coefficient appelé le gain G [18].

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t}$$

Ω_{mec} Représente vitesse angulaire de rotation du générateur, toutefois le gain peut s'exprimer en

fonction de :
$$G = \frac{C_{mec}}{C_t}$$

Où C_{mec} est le Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m)

I.5.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission :

D'après la figure (I.7), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique du générateur (modèle de l'arbre) par [19] :

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_T \\ \text{Transformation de laplace} \rightarrow \Omega_{mec}(S) = J \frac{1}{JS + f} + C_T(S) \end{array} \right\}$$

Où :

- C_T étant le couple total de l'éolienne (N. m), donné par :
- $C_T = C_{mec} - C_{em}$
- J : Inertie totale des parties tournantes ($kg. m^2$) : qui est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur :
- $J = \frac{J_t}{G^2} + J_g$

Le schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne [14]. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation mécanique Ω_{mec} qui entraîne le générateur, peut être contrôlée de deux manières différentes : soit par la variation de l'angle de calage des pales, soit par contrôle du couple électromagnétique C_{em} .

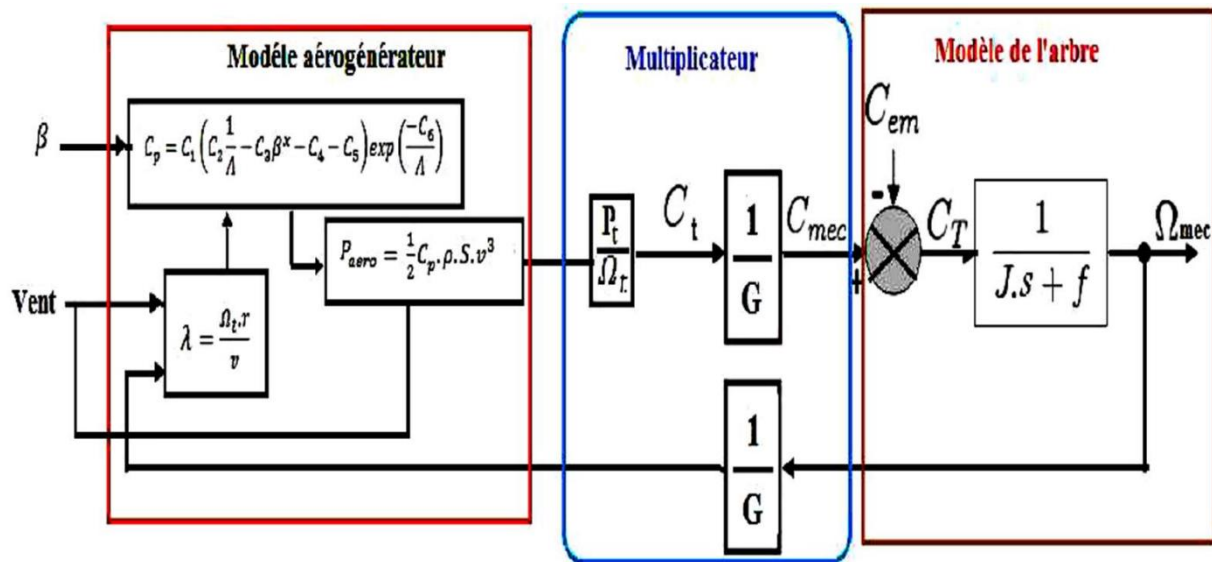


Figure I.7 : Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne [20]

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a ses propres avantages, lui permettant de croître et d'évoluer parmi d'autres sources d'énergie, ceci lui permettra de jouer un rôle important à l'avenir conditions pour éviter les effets causés par les inconvénients mentionnés ci-dessous :

I.6.1 Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Cette source d'énergie est peut-être intéressante pour les pays en voie de développement.
- Elle répond au besoin d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation pour des faibles puissances dans un contexte de faible puissance d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gaz à effet de serre [21][22].

I.6.2 Inconvénients :

- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- Le bruit qui vient du multiplicateur.
- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [23].

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un rappel des notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Après ce rappel descriptif, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations qui sont utilisées dans

le domaine éolien. L'évaluation a été faite sur la base des principales exigences d'un système de conversion d'énergie éolienne.

CHAPITRE II:
Etude et modélisation de la MADA

II.1 Introduction :

La machine asynchrone à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur). Dans ce chapitre nous allons présenter une étude générale sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages.

II.2 Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique (A), et le rotor (B) qui 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 sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation [24] :

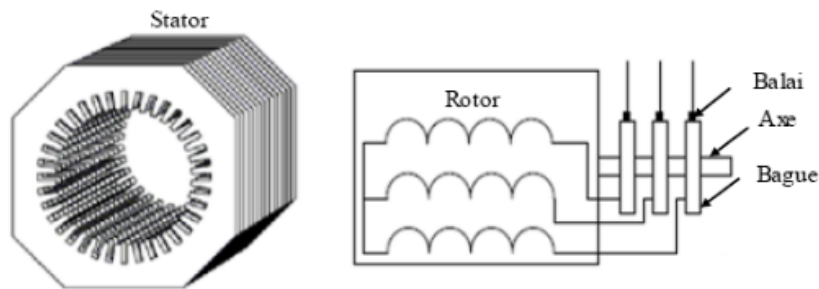


Figure II.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation [25]**II.3 Principe de fonctionnement :**

La machine à étudier est une machine asynchrone à double alimentation triphasé, a rotor bobiné, dont la source d'excitation est disposée au niveau du rotor dont les bobines sont connectées au réseau à travers un convertisseur de puissance bidirectionnel par un système balais-bagues. Le stator est alimenté par une source triphasée équilibrée de fréquence f_s , et le rotor alimenté par une deuxième source de tension de fréquence f_r , le courant statorique crée un champ tournant à la vitesse :

$$\Omega_s = \omega_s / P \quad (\text{II.1})$$

De manière analogue les courants rotoriques produisent un champ tournant à la vitesse

$$\Omega_r = \omega_r / P \quad (\text{II.2})$$

La vitesse angulaire de la machine est définie par :

$$\omega_m = \omega_s \mp \omega_r, \text{ avec } \omega_m = p \times \Omega_m \quad (\text{II.3})$$

Le signe plus (+) dans l'équation (1.1) signifie que le champ tournant créé par l'enroulement du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor c'est-à-dire que la machine est en mode hypo synchrone ($\omega_s < \omega_r$) ; [26] Le signe (-) signifie que les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent des sens opposés c'est-à-dire que la machine fonctionne en régime hyper synchrone ($\omega_s > \omega_r$), [27]. D'autre part la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par [4] :

$$f_s = f_r + p \times f_m \quad (\text{II.4})$$

Dans ce cas le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (\text{II.5})$$

➤ **1^{er} cas $g = 0$, Régime synchrone :**

Si la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, alors la fréquence f_r du rotor va s'annuler, il n'y aura aucune tension induite dans les enroulements du rotor. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ($\omega_m = 0$). La puissance du stator égalera celle du réseau, il n'y aura pas de transfert de puissance du côté du rotor.

➤ **2^{ème} cas $g = 1$, Régime stationnaire :**

Le stator étant alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F.E.M induite avec une fréquence $f_r = f_s \rightarrow g = 1$. Dans ce cas-là, la MADA se comporte comme un transformateur.

➤ **3^{ème} cas $g < 0$, Régime Hyper-synchrone :**

L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative, ce qui signifie que l'ordre de succession des phases du rotor s'est inversé [28].

➤ **4^{ème} cas $0 < g < 1$, Régime Hypo-synchrone :**

Le champ tournant créé par les enroulements du rotor tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du stator. Dans ce cas, la fréquence f_r du rotor commence à décroître, et tend vers 0 ; à ce moment, la vitesse du rotor égale celle du synchronisme. En conséquence, la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible lorsqu'on est proche de la vitesse du synchronisme [28].

II.4. Modes de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement, le champ magnétique à l'intérieur de la machine est géré à travers la commande des tensions rotoriques, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en mode hyper ou hypo synchrone aussi bien en moteur qu'en générateur [29].

Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence pour les entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

II.4.1 Fonctionnement moteur :

- Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique du stator est transformée en partie en puissance mécanique et le reste peut être réinjecté au réseau à travers le rotor : c'est la cascade hyposynchrone. Le moteur asynchrone à cage peut fonctionner sous ces conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules [30].

- Lorsque la machine tourne au-dessus de la vitesse de synchronisme, elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor : c'est la cascade hypersynchrone. Le moteur asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

II.4.2. Fonctionnement générateur :

- Lorsque la machine reçoit de la puissance du dispositif mécanique et du rotor, celle-ci tourne en dessous de la vitesse de synchronisme : c'est la cascade hyposynchrone. Le générateur asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.
- Lorsque la machine tourne au-dessus de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique est réinjectée au réseau à travers le stator et le rotor : c'est la cascade hypersynchrone. Le générateur asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que la puissance rotorique est dissipée dans le rotor sous forme de pertes joules.

