

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



FACULTÉ DES TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique et Energie Renouvelable

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Thème

Etude de la commande d'une GADA

Présenté par :

M. ANDJOUH Islam

M. YUCEF KHODJA Abdelhadi

Encadré par :

Dr. ABDELLI Radia

Dr. HASSAINI Faycal

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENT

*Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé et courage
pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à formuler l'expression de notre profonde reconnaissance à notre
encadreur, Dr ABDELLI Radia et le Co encadrant Dr HASSAINI Faycel pour
leurs pertinents conseils et leurs orientations ainsi que leurs disponibilités tout
au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous remercions également tout le personnel du département Génie Électrique
pour leur sérieux, gentillesse et leurs collaborations.*

*Nous tenons aussi à remercier l'ensemble Des membres du jury qui ont fait
l'honneur de juger ce travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin afin que
notre travail puisse voir le jour.*

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et qui ont veillé sur moi pour que rien ne manque durant tout mon parcours universitaire.

A mes chers frères HICHAM et SAID.

A mes sœurs INAS, AYA et HASSIBA.

A toute ma famille de loin ou de près pour leurs soutiens et aides quelques soit la nature.

A mes neveux AXEL et WATIN.

A mes chers amis et collègues « NABIL, HAKOU, DJALLAL, SAMY MAMINE, AZZEDDINE, MAMOUNE, BILAL, MOURAD, ADEL, FAHEM ».

A l'autre pair indispensable dans la réalisation de ce mémoire : Mon binôme ABDELHADI.

Enfin, je ne saurai remercier tout le monde, toute personne que j'ai croisée ou j'ai connu durant toute ma vie estudiantine, Merci du fond du cœur.

ANDJOUH ISLAM.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et qui ont veillé sur moi pour que rien ne manque durant tout mon parcours universitaire.

A mes chers frères LOUTFI, SOUHIL.

A ma sœur FERIAL.

A toute ma famille de loin ou de près pour leurs soutiens et aides quelques soit la nature.

A mes chers et amis collègues « BILLAL, LOO, REDHA, SAMIR, DIGA, ISSAM, MAMINE, AZZEDDINE, MOURAD, MAMOUNE ».

A l'autre pair indispensable dans la réalisation de ce mémoire : Mon binôme ISLAM.

Enfin, je ne saurai remercier tout le monde, toute personne que j'ai croisée ou j'ai connu durant toute ma vie estudiantine, Merci du fond du cœur.

YOUCEF KHODJA ABDELHADI.

Table des matières

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I : Généralités sur les éoliennes et la GADA

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie éolienne.....	3
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.3. Les éoliennes.....	4
I.3.1. Principe de fonctionnement de l'éolienne.....	4
I.3.2. Les principales composantes d'une éolienne.....	5
I.3.3. Différents types des éoliennes	5
I.3.4. Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable	7
I.3.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.4. Conversion « vent → électricité »	8
I.5. Présentation et le principe de fonctionnement de la GADA.....	9
I.5.1. Description des composants de la GADA	9
I.5.2. Différentes structures de GADA.....	10
I.5.3. Principe de fonctionnement de la GADA dans les éoliennes	12
I.5.4. Domaines d'application de la GADA	13
I.5.5. Types d'alimentation de la GADA	14
I.5.6. Avantages et inconvénients du GADA	14
I.6. Conclusion	15

CHPITRE II : Modélisation et simulation de la turbine et la GADA

II.1. Introduction	16
II.2. Modélisation de la turbine	16
II.2.1. Modèle du multiplicateur.....	18
II.2.2. Maximisation de puissance (MPPT).....	19
II.2.3. Equation dynamique de l'arbre.....	19
II.2.4. Caractéristique de puissance.....	20
II.2.5. Simulation de la turbine.....	21
II.2.5.1. Interprétation des résultats.....	22
II.3. Modélisation de la MADA	23
II.3.1. Dans le repère triphasé	23

II.3.1.2. Equation magnétique	24
II.3.2. Dans la transformée de Park	24
II.3.3. Modèle de MADA dans le référentiel (d, q).....	26
II.4. Modèle final de la MADA.....	26
II.4.1. Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA.....	26
II.4.2. Représentation du modèle de la MADA sous forme d'état.....	27
II.4.2.1. Expression de couple	29
II.4.2.2. Expressions des puissances actives et réactives	30
II.5. Simulation du modèle de la MADA (fonctionnement moteur).....	30
II.5.1. Interprétation des résultats.....	34
II.6. Conclusion	34

CHAPITRE III : La commande vectorielle d'une GADA

III.1. Introduction	35
III.2. Principe de la commande vectorielle	35
III.3. Les différentes techniques de la commande vectorielle	36
III.4. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	36
III.5. Établissement du modèle de la GADA	37
III.5.1. Choix de référentiel pour le modèle diphasé.....	37
III.5.1.1. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique	38
III.5.1.2. Relation entre les puissances statoriques et les courant rotoriques	39
III.5.1.3. Relation entre les tensions rotoriques et les courant rotoriques	39
III.6. Commande vectorielle de la GADA avec un onduleur à deux niveaux.....	41
III.6.1. Modélisation de l'onduleur à MLI	41
III.6.2. Commande par modulation largeur d'impulsion MLI	42
III.7. Types de régulateurs utilisés et calcul du régulateur PI	43
III.8. Simulation et interprétations des Résultats de la commande	44
III.8.1. Résultats de la simulation.....	44
III.8.2. Interprétation des résultats	48
III.9. Conclusion.....	48