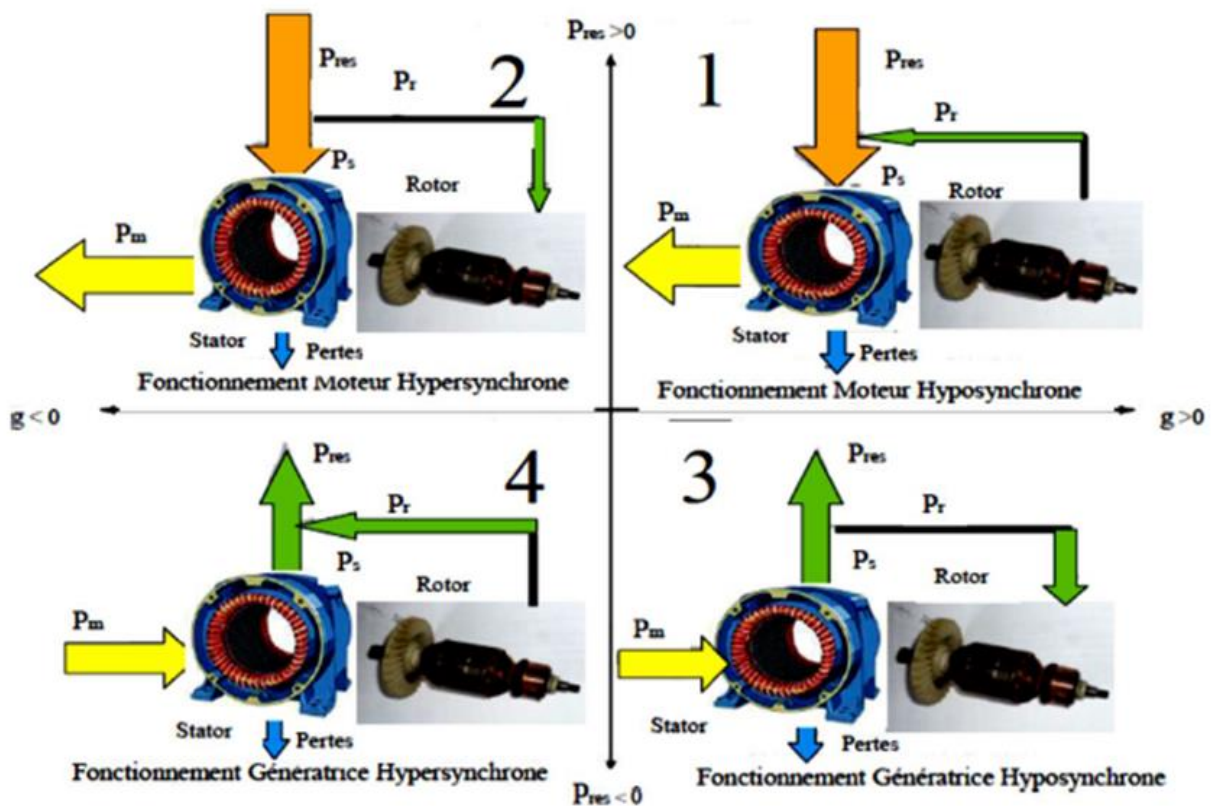


Figure II. 2 : Modes de fonctionnement de la MADA [31]

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à Cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

II.5 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

II.5.1 Avantages de la MADA :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, lui donne une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- Elle offre plusieurs possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application.
- Elle présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grandes puissances.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne.
- Dans les systèmes de production d'énergie décentralisée, la MADA en fonctionnement générateur est un concurrent sérieux par rapport aux machines synchrones et asynchrones classiques ; puisque l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [32].
- La MADA offre la possibilité de fonctionner à couple constant, même au-delà de la vitesse nominale [32].

II.5.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle à cage. Généralement, elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- La présence du système engendre des effets indésirables sur la machine comme les frottements.

Le sujet global de notre travail de thèse étant d'étudier un système de génération d'énergie à travers une turbine éolienne couplée à une MADA utilisée en fonctionnement générateur, dans ce qui suit cette machine aura le nom de GADA [33].

II.6. Modélisation de la MADA :

II.6.1 Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices qui sont [34]:

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- La f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures d'où résulte du fait que l'entrefer est constant.
- L'effet d'encoche est négligé et les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor donc seuls les enroulements sont parcourus par des courants.

II.6.2 Modèle de la MADA:

II.6.2.1 Représentation de la machine dans l'espace électrique :

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme il est indiqué en Figure II.3 :

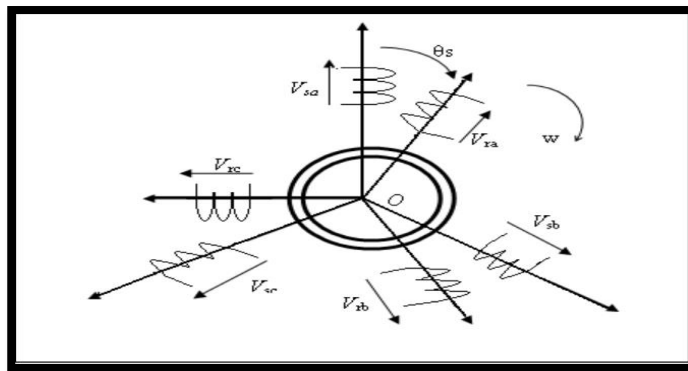


Figure II.3 : Représentation de la structure principale de la MADA [35]

II.6.2.2 Equations électriques de la MADA :

A 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 les variations de flux.

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - R \cdot i \quad (\text{II.6})$$

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

✓ pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

✓ Pour le rotor:

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.9})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.10})$$

II.6.2.3 Equations magnétiques de la MADA :

✓ Pour le stator:

$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_s \cdot i_{sa} + M_{sr} \cdot i_{ra} \\ \Phi_{sb} = L_s \cdot i_{sb} + M_{sr} \cdot i_{rb} \\ \Phi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + M_{sr} \cdot i_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

✓ Pour le rotor:

$$\begin{cases} \Phi_{ra} = L_r \cdot i_{ra} + M_{sr} \cdot i_{sa} \\ \Phi_{rb} = L_r \cdot i_{rb} + M_{sr} \cdot i_{sb} \\ \Phi_{rc} = L_r \cdot i_{rc} + M_{sr} \cdot i_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + M_{sr}[i_{rabc}] \quad (\text{II.13})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + M_{sr}[i_{sabc}] \quad (\text{II.14})$$

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances $[L(\theta)]$. Celle-ci comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié de ces

coefficients dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique " θ " qui représente la position de la phase (a_r) du rotor par rapport à la phase (a_s) du stator. L'angle électrique s'exprime par $\theta = np\theta_m$ où p est le nombre de paires de pôles de la machine et θ_m la position mécanique du rotor par rapport au stator [36].

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$\begin{cases} M_1 = M \cos \theta \\ M_2 = M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_3 = M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où M représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques. La matrice $[L(\theta)]$ fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice des inductances statorique $[L_s]$:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La matrice des inductances rotoriques $[L_r]$:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Cette dernière matrice est normée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

II.6.2.4 Equation mécanique :

L'étude des régimes transitoires fait intervenir, en plus des grandeurs électriques, les grandeurs mécaniques. Ainsi, pour compléter le modèle, nous devons ajouter l'équation mécanique déduite à partir du théorème des moments [37].

$$C_e - C_r - C_f = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.21})$$

$$C_f = f \cdot \Omega \quad (\text{II.22})$$

Avec:

- J : Est le moment d'inertie du moteur.
- f : C'est le coefficient de frottement visqueux.
- C_e : C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur.
- C_r : C'est le couple résistant, ou de charge.

II.6.2.5 Choix de référentiel :

Nous avons trois orientations possibles du repère:

- Repère (α, β) lié au stator : $\dot{\theta}_{\text{coord}} = 0$ et $\omega_r = -\omega_m$.
- Repère (x, y) lié au rotor : $\dot{\theta}_{\text{coord}} = \omega_m$ et $\omega_r = 0$.
- Repère (d, q) lié au champ tournant : $\dot{\theta}_{\text{coord}} = \omega_{ms}$ et $\omega_r = \omega_s - \omega_m$.

Le système d'axes lié au champ tournant à l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les grandeurs variables sont traitées comme des grandeurs continues. Ainsi que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations, il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante ce qui simplifie considérablement les calculs. En plus, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.

II.7. Transformation de PARK:

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution. Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q). La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante [39] :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \tag{II.23}$$

Les nouvelles variables x_d et x_q sont appelées respectivement composantes directes et en quadrature

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

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \tag{II.25}$$

On vérifie que la matrice de passage obtenue est bien orthogonale afin que la puissance instantanée soit invariante :

$$[P(\theta)] \cdot [P(\theta)]^T = [1] \tag{II.26}$$

La composante homopolaire (o) ne participe pas à la création du champ tournant de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi arbitrairement orthogonal au plan (d, q) . Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation :

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

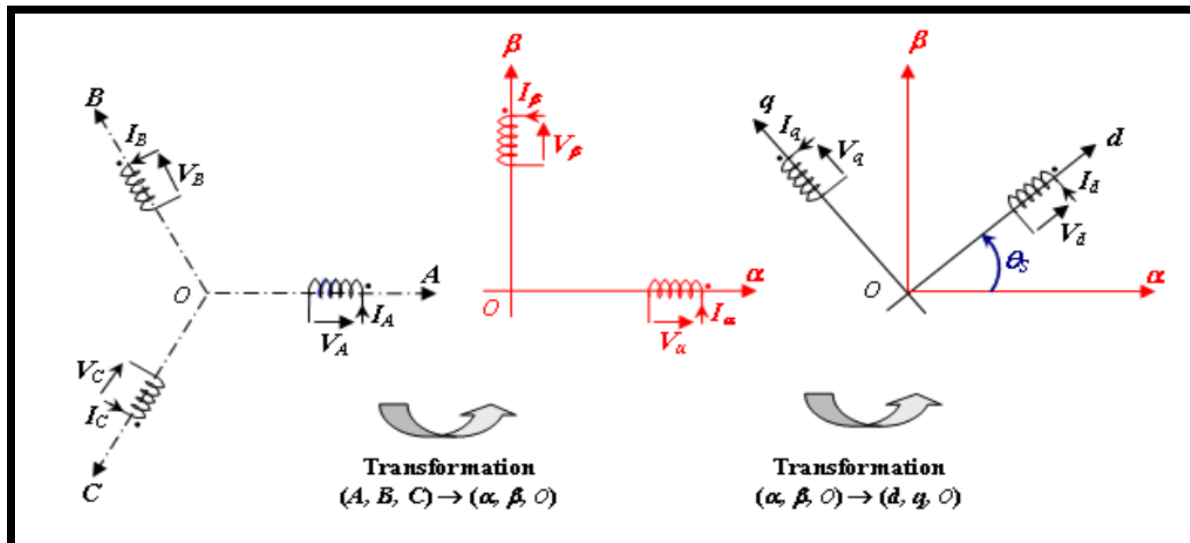


Figure II.4 : Transformation de Park [39].

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \tag{II.27}$$

Où $\int w_s dt = \theta_s$ et $\int w_r dt = \theta_r$ sont les angles de transformation de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement.

II.7.1 Application de la Transformation de Park à la MADA :

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), et en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celles du rotor, on obtient :

✓ pour le stator :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [i_s] ; [i_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [i_{dqo}]_s \quad (\text{II.28})$$

$$[V_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [V_s] ; [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [V_{dqo}]_s \quad (\text{II.29})$$

$$[\varphi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_s] ; [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1} [\varphi_{dqo}]_s \quad (\text{II.30})$$

✓ pour le rotor :

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [i_r] ; [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [i_{dqo}]_r \quad (\text{II.31})$$

$$[V_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [V_r] ; [V_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [V_{dqo}]_r \quad (\text{II.32})$$

$$[\varphi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_r] ; [\varphi_r] = [P(\theta_r)]^{-1} [\varphi_{dqo}]_r \quad (\text{II.33})$$

Avec:

$$[i_{dqo}]_s = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{so}]^T ; [i_{dqo}]_r = [i_{rd} \ i_{rq} \ i_{ro}]^T$$

$$[V_{dqo}]_s = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{so}]^T ; [V_{dqo}]_r = [V_{rd} \ V_{rq} \ V_{ro}]^T$$

$$[\varphi_{dqo}]_s = [\varphi_{sd} \ \varphi_{sq} \ \varphi_{so}]^T ; [\varphi_{dqo}]_r = [\varphi_{rd} \ \varphi_{rq} \ \varphi_{ro}]^T$$

Les flux dans ce système d'axes s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Et les tensions:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. La puissance transmise entre deux armatures pour développer le couple s'écrit comme suit :

$$P_e = M\omega \times \text{img}[\bar{i}_r * \bar{i}_s] \quad (\text{II.36})$$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = pM \times \text{img}[\bar{i}_r * \bar{i}_s] \quad (\text{II.37})$$

Alors:

$$C_e = p(\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd})$$

$$C_e = p(\varphi_{rq} i_{rd} - \varphi_{rd} i_{rq})$$

$$C_e = pM(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{rq} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd})$$

$$C_e = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd} - \varphi_{sd} i_{rq})$$

II.7.2 Choix de référentiel de Park :

Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la MADA, On peut trouver trois choix utiles pour le référentiel des deux axes :

1. Référentiel fixe au stator ($\theta_s = 0$), (référentiel stationnaire $d\theta_s/dt = 0$). Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
2. Référentiel fixe au rotor ($\theta_r = 0$), (référentiel tournant avec $d\theta_s/dt = \omega = p\Omega$). Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires des machines asynchrones.
3. Référentiel fixe au champ tournant statorique (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique $d\theta_s/dt = \omega_s$): axes désigné par (d,q),(. Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande.

C'est ce dernier que l'on considérera en vue de la commande vectorielle à flux rotorique orienté que nous étudierons au chapitre suivant. Ce référentiel est solidaire au champ tournant statorique c'est-à-dire qu'il tourne à la vitesse ω_s , ce qui se traduit par [40] :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.38})$$

Ce choix permet de définir une pulsation de glissement

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.39})$$

II.8 Commande vectorielle de la GADA :

II.8.1 But et principe de la commande vectorielle :

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle, commande directe du couple (DTC)). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quel que soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel. Au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [41].

Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle.

Le principe de cette dernière consiste à transformer le modèle de la machine asynchrone à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée. En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. Il n'est pas affecté par le courant d'induit à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est pourquoi le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage

rapide du couple. Et pour la machine asynchrone, l'angle entre les deux champs statoriques et rotoriques est différent de 90° .

L'idée proposée par Blaschke [42] et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

II.8.2 Variantes de la commande vectorielle :

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [43] :

- Suivant la source d'énergie :
 - Commande en tension,
 - Commande en courant.
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - Commande vectorielle de flux rotorique,
 - Commande vectorielle de flux statorique,
 - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).
- Suivant la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase).
 - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

Dans ce qui suivra, on choisira, pour contrôler notre GADA la commande vectorielle du flux statorique pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Pour orienter le flux statorique, il faut choisir un référentiel (d,q) de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (o,d), ce qui permettra d'obtenir une expression du couple dans laquelle les deux composantes du courant statorique ou rotorique interviennent ; la première produit le flux et l'autre produit le couple.

Pour une MCC, le courant d'induit I_a est la grandeur génératrice du couple et le courant

d'excitation I_f est la grandeur génératrice du flux. Ainsi, dans une machine à courant continu tout se passe comme si les variables de commandes I_a et I_f étaient orthogonales. C'est à dire que le flux commandé par le courant I_f et le couple par le courant I_a . On dit que l'induit et l'inducteur sont découplés.

Pour une MADA, la relation liant le couple électromagnétique au flux statorique est donnée par :

$$C_{em} = p(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}) \quad (II.1)$$

En partant de cette équation, on peut réaliser un découplage de telle façon que le couple sera commandé uniquement par le courant I_{rq} et le flux par le courant I_{rd} . [64]

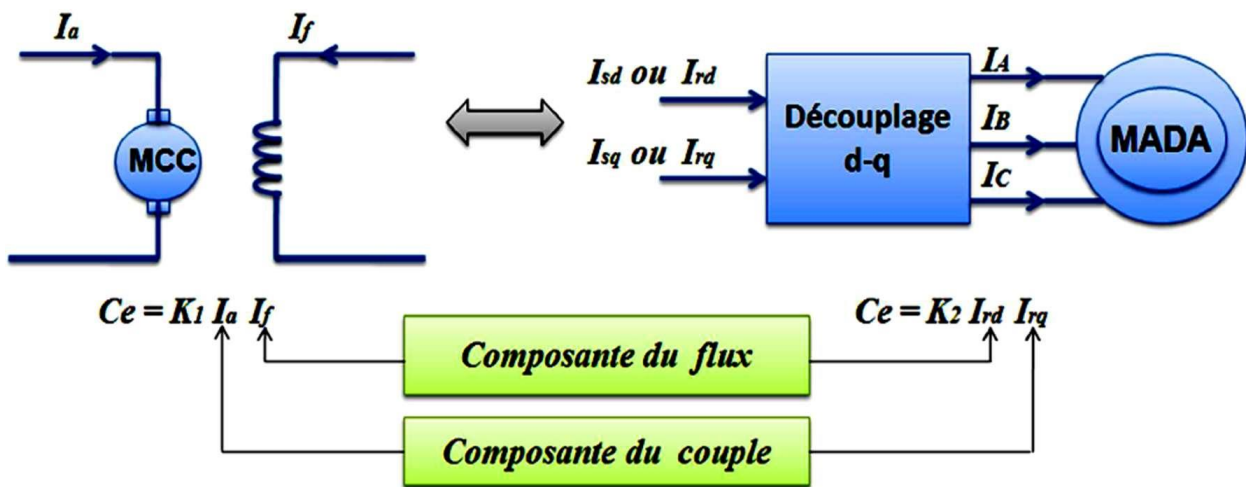


Figure II.5 : Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu [44]

La commande par orientation du flux (figure II.6), consiste à aligner les différents flux de la machine suivant l'axe direct du référentiel tournant, [95] :

- Soit le flux rotorique, donc : $\begin{cases} \phi_{rd} = \phi_r \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases}$
- Soit le flux statorique donc : $\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases}$
- Soit le flux d'entrefer, donc : $\begin{cases} \phi_{gd} = \phi_g \\ \phi_{gq} = 0 \end{cases}$

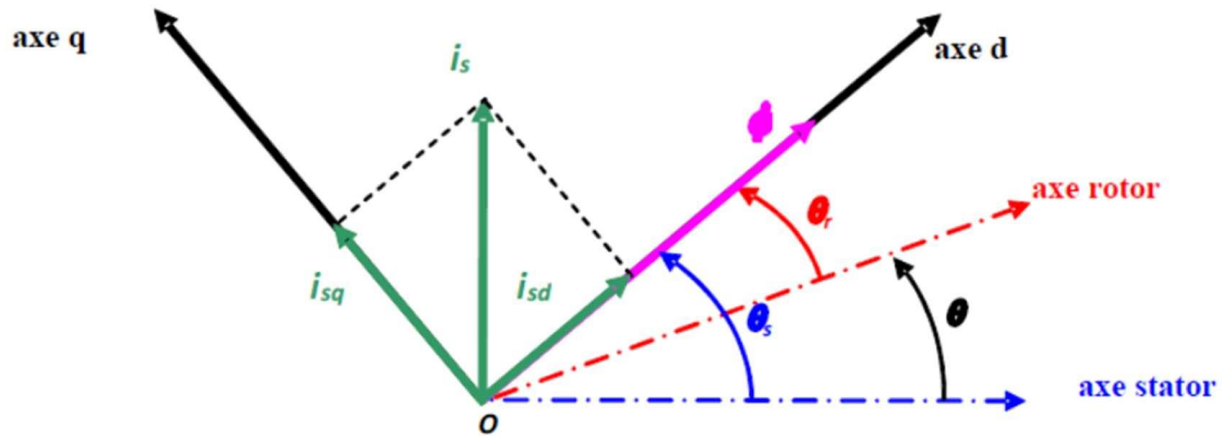


Figure II.6 : Orientation du flux statorique sur l'axe d.

II.8.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

En vue de la commande vectorielle de la MADA, il est plus judicieux de choisir le repère dq lié au champ tournant statorique, lequel est relatif à la fréquence de 50Hz (fréquence du réseau électrique). Par conséquent, le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique.

La composante en quadrature du flux sera annulée, donc :
$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases}$$

Cette commande est décomposée en trois parties :

- Le contrôle du flux,
- Le contrôle des courants statoriques,
- Le découplage ou compensation, [45].

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont annulées [45].