CHAPITRE IV : La commande par mode glissant d'une GADA

IV.1. Introduction	49
VI.2. Historique de la commande par mode glissant	49
VI.3. Principe de la commande par mode de glissement	49
IV.4. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant	50
IV.5. Conception de la commande par mode glissant.....	51
IV.5.1. Choix de la surface de glissement.....	51
IV.5.2. Conditions l'existence et de convergence au mode glissant.....	52
IV.5.3. La détermination de la loi de commande	53
IV.6. Applications de la commande par mode glissant à la GADA.....	55
IV.6.1. Modèle de la génératrice asynchrone double alimentation GADA	56
IV.6.2. Choix des surfaces de glissements	57
IV.6.3. Conditions de convergences.....	57
IV.6.4. Loi de commande par mode glissant.....	57
IV.7. Simulation et interprétations des Résultats de la commande	60
IV.7.1. Résultats de la simulation	60
IV.7.2. Interprétation des résultats	64
IV.8. Teste de robustesse.....	65
IV.8.1. Simulation de teste de robustesse pour la C.V et la C.M.G	65
IV.8.2. Comparaison des interprétations des résultats des deux commandes	70
IV.9. Conclusion	70

Liste des symboles

Nomenclature

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
SCE	Système de Conversion Eolien.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
FTBO	Formulation de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
PI	Proportionnel Intégral.
MRP	Mode de Régime Permanent.
MC	Mode de convergence.
MG	Mode de glissement.
CV	Commande vectorielle.

Symboles

V	Vitesse de vent.
S	Surface circulaire balayée par la turbine.
ρ	Représente la densité de l'air
P_v	Puissance cinétique du vent.
P_{aer}	Puissance aérodynamique.
R	Rayon des pales de la turbine.
$C_p(\lambda, \beta)$	Rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.
λ	Rapport de vitesse.
Ω_t, Ω_{mec}	Vitesse de la turbine et vitesse mécanique de la machine.
β	L'angle de calage des pales.
C_{aer}, C_g	Sont respectivement les couples de l'aérodynamique et du générateur.
G	Gain du multiplicateur.

Liste des symboles

λ_{opt}	Rapport de vitesse optimale de la turbine.
C_{Pmax}	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance.
Jt	Moment d'inertie de la turbine.
f	Coefficient de frottements visqueux.
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions statoriques suivant le repère (a, b, c)
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions rotoriques suivant le repère (a, b, c).
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courants statoriques suivant le repère (a, b, c).
I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}	Courants rotoriques suivant le repère (a, b, c).
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	Flux statoriques suivant le repère (a, b, c).
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Flux rotoriques suivant le repère (a, b, c).
L_s, L_r	Sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
M	Inductance cyclique mutuelle.
M_s, M_r	Inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor.
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine.
C_r	Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.
I_s, I_r	Courants de phase statorique et rotorique respectivement.
I_{sd}, I_{sq}	Courants statoriques directe et quadrature dans le repère de PARK.
I_{rd}, I_{rq}	Courants rotoriques directe et quadrature dans le repère de PARK.
φ_s, φ_r	Respectivement flux statorique et rotorique.
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statoriques direct et quadrature du système.
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotoriques direct et quadrature du système.
V_{sd}, V_{sq}	Tensions statoriques directe et en quadrature du système diphasé.
V_{rd}, V_{rq}	Tensions rotoriques directe et en quadrature du système diphasé.
ω_s, ω_r	Pulsation statorique et rotorique.
P_s, Q_s	Puissance active et réactive statorique.
P_r, Q_r	Puissance active et réactive rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.

Liste des symboles

$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
J	Moment d'inertie des parties tournantes.
g	Glissement.
θ	Angle entre le système d'axes (d, q) et le système d'axes (O_a, O_b, O_c).
ω	Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système triphasé.
$[P(\theta_a)]$	Matrice transformation de Park.
$[P(\theta_a)]^{-1}$	Matrice de transformation de Park inverse.
P	Nombre de paires de pôles.
K_p	Facteur de proportionnalité.
K_i	Facteur intégral.
$S(x)$	Surface de glissement.
$V(x)$	Fonction de Lyapunov.
σ	Coefficient de dispersion de Blondel.