II.8.4 Contrôle indépendant des puissances actives et réactives :

Pour pouvoir contrôler indépendamment des puissances actives et réactives de la GADA, on établit les équations qui lient les valeurs de tensions rotoriques, générés par l'onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [46].

Après orientation du flux statorique, et en le supposant constant (ceci est assuré si le réseau connecté au stator est stable) ; on choisit le repère qui rend le couple électromagnétique produit

par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique en quadrature.

$$\phi_{sd} = \phi_s ; \phi_{sq} = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$C_{em} = p\phi_{sd}I_{sq} \quad (\text{III.3})$$

L'équation du flux (II.29) devient :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

A partir de ce système d'équations, les relations qui lient les courants statoriques aux courants rotoriques seront :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Le flux statorique ϕ_s étant constant, l'équation (IV.3) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant statorique en quadrature I_{sq} . Pour les machines de forte puissance utilisée pour la production éolienne, la résistance des enroulements statoriques peut être négligée, les équations des tensions statoriques (II.13 chapitre II) de la machine se réduisent ainsi à :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Pour un flux constant, l'équation (III.6) devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s = V_s \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant dans l'équation des flux, les courants statoriques par leurs expressions, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r I_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \phi_{rq} = \sigma L_r I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec ces valeurs des flux rotoriques dans les équations des tensions rotoriques, on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \frac{L_m}{L_s} V_s \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

En régime permanent, les courants rotoriques sont constants ; par conséquent leurs dérivées s'annulent. Les nouvelles valeurs des tensions rotoriques seront :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \frac{L_m}{L_s} V_s \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Dans ce système des tensions rotoriques, g correspond au glissement de la machine asynchrone, et le terme $(g \frac{L_m}{L_s} V_s)$ 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. Compte tenu aux hypothèses simplificatrices effectuées dans le cas où $V_{sd} = 0$, les équations des puissances (II.15) deviendront :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Une fois les équations de courants statoriques (III.5) remplacées, on aura :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \left(\frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \right) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

On remplace V_s par sa valeur (III.7), on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Enfin, Le couple électromagnétique aura pour expression :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{\omega_s L_s} V_s I_{rq} \quad (\text{III.14})$$

Compte tenu de toutes les hypothèses et les simplifications précédentes, on peut concevoir le schéma bloc de la MADA qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les

puissances actives et réactives statoriques. L'effet du couplage entre les deux puissances active et réactive, est bien remarqué sur ce bloc [47] :

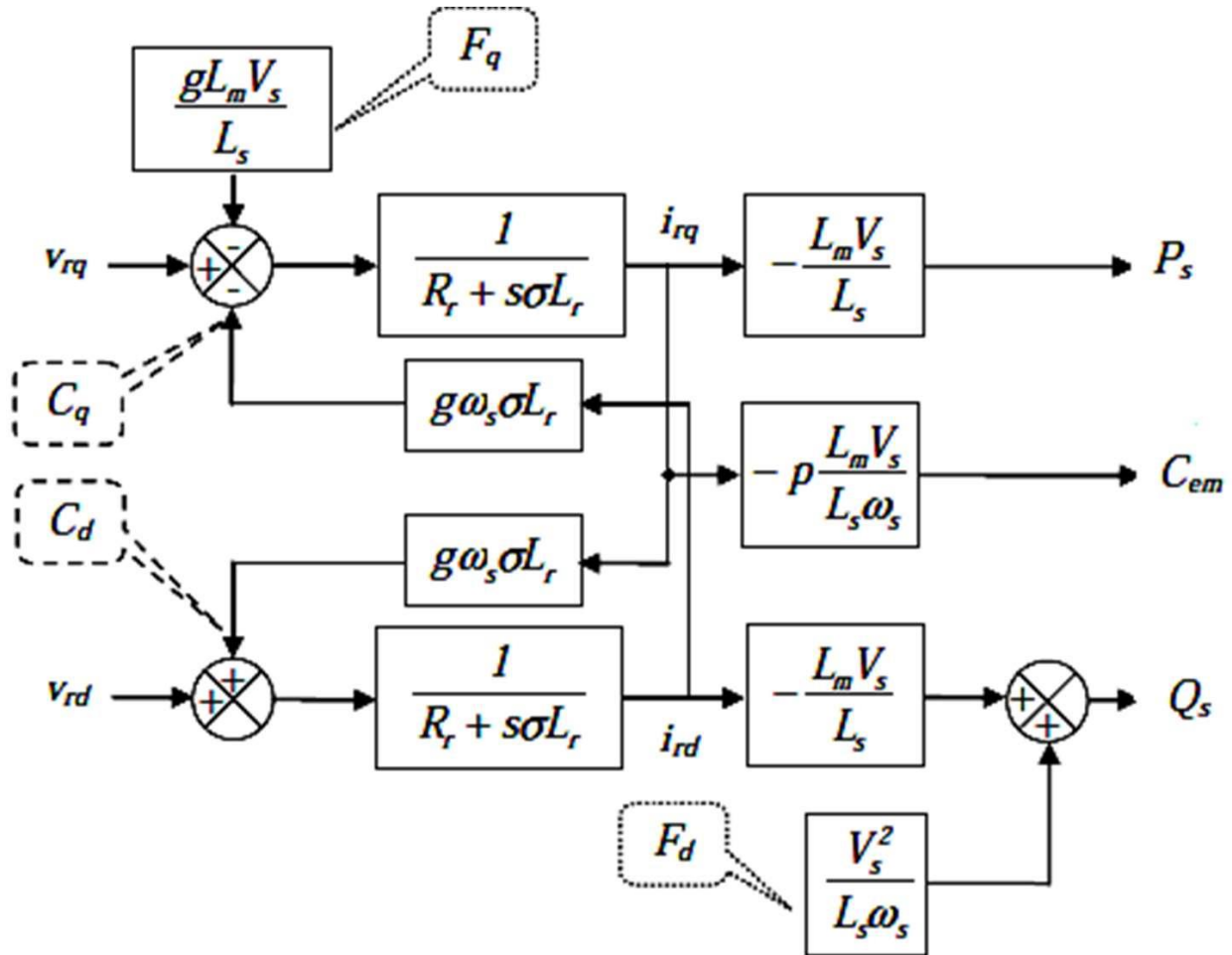


Figure II.7 : Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q , pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs. Ainsi, il est apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [48] :

- La première méthode, appelée méthode directe qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Les régulateurs de puissance contrôleront directement les tensions rotoriques de la machine.

- La deuxième méthode, appelée méthode indirecte, qui consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

II.8.5 Commande directe en puissance active et réactive de la GADA :

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple. Il met 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} .

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{L_m V_s}{L_s}$; dans notre étude, nous considérons que l'éolienne est raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. On ne mettra pas donc des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances [49].

Pour simplifier la commande de la GADA, on considère 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. Toute fois on négligera les termes de couplage entre les deux axes, tout en compensant aussi les perturbations ce qui nous donne le schéma simplifié représenté dans La Figure II.8. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, on trouve [50]:

$$V_{rd} = g\omega_s \frac{\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s L_m}{L_s}} \cdot P_s - \left(\frac{R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s L_m}{L_s}} \cdot p \right) \cdot Q_s + \left(\frac{R_r V_s}{\omega_s L_s} + \left(L_s \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{V_s}{\omega_s L_m} p \right) \quad (\text{III. 15})$$

$$V_{rq} = -g\omega_s \frac{\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s L_m}{L_s}} \cdot Q_s - \left(\frac{R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{\frac{V_s L_m}{L_s}} \cdot p \right) \cdot P_s + g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{V_s}{\omega_s L_m} \quad (\text{III. 16})$$

II.8.5.1 Etude de la régulation pour la commande :

Nous avons utilisé des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique

électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice [51].

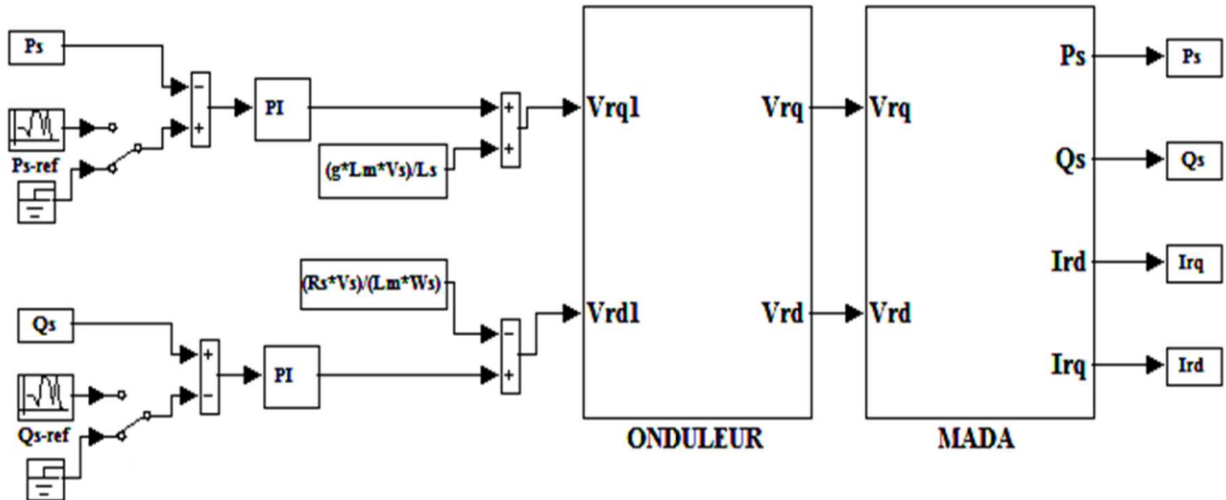


Figure II.8 : Schéma bloc de la commande directe [51].

II.8.5.2 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI) :

Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. La synthèse d'un régulateur Proportionnel-Intégral est étudiée ; ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels [51]. La figure II.8 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la Figure II.9.

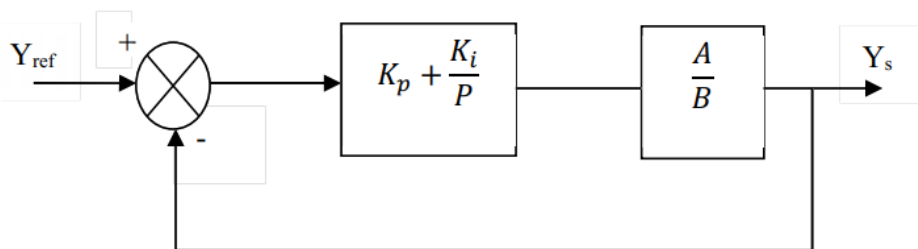


Figure II.9 : Schéma d'un régulateur de type PI [51].

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la façon suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}} \quad (\text{III. 17})$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} \quad (\text{III. 18})$$

Notons toutefois ici 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 dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante [51] :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{L_m V_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{p} \quad (\text{III. 19})$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera donnée par :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{ou} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{L_m V_s} \quad (\text{III. 20})$$

τ_r est le temps de réponse du système que l'on fixera, et qui va correspondre à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécaniques sont importantes. Enfin, on peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{L_m V_s} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{L_m V_s} \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

II.9 Commande vectorielle indirecte :

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position, l'idée est proposée pour la première fois par Hasse [51]. Elle consiste à

estimer la position du vecteur de flux, et à régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire.

Cette méthode a été favorisée par les développements en microinformatique, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine.

II.9.1 Commande indirecte en puissance active et réactive de la GADA :

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine, tout en gardant les mêmes hypothèses et en combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse pour aboutir à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la GADA.

II.9.1.1 Commande sans boucles de puissance :

En gardant les mêmes hypothèses de la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure II.10 où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine [52].

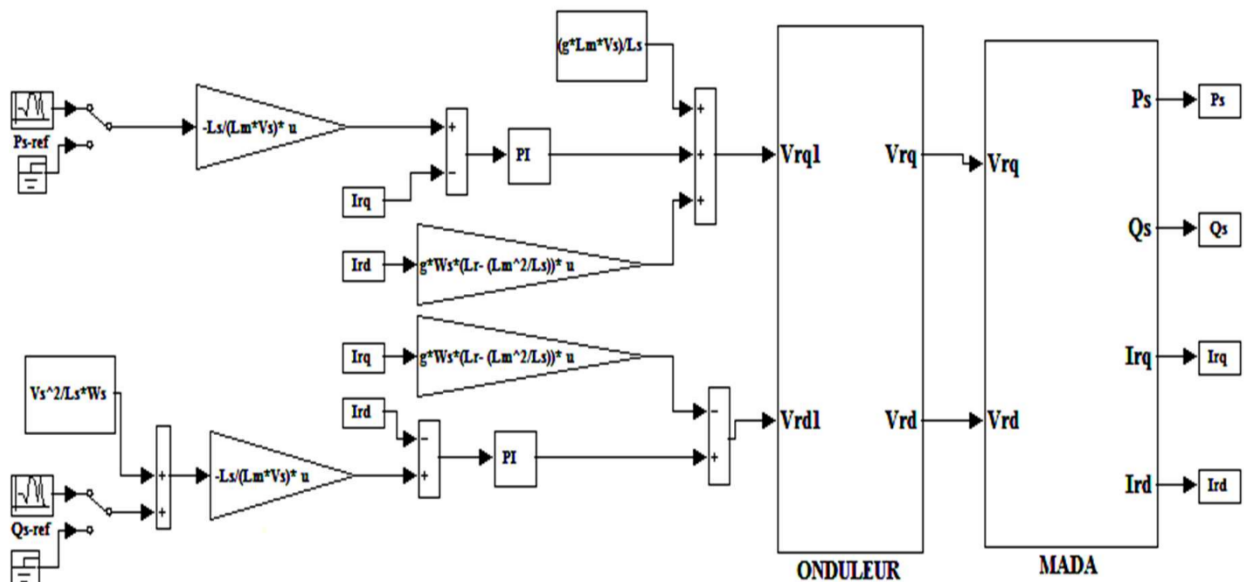


Figure II.10 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance [52]

II.9.1.2 Commande avec boucles de puissance :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des courants afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutirons au schéma bloc présenté à la figure II.11 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'un contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle [51].

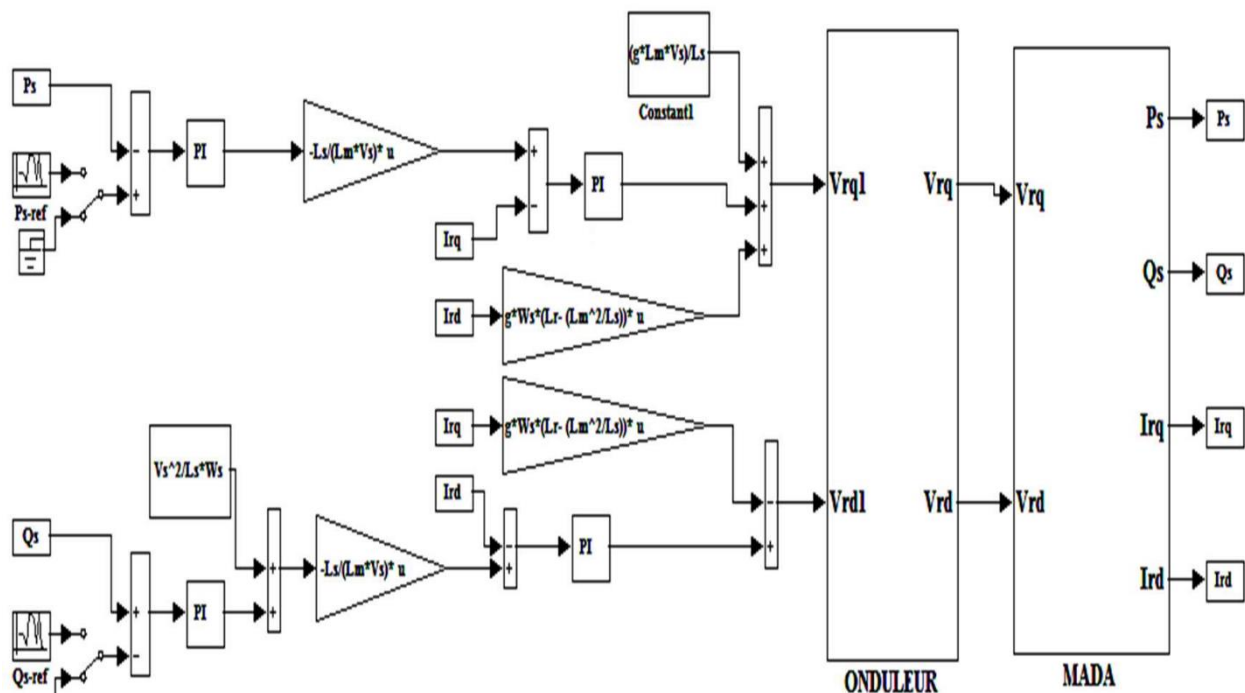


Figure II.11 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance [51].

II.10 Résultats pour la commande vectorielle de la GADA :

Les stratégies de commande en puissances directe et indirecte de la MADA seront validées par simulation numérique en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Afin d'effectuer des tests, et comparer les performances de la régulation pour chaque stratégie de commande, une série d'essais sera également effectuée.

La comparaison s'est basée sur les performances et les caractéristiques statiques et dynamiques des deux méthodes de commande : directe et indirecte. Pour chaque série d'essais, on essaiera de voir le test de poursuite des consignes de puissances imposées au système, ainsi que la sensibilité aux perturbations ; ceci dans le but d'évaluer l'influence de la commande à choisir sur les performances dynamiques et statiques du système ; ce qui conduira à priori de prévoir les avantages et les inconvénients inhérents à l'emploi de telle ou telle méthode de commande. Donc, le but attendu est d'évaluer la méthode qui répond mieux aux exigences telles que :

- Meilleure réponse du système sans dépassement ;
- Erreur statique minimale avec bon rejet de perturbation ;
- Diminution d'harmoniques, en vue d'une meilleure qualité d'énergie.