Table de figures

CHAPITRE I : Généralités sur les éoliennes et la GADA

Figure.I.1 : Principaux organes du système de conversion éolienne	4
Figure.I.2 : Conversion de l'énergie éolienne	4
Figure.I.3 : Constitution d'une éolienne	5
Figure.I.4 : Eolienne a axe vertical	6
Figure.I.5 : Eolienne a axe horizontal	6
Figure.I.6 : GADA avec pont à diodes et pont à thyristors	9
Figure.I.7 : GADA avec cyclo convertisseur	10
Figure.I.8 : GADA avec convertisseurs MLI	11
Figure.I.9 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne	12

CHAPITRE II : Modélisation et simulation de la turbine et la MADA

Figure.II.1 : Schéma de la turbine éolienne	16
Figure.II.2 : Coefficient aérodynamique en fonction du rapport de vitesse de la turbine	17
Figure.II.3 : Caractéristique de coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ)	18
Figure.II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine	19
Figure.II.5 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne	19
Figure.II.6 : La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine	20
Figure.II.7 : La vitesse mécanique de la turbine	20
Figure.II.8 : La vitesse de vent	21
Figure.II.9 : Le coefficient de puissance	21
Figure.II.10 : Position des axes statoriques et rotoriques dans l'espace électrique	22
Figure.II.11 : Schéma de transformation de Park	25
Figure.II.12 : la vitesse électrique	30
Figure.II.13 : Le couple électromagnétique	30
Figure.II.14 : Les courants statoriques triphasés avec zoom	30
Figure.II.15 : Les courants rotoriques triphasés avec zoom	31
Figure.II.16 . Tension d'alimentation statorique et rotorique	31

CHAPITRE III : La commande vectorielle d'une GADA

Figure.III.1 : Orientation du flux statorique sur l'axe 'd'	35
Figure.III.2 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA	38
Figure.III.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé	39
Figure.III.4 : Schéma bloc de régulateur PI	41
Figure.III.5 : le couple électromagnétique	42
Figure.III.6 : Les courants statoriques (direct et quadrature)	43
Figure.III.7 : Les courants statoriques des phases A, B et C	43
Figure.III.8 : Les courants rotoriques des phases A, B et C	44
Figure.III.9 : Les flux statorique des phases A, B et C	44
Figure.III.10 : Les flux rotorique des phases A, B et C	44
Figure.III.11 : Les puissances actives et réactives statoriques suivant leurs références avec zoom	45

CHAPITRE III : La commande vectorielle d'une GADA

Figure.IV.1 : Mode de glissante réel	48
Figure IV.2 : Commande équivalente	52
Figure IV.3 : Fonction sign (Commande de type relais)	52
Figure IV.4 : Fonction de saturation (Commande adoucie)	53
Figure.IV.5 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant	58
Figure.IV.6 : La puissance active et réactive statorique	59
Figure.IV.7 : Le couple électromagnétique	59
Figure.IV.8 : Les courants rotorique (direct et quadrature)	60
Figure.IV.9 : Le courant statorique des phases A, B et C	60
Figure.IV.10 : Le courant rotorique des phases A, B et C	60
Figure.IV.11 : Les flux statorique naturel	60
Figure.IV.12 : Les flux rotorique naturel	61
Figure.IV.13 : Les courants statorique (direct et quadrature)	61
Figure.IV.14 : Les puissances actives et réactives statoriques suivant leurs références avec zoom	61

Table de figures

Figure.IV.15 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)	63
Figure.IV.16 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)	64
Figure.IV.17 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)	65
Figure.IV.18 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)	66
Figure.IV.19 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)	67

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie éolienne est devenue une source d'énergie propre et renouvelable très attractive dans le contexte actuel de transition énergétique. Les éoliennes sont devenues des installations courantes dans le paysage, tant urbain que rural, offrant une alternative prometteuse aux énergies fossiles. Parmi les différentes technologies d'éoliennes utilisées, on retrouve les GADA. Ses dernières se démarquent par leur efficacité et leur capacité à fournir une production d'électricité stable et de qualité [1].

Ce mémoire se concentre sur l'étude de la commande d'une génératrice asynchrone double alimentation (GADA) utilisée dans les éoliennes, qui est un système complexe qui joue un rôle crucial dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité [2]. Comprendre le fonctionnement et développer des stratégies de commande appropriées pour les GADA revêt donc une importance capitale pour améliorer leur rendement et leur fiabilité.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant des aspects spécifiques de la commande d'une GADA. Le premier chapitre propose une introduction générale à la GADA et aux éoliennes. Il présente les caractéristiques générales des éoliennes, leur rôle dans la production d'énergie éolienne et l'importance de la GADA dans ce contexte.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation de la turbine et de la machine asynchrone double alimentation (MADA). Une compréhension approfondie de la dynamique de ces composants est essentielle pour concevoir des stratégies de commande efficaces [30]. Ce chapitre explore donc les modèles mathématiques et les outils de simulation par MATLAB utilisés pour analyser le comportement de la turbine et de la MADA.

Le troisième chapitre aborde la commande vectorielle d'une GADA. Cette technique de commande classique permet d'optimiser la performance de la GADA en régulant le flux de puissance entre le réseau électrique et la turbine. De plus, on l'associe avec un onduleur commandé en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour avoir un contrôle indépendant des puissances active et réactive générées par la génératrice [11]. La méthode et l'algorithme de commande vectorielle sera étudié en détail, mettant en évidence ces avantages.