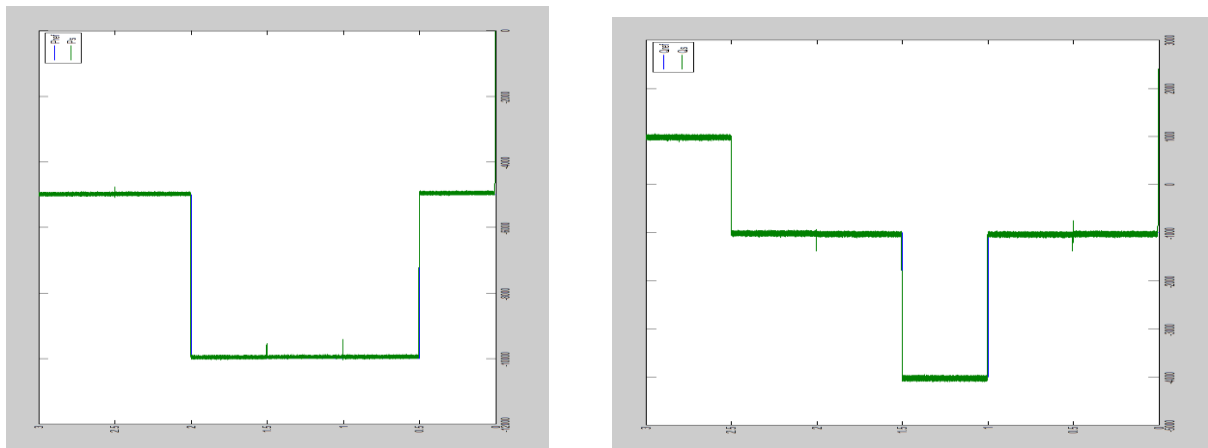


Figure II.12. Puissance Active est Réactive de la commande directe

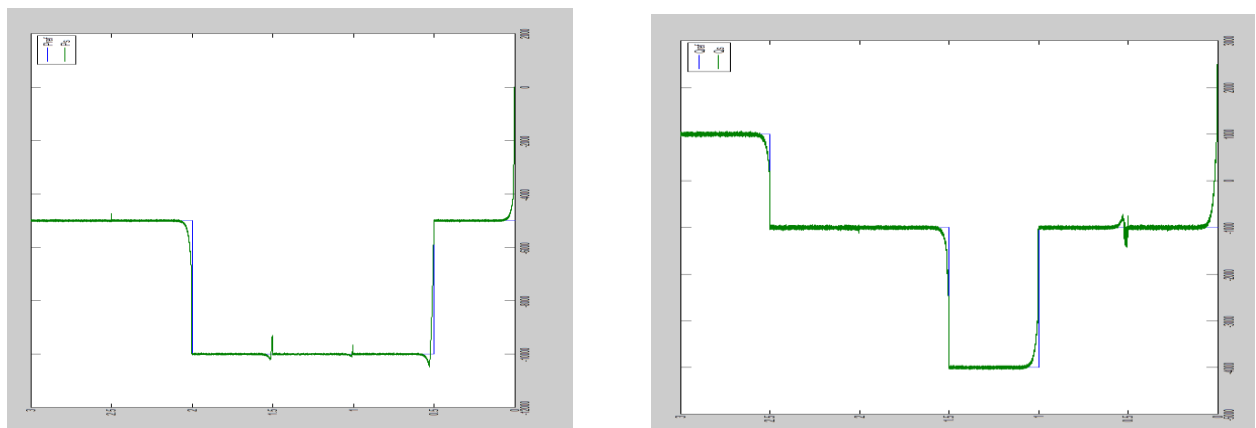


Figure II.13. Puissance Active est Réactive de la commande indirecte

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre un aperçu général sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et ses applications a été donné ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe et les régimes de fonctionnement de cette dernière ont été présentés. La MADA porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

L'aspect modélisation et commande de la MADA a été traité pour son fonctionnement en génératrice (GADA).

Nous avons développé les méthodes de commande vectorielle en puissance de la MADA : la directe qui est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante : et la commande indirecte qui nous permet, en association avec les boucles des puissances, d'avoir un système performant et robuste.

Une synthèse du régulateur PI, a été utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité, nous a permis de déterminer les constantes de temps nécessaires au choix de ces composants.

CHAPITRE III
Commande par mode glissant de la
MADA

III.1 Introduction :

Pour contourner les problèmes liés à l'ajustement des correcteurs PI, on doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. Les lois de commande dite à structure variable connues sous le nom commande par mode glissant constituent une solution à ces problèmes. Dans le but de contrôler séparément la puissance active et réactive statoriques de la GADA qui sont liées directement au courant rotorique (i.e. à la tension rotorique), la commande par mode glissant basée sur un convertisseur NPC à trois niveaux de tension sera étudiée.

III.2 Principe de la commande par mode de glissement :

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 (S) et le mouvement qui se produit tout au long est appelé mouvement de glissement [53].

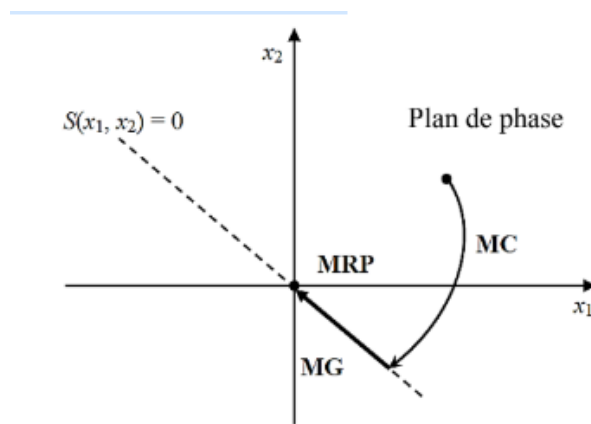


Figure III.1 : Les modes de trajectoire dans le plan de phase.

Si tout point de S est tel qu'il existe des trajectoires d'état hors de S le contenant, alors la surface de commutation S est appelée surface de glissement. La trajectoire dans le plan de phase se compose de trois parties distinctes :

- **Le mode de convergence (MC) :** Durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x)=0$.

- **Le mode de glissement (MG) :** Durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase.
- **Le mode régime permanent (MRP) :** Il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre.

La forme d'une commande à structure variable est donnée par :

$$U_i \begin{cases} U_i^+ & \text{si } S_i(x) > 0 \\ U_i^- & \text{si } S_i(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

U_i ($i=1, \dots, m$): les composantes du vecteur de commande.

III.3 Conception de la commande par mode glissant :

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes, ces étapes sont [54]:

- Le choix de la surface de glissement ;
- L'établissement de condition d'existence ;
- La détermination de la loi de commande.

III.3.1 Choix de la surface de glissement :

J.J. SLOTINE a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne S^* , cette fonction est donnée par l'équation suivante :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad \text{Avec :} \quad (\text{IV.16})$$

$e(x)$: L'écart sur la variable à régler ;

λ_x : Un coefficient positif qui interprète la bande passante du contrôle désiré ;

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

III.3.2 Condition d'existence de convergence :

On réalise la condition de glissement afin de contraindre les points représentatifs de la trajectoire à rester sur la surface de glissement. Nous retenons dans la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système :

- Fonction directe de commutation : C'est la première condition de convergence, elle a été proposée par EMTLIANOV et UTKTN. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} S(\dot{x}) > 0 & \text{lorsque } S(x) < 0 \\ S(\dot{x}) < 0 & \text{lorsque } S(x) > 0 \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

A partir de ces deux inégalités on peut formuler la condition suivante :

$$S(\dot{x})S(x) < 0 \quad (\text{IV.18})$$

Dans cette condition il faut introduire pour $S(x)$ et sa dérivée les valeurs justes à gauche ou à droite de la commutation. Puisque $S(x)$, change de signe aux deux côtés de la droite de commutation. La condition est équivalente à exiger que la dérivée de $S(x)$ doit aussi changer de signe lorsqu'on passe d'un coté à l'autre de la droite [55]. Ceci s'exprime par :

$$\text{sign}S(x, \dot{U}_{max}) = -\text{sign} S(x, U_{min}) \quad (\text{IV.19})$$

- Fonction de LYAPUNOV : Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $U(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e. $U(\dot{x}) < 0$). Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande et l'étude de la robustesse, et garantir la stabilité des systèmes non linéaires [24]. On définit la fonction de LYAPUNOV par :

$$U(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV.20})$$

Et sa dérivée par :

$$U\dot{D}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (\text{IV.21})$$

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

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV.22})$$

La dernière équation signifie 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 dans les deux

côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [56].

III.3.3 Calcul de la commande :

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 [57]. Nous posons donc :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{IV.23})$$

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 : $S(x) \dot{=} 0$. Alors pour la valeur de la commande discontinue U_n :

$$U_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (\text{IV.24})$$

Avec : K est un gain positif.

La figure suivante représente la fonction de la commande discrète de type relais :

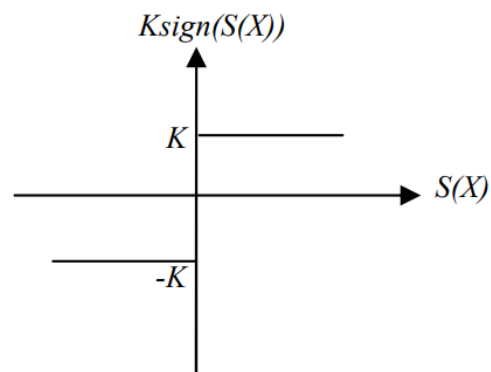


Figure (III.2): Fonction sign (Commande de type relais).

- 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).
- Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu de "chattering".

III.4 Commande par mode glissant de la MADA :

La commande par mode glissant est un contrôle de structure variable qui a été largement utilisé pour contrôler les systèmes non linéaires [58]. Il permet le contrôle malgré les incertitudes et les perturbations. La conception de la commande par mode glissant dépend de trois composantes :

- Choix de la surface de commutation (glissant) Suivi, est une représentation d'un système non linéaire :

$$\dot{Z} = h(Z,t) + k(Z,t) v(Z,t); v \in R^n, v \in R \quad (\text{IV.25})$$

$$S(Z) = \left(\frac{d}{dt} + a \right)^{m-1} e(Z) \quad (\text{IV.26})$$

$$e_r(Z) = Z^d - Z \quad (\text{IV.27})$$

Les deux fonctions h et k sont continues, non linéaires, incertaines et supposées limitées. e_r : l'erreur sur le signal que nous voulons ajuster; Z^d : signal référence; Z : la variable d'état du signal de commande; a : une positive coefficient intuitif; m : l'ordre du système [59].

- La condition de convergence : l'analyse de stabilité de la commande utilisée est vérifiée via la fonction Lyapunov [60].

$$S(Z) \dot{S}(Z) \leq 0 \quad (\text{IV.28})$$

- La loi de contrôle, qui est définie comme suit :

$$V = V^{eq} + V^n \quad (\text{IV.29})$$

V est la variable de contrôle ; V^{eq} est le contrôle équivalent terme; V^n est le terme de commande de commutation.