Enfin, le quatrième chapitre se concentre sur la commande par mode glissant et la comparaison entre cette dernière et la commande vectorielle d'une GADA. Cette approche de

Introduction générale

commande non linéaire offre une robustesse accrue face aux perturbations externes et aux variations des conditions de fonctionnement [36]. Les principes théoriques de la commande par mode glissant seront explorés, et la stratégie de commande spécifique pour une GADA sera développée et évaluée.

En dernier lieu, ce mémoire vise à fournir une étude approfondie de la commande d'une GADA utilisée dans les éoliennes. Les différentes stratégies de commande étudiées dans les chapitres suivants contribueront à améliorer l'efficacité, la stabilité et la fiabilité des éoliennes, favorisant ainsi une exploitation optimale de l'énergie éolienne dans notre quête d'un avenir énergétique plus durable.

CHAPITRE I

**GENERALITES SUR LES EOLIENNES ET LA
GADA**

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est devenue une composante majeure de la transition mondiale vers des sources d'énergie renouvelable. Les parcs éoliens se multiplient, exploitant la puissance du vent pour générer de l'électricité propre et durable. Au cœur de cette transformation se trouve une technologie essentielle : la génératrice asynchrone double alimentation (GADA).

Nous commencerons par explorer les principales caractéristiques des éoliennes, ces structures imposantes dotées de pales qui captent l'énergie cinétique du vent. Nous aborderons les aspects clés de leur conception.

Ensuite, nous explorerons en détail le fonctionnement et les avantages de la GADA dans le contexte spécifique de l'énergie éolienne. Nous examinerons son principe de fonctionnement basé sur l'induction électromagnétique et son rôle crucial dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité utilisable.

I.2. Energie éolienne

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

Le SCE, également connu sous le nom de Système de Conversion Éolien, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite disponible sur un arbre de transmission. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à une génératrice, comme illustré dans la (Figure.I.1) [3].

Le SCE se compose de plusieurs éléments, dont un générateur électrique qui est entraîné par une turbine éolienne via un multiplicateur. Il comprend également un système de commande, un convertisseur statique, un transformateur et enfin un réseau électrique.

L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie "renouvelable" car elle n'est pas épuisable. Elle est géographiquement répartie de manière diffuse et présente une corrélation saisonnière significative. Par exemple, la demande d'énergie électrique est généralement plus élevée en hiver, période où la vitesse moyenne du vent est souvent la plus élevée. De plus, l'énergie éolienne ne génère aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Cependant, elle est variable dans le temps et sa capture reste complexe, nécessitant l'utilisation de grands mâts et de pales (jusqu'à 60 mètres pour les éoliennes de plusieurs mégawatts) installés dans des zones dégagées afin d'éviter les turbulences [4].

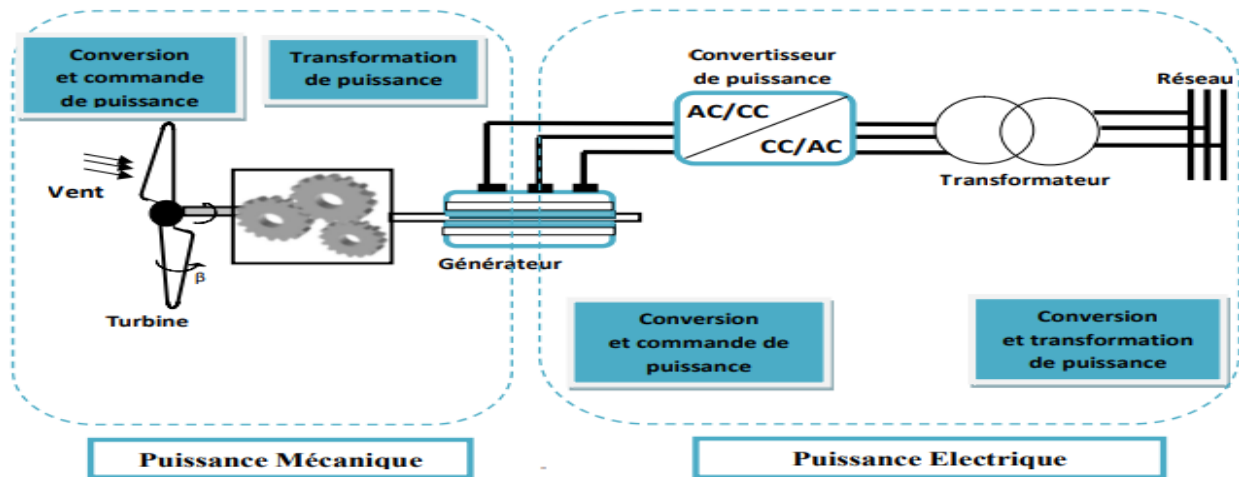


Figure.I.1 : Principaux organes du système de conversion éolienne

I.3. Les éoliennes

I.3.1. Principe de fonctionnement de l'éolienne

Le fonctionnement général de l'éolien est illustré par la (figure.I.2). Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique [5].
- La génératrice convertit, enfin l'énergie mécanique en énergie électrique, transmise ensuite directement ou indirectement au réseau électrique.

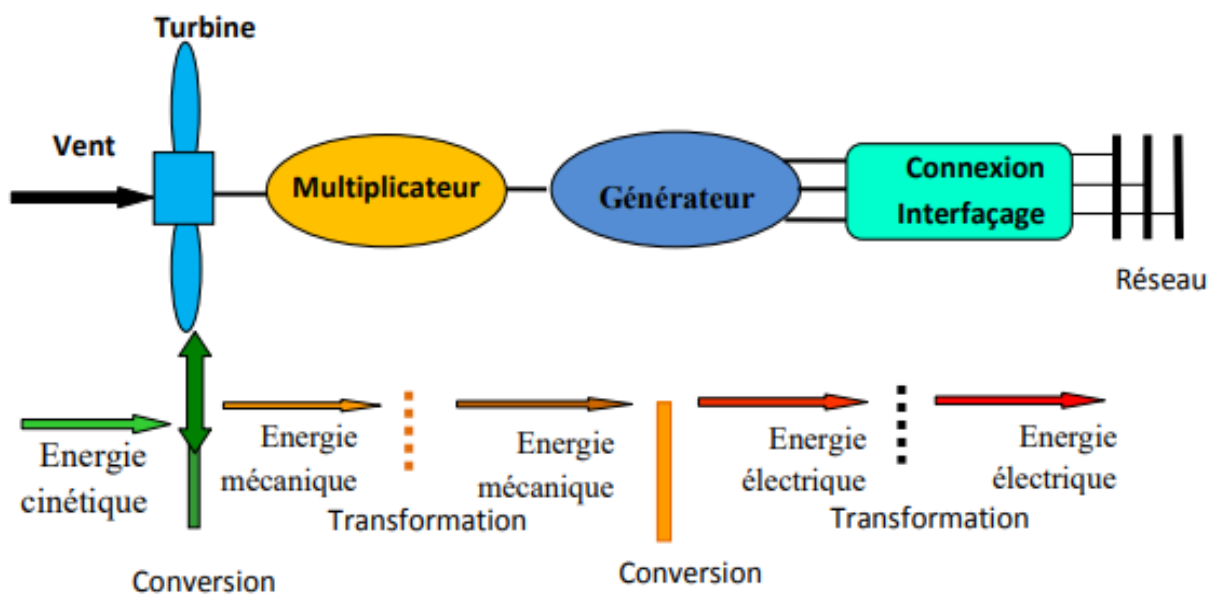


Figure.I.2 : Conversion de l'énergie éolienne

I.3.2. Les principales composantes d'une éolienne

Le système éolien est généralement constitué des éléments principaux comme le montre dans la figure suivante [6] :

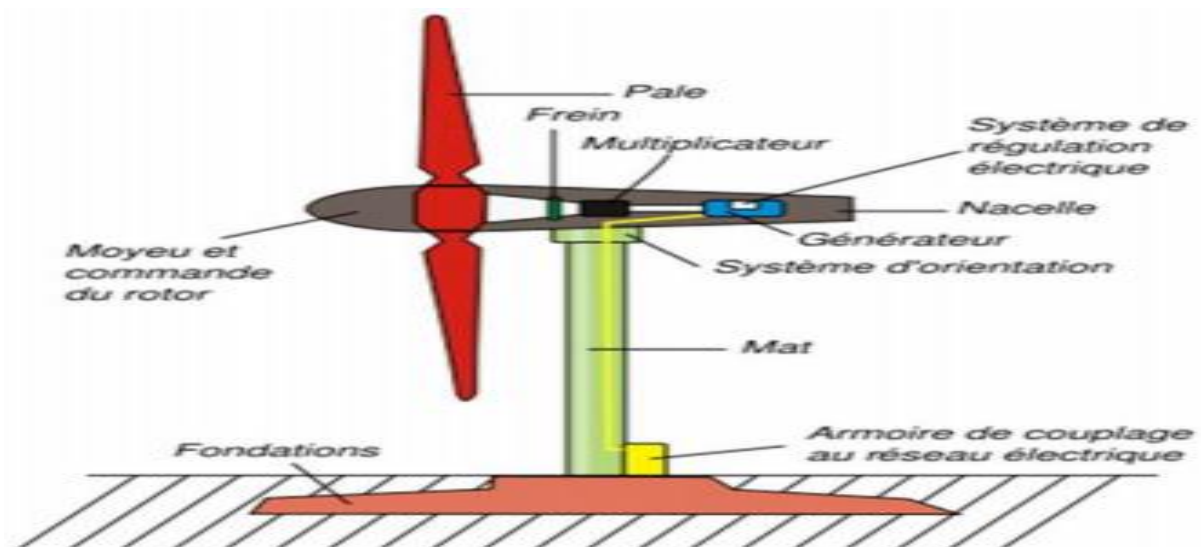


Figure.I.3 : Constitution d'une éolienne

- **Un mât** permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.
- **Une hélice** de trois pales généralement, montée sur l'axe horizontal de l'éolienne
- **Une nacelle** montée au sommet du mât et constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie.
- Une cabine située au pied de l'éolienne et qui permet de se connecter au réseau domestique dans le cas d'une utilisation individuelle.