En général, l'expression du terme de commutation est comme suit:

$$V^n = b \text{sign}(S) \quad (\text{IV.30})$$

b : une constante positive; v^n : commande discontinue

III.4.1 Contrôle de la puissance active est réactive :

➤ Choix de la surface de commutation :

Dans cette partie, nous visons à contrôler les puissances actives et réactives. Leurs surfaces de commutation sont mentionnées en [61] comme (IV.31) et (IV.32) :

$$S(P) = P_s^* - P_s \quad (\text{IV.31})$$

$$S(Q) = Q_s^* - Q_s \quad (\text{IV.32})$$

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_s^* + V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} \left((V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{qr} \right) \quad (\text{IV.33})$$

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_s^* + V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} \left((V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) - R_r I_{dr} \right) \quad (\text{IV.34})$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (\text{IV.35})$$

Nous choisissons les tensions du rotor comme signaux de commande (v). Les termes de contrôle équivalents sont les mêmes que dans les équations (36) et (37) :

$$V_{qr}^{eq} = -\frac{\sigma L_s L_r}{V_s L_m} P_s^* + R_r I_{qr} + (\sigma L_r g w_s) I_{dr} + \frac{g L_m V_s}{L_s} \quad (\text{IV.36})$$

$$V_{dr}^{eq} = -\frac{\sigma L_s L_r}{V_s L_m} Q_s^* + R_r I_{dr} - (\sigma L_r g w_s) I_{qr} \quad (\text{IV.37})$$

- La condition de convergence dans l'équation (28) est vérifiée pour P et Q. [62]
- Droit de contrôle : Les termes de commutation sont exprimés comme dans [63]:

$$V_{qr}^n = K_1 \text{sign}(S(P)) \quad (\text{IV.38})$$

$$V_{dr}^n = K_2 \text{sign}(S(Q)) \quad (\text{IV.39})$$

Les constantes K1 et K2 doivent être positives pour vérifier la stabilité du système.

La figure III.3 présente le schéma fonctionnel de la commande par mode glissant. Plus tard, dans la simulation, nous prendrons : $K_{V_{qr}} = -K_1$ et $K_{V_{dr}} = -K_2$.

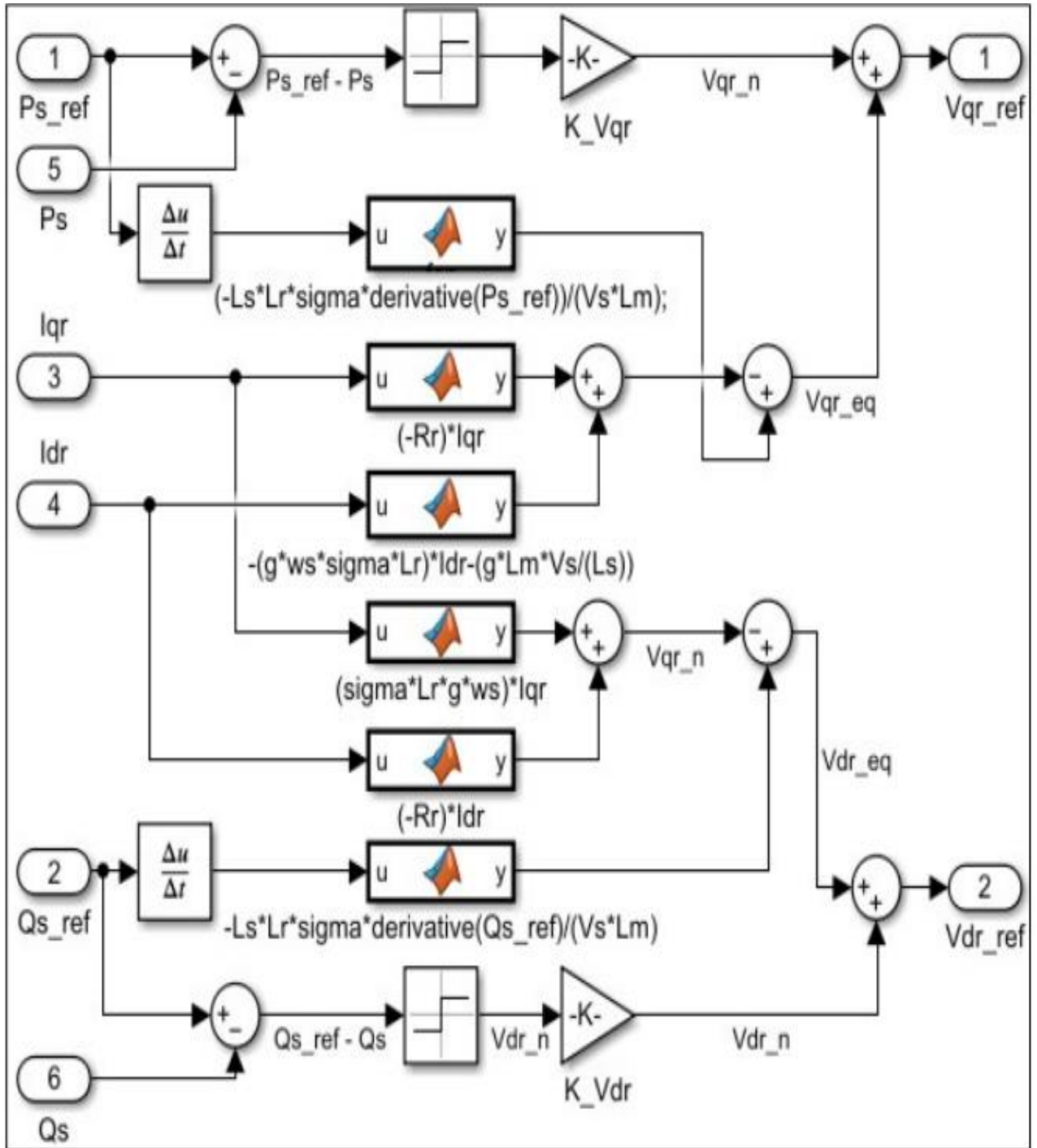


Figure III. 3 : Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant

III.5 Résultats de simulation :

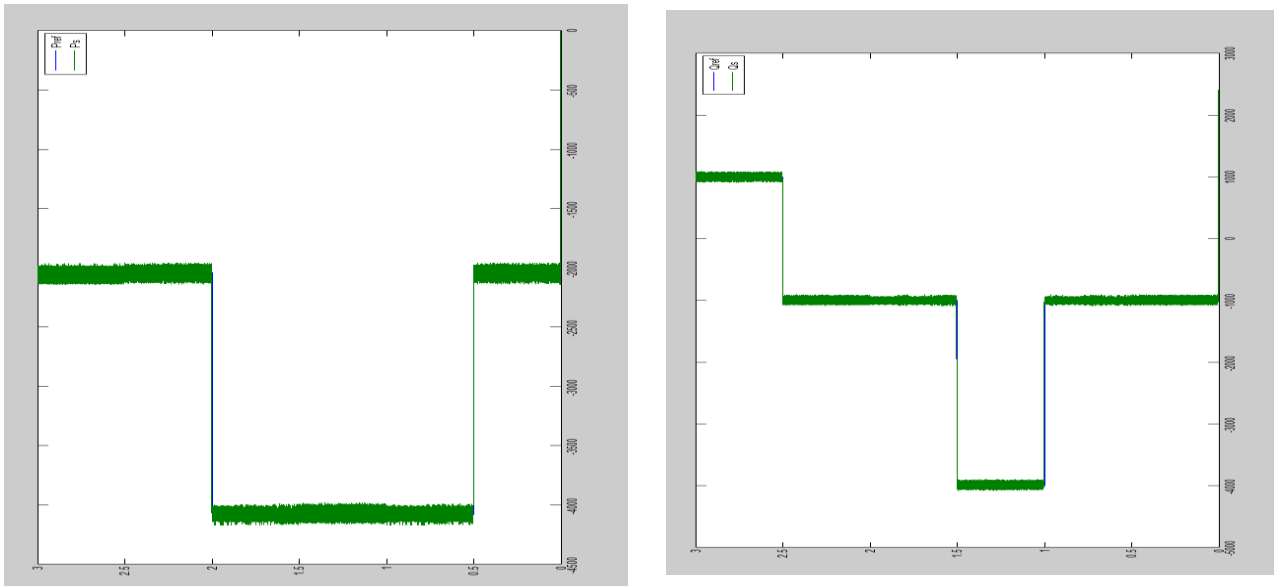


Figure III. 4. Puissance Active est Réactive de la commande directe

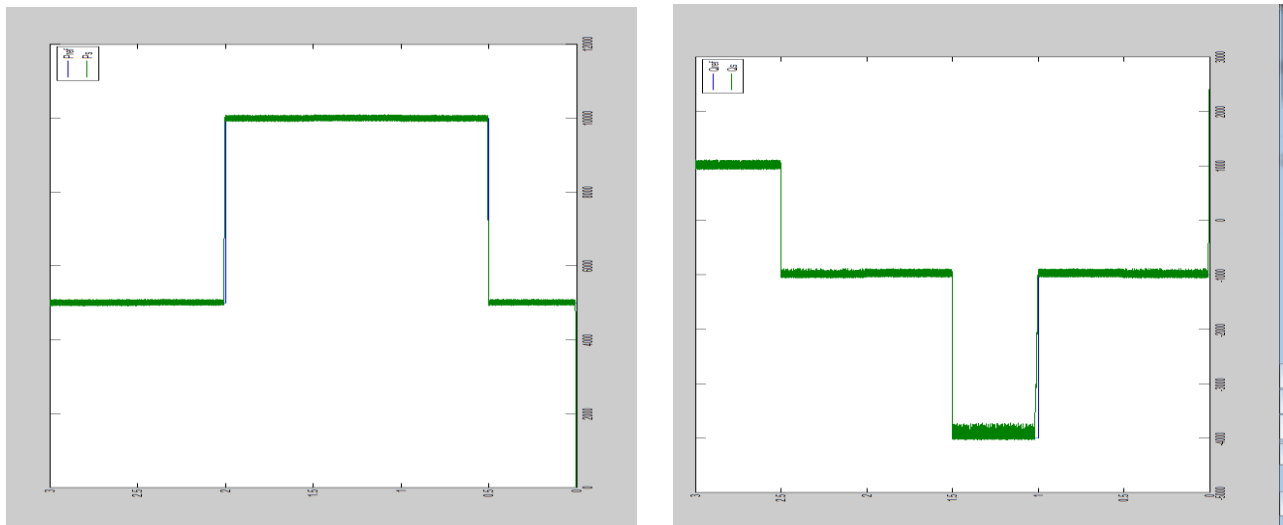


Figure III. 5. Puissance Active est Réactive de la commande indirecte

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande par mode glissant à la GADA dont l'objectif principal étant la régulation des puissances actives et réactives. Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode glissant. Ensuite nous avons abordé la conception de la commande avec ses différentes étapes. Puis on a appliqué cette dernière à la GADA, Enfin, des résultats de simulation ont été présentés.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

Le travail effectué dans ce mémoire avait pour objectif la modélisation des différents composants de la production de l'énergie éolienne et l'étude des différents systèmes de contrôle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Un rappel a été donné sur les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

A cause du fort couplage observé entre la puissance active et la puissance réactive, on a développé la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la MADA, et afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes ont été envisagées : la commande directe et la commande indirecte.

Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux variations des paramètres de la machine.

Ensuite, nous avons introduit une méthode basée sur les systèmes à structure variable. Les conséquences de l'essor des technologies en matière de composants et de développement des calculateurs, ont rendu les commandes à structure variable VSC par mode glissant très sollicitées dans le domaine de la commande des machines électriques.

Cependant, cette technique de commande présente l'inconvénient des oscillations aux hautes fréquences dues à la commande discontinue u , de base (fonction « sign »)

**Références
Bibliographiques**

Références bibliographiques :

- [1]. Association pour la promotion des énergies renouvelables : <http://www.apere.org>
- [2]. S. Mathew, « Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics », Springer, 2006.
- [3]. Vincent Trachsel, « L'énergie éolienne et solaire : alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain ». Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, n° 31, Juillet 2007, Physique.
- [4]. Hiber Wafa : «Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éoliens» Mémoire de Magister, université de Sétif 1, 2013.
- [5]. Mamadou Balde : «Etude d'un compensateur statique pour éolienne à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage». Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Université du Québec à trois Rivières, 2010.
- [6]. Vincent Trachsel «L'énergie éolienne et solaire: alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain? » Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, n° 31, Juillet 2007, Physique
- [7]. BELKACEM Belkacem « Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie d'une source de production décentralisée » en 2019
- [8]. Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables-CDER, <http://portail.cder.dz/spip.php?article4321>.
- [9]. DJOUADI Tayeb et SIRADJ Yassine «Contrôle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée dans un Système à Energie Renouvelable » 2021
- [10]. Naoul Hamdi : «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [11]. S. EL AIMANI : « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat « Ecole Centrale de Lille »,2004.
- [12]. Armand BOYETT, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy 1,2006.

- [13]. Seren KROHN, « Pourquoi l'énergie éolienne » ; Revue de la pollution atmosphérique. juillet-septembre 1997
- [14]. DJERIRI YOUCEF : «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat université DJILLALI LIABES de sidi bel-abbés faculté des sciences de l'ingénieur, 2015.
- [15]. Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016. Revue REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21th century
- [16]. E.Hau, « Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics », second edition. Springer, 2005
- [17]. BONNET François, «Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur», Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 30 Septembre 2008.
- [18]. BELRECHID Raouf, BELMOKHTAR Boualem, «Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pilotée par un convertisseur matriciel appliqué dans une chaîne de production d'énergie électrique (Eolienne)», Thème de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale supérieure Polytechnique d'Alger, Juin 2011
- [19]. Melle ABDELLI Houaria « Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation »
- [20]. M. CHERKAOUI, "Contribution à la Modélisation, à l'Etude et à la Commande des Machines Alternatives. Application à une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1990.
- [21]. Hamdi Naouel « Commande à mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation » Juin 2017
- [22]. Hocine AMIMEUR « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement » 28 / 05 / 2008
- [23]. LOUKAL Keltoum « Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux » 22/04/2017

- [24]. Josep.Pou i.Félix, « Modulation and Control of Three-Phase PWM Multilevel Converters», Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Electronica, November 2002.
- [25]. D. F. Busse, J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel and G. L. Skibinski, “The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, pp. 567-576, 1997.
- [26]. M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez, « Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks »; IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.58, No.4, pp.1081–1095, April 2011.
- [27]. Ministère de l'énergie et des mines, Algérie ;
<http://www.memalgeria.org/français/index.php?page=enr>.
- [28]. A. Dendouga, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) » ; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.
- [29]. Enercon, « World's most powerful wind turbine installed near Emden”, Windblatt, Issue 04, 6- 7, 2007.
- [30]. Panorama de l'électricité renouvelable, 6ème édition : décembre 2015.
- [31]. S. El Aimani, B. François, B. Robyns, F. Minne, « Modeling and Simulation of DoublyNFed Induction Generators for Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network », 10th European Conference on Power Electronics and Applications : (EPE 2003), Toulouse, France, CD, ISBN 90- 75815-07-7, 2 – 04/09/ 2003.
- [32]. Arnaud Michon, Le Sens du vent, notes sur la nucléarisation de la France au temps des illusions renouvelables, Éditions de l'Encyclopédie des Nuisances, 2010.
- [33]. Nikola Celanovic, « Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters », Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2000.
- [34]. N. Akkari, « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2010.

- [35]. Mokrane Smaili, «Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » Thèse de doctorat, de l'université du Québec en Abitibi Témiscamingue, 2013.
- [36]. MASSOUM Sarra « Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat troisième cycle de l'université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [37]. Youcef Djeriri, Hamza Mesai Ahmed , Mohamed Allam « Commande par mode glissant de la GADA associée à un convertisseur à trois niveaux de tension à structure NPC et entraînée par une turbine éolienne » March 4-5, 2019 at ENP- Oran – Algeria
- [38]. H. Aimeurs, « Contribution au Contrôle de la Machine Asynchrone Double Etoile», Thèse de doctorat de l'université de Batna, juin 2012.
- [39]. DAHHOU BRAHIM « Contribution à la commande d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par intelligence artificielle alimenté par onduleur multi-niveaux »
- [40]. Chojaa Hamid¹, A. Derouich² , M. Taoussi² , O. Zamzoum² , A. Hanafi² in 25 mai 2022 “An Improved Performance Variable Speed Wind Turbine Driving a Doubly Fed Induction Generator Using Sliding Mode Strategy” 12Laboratory of Technologies and Industrial Services, Higher School of Technology, USMBA University Fez, Morocco
- [41]. Ouassima El qouarti,^{1,*} Ahmed Essadki,¹ and Tamou Nasser² High order sliding mode control of active and reactive powers for DFIG based Wind turbine <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235101008> 2022
- [42]. El Arabi Rahma, Dahdi Latifa « Commande par mode glissant de MADA utilisé pour la production de l'énergie électrique » Université Ahmed Draia Adrar Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Sciences Techniques, 04/06/2018.
- [43]. Hamouche ABDELKRIM, Malioui ABDELHAMID « Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation(MADA) utilisée dans une éolienne »Université Aboubekr Belkaid 'Tlemcen', le 11/06/2017 .
- [44]. C. Carlos, “Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC, Commande des Moteurs Asynchrones,” Edition 1, Hermes Science Europe, 2000.
- [45]. A. L. Nemmour; “Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de magister de l'université de Batna 2002.

- [46]. F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de doctorat de l’université de Nantes, 2003.
- [47]. H. Bühler, “Réglage par mode de glissement,” Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.
- [48] Bartolini, G., Ferrera, A., Levant, A., Usai, E. "On second order sliding mode controllers". Lecture notes in control and information sciences, vol. 247, pp. 329-350, 1999.
- [49] A. Levant, "Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique", Automatica, Vol. 34, No. 3, pp. 379-384, 1998.
- [50] A. Levant. "Universal SISO sliding-mode controllers with finite-time convergence". IEEE Transactions on Automatic Control, 46(9):1447-1451, 2001.
- [51] A. Levant. "Principles of 2-Sliding Mode Design".2007.
- [52] G. Bartolini, A. Ferrara, et E. Usai. "Chattering Avoidance by Second Order Sliding Mode control". IEEE transactions on Automatic Control, Vol. 43, no2, 1998.
- [53] A. Levant. "Quasi-continuous high-order sliding-mode controllers". IEEE Transactions on Automatic Control, 50(11), 1812-1816, 2005.
- [54] Q. P. Ha, Member, IEEE, Q. H. Nguyen, D. C. Rye, Member, IEEE, and H. F. Durrant-Whyte. "Fuzzy Sliding-Mode Controllers with Applications". IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 48, NO. 1, FEBRUARY 2001.
- [55] F. Barrero, A. González, A. Torralba, E. Galván, and L. G. Franquelo. "Speed Control of Induction Motors Using a Novel Fuzzy Sliding-Mode Structure". IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 10, NO. 3, JUNE 2002.
- [56] Chi-Ying Lianga, Juhng-Perng Su. "A new approach to the design of a fuzzy sliding mode controller". Fuzzy Sets and Systems 139 111–124 , 2003.
- [57] A. Isidori, «Nonlinear Control Systems», Springer-Verlag Communication and Control Engineering, ISBN 3-540-19916-0 3rd edition, 1995.
- [58] S. Benahdouga, «Commande par mode glissant d’ ordre supérieur application à un réseau électrique», Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.

[59] V. Bregeault, «Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants», Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2010.

[60] I. Deghboudj, «Commande des systemes non lineaires par mode glissant d' ordre supérieur », Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013.

[61] W. Perruquetti and J. P. Barbot, «Sliding mode control in engineering», Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.

[62] A. Levant «Arbitrary-order sliding modes with finite-time convergence», in Proc. of the 6th IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems, Alghero, Italy, 1998.

[63] H. Bühler, «Réglage par mode de glissement », traité d' électricité, 1ère édition, presses, 199

Annexes

Liste des paramètres du système éolien [23] :

Paramètres de la turbine éolienne	Valeurs attribuées
Résistance statorique R_s	0.012 Ω
Résistance rotorique R_r	0.021 Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136 H
Inductance mutuelle L_m	0.0135 H
Nombre de paires de pôles P	2
Glissement g	0.03
Tension nominale statorique V_s	398/690 v
Fréquence nominale statorique f_1	50 Hz
Tension nominale rotorique V_r	225/389 V
Fréquence nominale rotorique f_2	14 Hz