I.3.3. Différents types des éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal :

- **Les éoliennes à axe vertical** : Des études ont été menées sur ce type d'éolienne qui présente certaines caractéristiques avantageuses. Contrairement aux autres éoliennes, celle-ci ne nécessite pas de système pour orienter les pales et elle dispose d'une partie mécanique, comprenant un multiplicateur et une génératrice, située au niveau du sol. Cette configuration facilite les opérations de maintenance. Cependant, certaines de ces éoliennes requièrent une impulsion initiale pour démarrer et le mât, qui est souvent très

lourd, est soumis à d'importantes contraintes mécaniques. Ces contraintes ont poussé les fabricants à pratiquement abandonner ces générateurs éoliens [7].



Figure.I.4 : Eolienne a axe vertical [8]

- **Les éoliennes à axe horizontal :** Ce type des éoliennes maintiennent son orientation face au vent, tout comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour afin de capturer une plus grande quantité d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont de ce type.

Ce choix présente plusieurs avantages, tels qu'une faible vitesse de démarrage (cut-in) et un coefficient de puissance relativement élevé, qui représente le rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement (Mathew, 2006). Cependant, cela implique l'installation de la boîte de vitesses et de la machine électrique en haut de la tour, ce qui entraîne des problèmes mécaniques et économiques. De plus, pour assurer l'orientation automatique de l'hélice face au vent, un mécanisme supplémentaire est nécessaire [9].



Figure.I.5 : Eolienne a axe horizontal [10]

I.3.4. Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable

Le fonctionnement des éoliennes peut être classé en deux catégories principales : à vitesse fixe et à vitesse variable. Chaque type présente des avantages distincts, dépendant du type d'aérogénérateur utilisé [11, 12] :

Les éoliennes à vitesse fixe offrent une grande fiabilité grâce à leur configuration avec peu de pièces mobiles et de composantes électriques en mouvement. Cela réduit le risque de pannes et facilite la maintenance. De plus, ces éoliennes sont généralement moins chères à produire et à installer, ce qui peut contribuer à rendre l'énergie éolienne plus abordable. Un autre avantage est la faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne, ce qui contribue à sa stabilité. Le fonctionnement à vitesse fixe ne nécessite pas de système électrique de commande complexe, ce qui simplifie le système électrique global.

D'un autre côté, les éoliennes à vitesse variable offrent une meilleure efficacité énergétique. Elles peuvent s'ajuster aux variations de vitesse du vent, ce qui permet une production d'énergie plus stable et plus efficace. Les pales de l'éolienne peuvent être ajustées pour maximiser la capture de l'énergie éolienne à chaque instant, augmentant ainsi le rendement global de l'éolienne. De plus, en ajustant la vitesse de rotation, les éoliennes à vitesse variable peuvent réduire le bruit généré en minimisant les perturbations aérodynamiques et les vibrations. Elles permettent également de réduire les oscillations du couple et les efforts subis par le convertisseur de puissance. Enfin, ces éoliennes génèrent une puissance électrique de meilleure qualité.

I.3.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est étroitement liée à ses avantages, bien qu'elle présente également quelques inconvénients à prendre en compte afin de ne pas entraver son développement [13, 14, 15].

- **Avantages :** L'énergie éolienne est principalement respectueuse de l'environnement, car son exploitation ne génère pas directement de CO₂. De plus, elle est renouvelable, ce qui signifie que les générations futures pourront toujours en profiter. Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne présente aucun risque et ne produit pas de déchets radioactifs à durée de vie connue. En outre, parmi les sources d'énergie renouvelable, l'énergie éolienne est la moins coûteuse. Les parcs éoliens peuvent être démontés facilement et ne laissent aucune trace. Enfin, l'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

- **Inconvénients** : L'énergie éolienne présente quelques inconvénients à prendre en compte. Tout d'abord, le bruit émis par les éoliennes est souvent attribué au multiplicateur, ce qui peut être considéré comme une nuisance. De plus, la puissance électrique produite par les éoliennes n'est pas constante, ce qui peut affecter la qualité de l'énergie produite. En outre, le coût de l'énergie éolienne est généralement plus élevé par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. L'installation d'une éolienne nécessite également des critères spécifiques, tels qu'une surface suffisante et une proximité du réseau électrique, ce qui peut limiter les possibilités d'implantation. Enfin, étant donné que le vent est une source intermittente, la production d'énergie éolienne varie, ce qui peut poser des défis en termes de stabilité de l'approvisionnement énergétique.

I.4. Conversion « vent → électricité »

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, les éoliennes utilisent une combinaison d'éléments de base. Tout d'abord, il y a une hélice qui est chargée de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à travers un système de transmission mécanique. Une fois que l'énergie mécanique est transmise, elle est convertie en énergie électrique à l'aide d'un générateur électromécanique. Ce générateur produit de l'électricité grâce à l'interaction entre un champ magnétique et des bobines de fils conducteurs.

Pour distribuer l'électricité ainsi produite, un système de liaison électrique est nécessaire. Il permet de connecter l'éolienne au réseau électrique ou à d'autres dispositifs de stockage ou d'utilisation de l'énergie. Enfin, un régulateur est utilisé pour surveiller et contrôler le fonctionnement de l'éolienne. Il peut ajuster la vitesse de rotation de l'hélice ou la production d'électricité en fonction des conditions météorologiques et des besoins de consommation.

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : les éoliennes autonomes, qui fonctionnent de manière indépendante du réseau électrique, et les éoliennes raccordées au réseau, qui sont reliées au réseau électrique pour injecter l'électricité produite. Le choix entre ces deux configurations influence grandement le processus de conversion de l'énergie éolienne, notamment en ce qui concerne l'intégration ou non d'une unité de stockage d'énergie. Cette unité de stockage peut prendre la forme de batteries, d'accumulateurs cinétiques tels qu'un volant d'inertie, ou d'autres technologies.

La conception mécanique des éoliennes peut également varier considérablement. On

trouve notamment des éoliennes avec un axe rotor vertical ou horizontal, une hélice placée face au vent ou sous le vent, et des éoliennes avec ou sans multiplicateur de vitesse. Chaque configuration est adaptée à des utilisations spécifiques et présente un niveau de technologie différent, ce qui peut influencer sa robustesse et son rendement [16].

I.5. Présentation et le principe de fonctionnement de la GADA

I.5.1. Description des composants de la GADA

Le circuit statorique est directement connecté au réseau. Le circuit rotorique est quant à lui relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique et Couple de la génératrice et la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau ;
- Un bus continu ;
- Un convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM) [17].

I.5.2. Différentes structures de GADA

- GADA avec pont à diodes et pont à thyristors :

Cette structure, appelé montage Kramer, utilise un pont à diodes et un pont à thyristors (Figure.I.6).

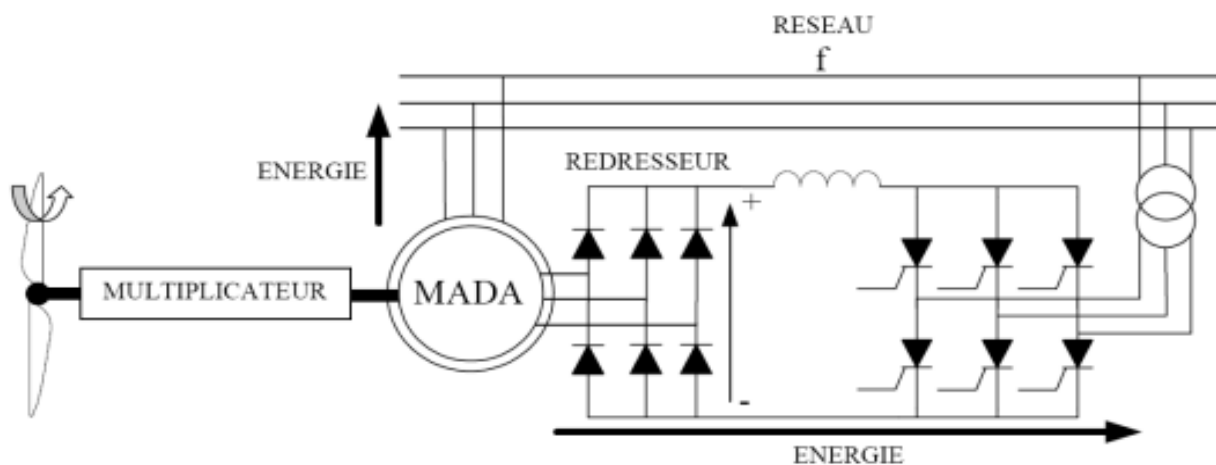


Figure.I.6 : GADA avec pont à diodes et pont à thyristors

Le pont à diodes est utilisé pour redresser les tensions entre les phases. L'onduleur à thyristors applique une tension variable au redresseur en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors. Cela permet de modifier la plage de fonctionnement des diodes, de rendre la puissance extraite du circuit rotorique variable et donc d'ajuster le glissement de la génératrice asynchrone. Un avantage majeur de cette configuration est que l'onduleur est relativement courant et moins coûteux, car il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont gérées par le réseau électrique [18].

Cependant, cette structure ne permet pas de réguler électriquement la vitesse de la génératrice asynchrone (GADA). De plus, l'onduleur utilisé génère des courants harmoniques de basse fréquence d'amplitude significative. Cette injection d'harmoniques multiples de 50 Hz est préjudiciable aux équipements électriques connectés au réseau. Par conséquent, d'autres structures sont privilégiées dans ce cas.

➤ GADA avec pont à diodes et pont à transistors :

Dans cette structure, les thyristors des onduleurs à commutation naturelle sont remplacés par des transistors de puissance, ce qui donne lieu à des onduleurs à commutations forcées et à modulation de largeur d'impulsion (MLI) [19]. Ces onduleurs fonctionnent à une fréquence de découpage élevée, ce qui réduit considérablement l'injection de courants harmoniques à basse fréquence. De plus, cette configuration permet de contrôler le flux de puissance réactive. Cependant, en raison de l'utilisation d'un pont de diodes, il n'est pas possible d'asservir la vitesse de la GADA dans cette structure.

➤ GADA avec cycloconvertisseur :

Cette structure, également appelée topologie statique Scherbius [20], permet un échange bidirectionnel d'énergie entre le rotor et le réseau électrique (Figure I.7). Cette configuration est spécifiquement utilisée lorsque la fréquence du rotor est considérablement inférieure à celle du réseau, ce qui correspond à des glissements très faibles. Elle offre l'avantage d'utiliser des thyristors, qui sont économiquement avantageux.

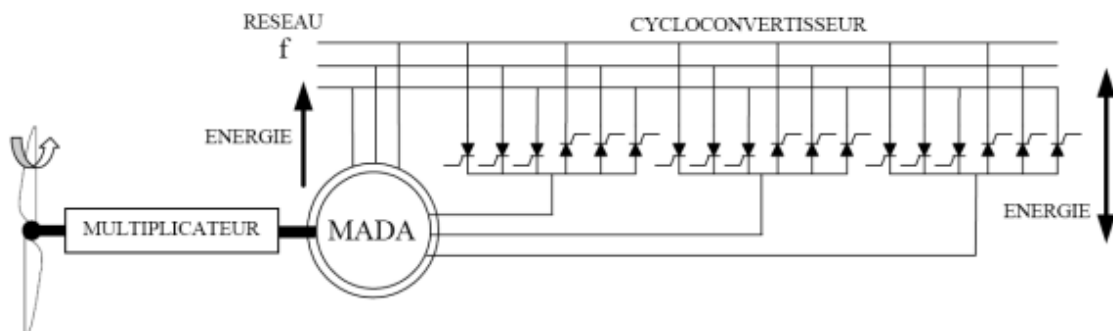


Figure.I.7 : GADA avec cycloconvertisseur

➤ GADA avec convertisseurs MLI :

Ce système utilise deux onduleurs de tension en cascade équipés de transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) et connectés par un bus continu (Figure.I.8) [21]. Les onduleurs sont contrôlés par (MLI). Ce choix permet de contrôler deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : le flux et la vitesse de la (GADA) du côté de la machine, ainsi que les puissances actives et réactives transitant du côté du réseau. Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants :

- Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau peut être bidirectionnel. Les limites de ce flux sont déterminées par la plage de variation de la vitesse de rotation, qui est imposée par les contraintes électriques et mécaniques du système.
- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est approprié.
- Les tensions et courants du rotor ainsi que les courants du stator présentent une faible distorsion.
- Le contrôle du couple de la génératrice est indépendant du contrôle de la puissance réactive injectée par le rotor.

Cette configuration de conversion permet de contrôler quatre grandeurs : le flux et la vitesse de la génératrice, ainsi que les flux des puissances transmises au réseau. Grâce à des pales orientables, cette configuration permet une variation de vitesse allant jusqu'à 100%. De plus, les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour 25% de la puissance nominale de la génératrice, ce qui réduit les pertes dans le convertisseur. En termes de coût et de performances, cette structure est donc la plus intéressante. C'est pourquoi elle a été choisie comme structure de base pour nos travaux.

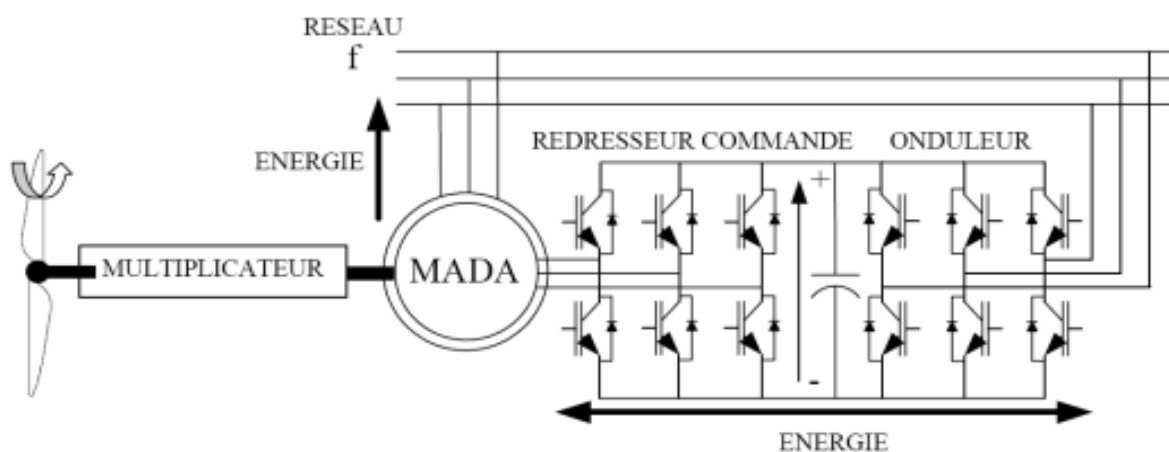


Figure.I.8 : GADA avec convertisseurs MLI

I.5.3. Principe de fonctionnement de la GADA dans les éoliennes

Les éoliennes actuelles sont généralement équipées d'une GADA en raison de plusieurs avantages qu'elle offre. Ces avantages incluent la génération à vitesse variable (environ $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme), le contrôle indépendant de la puissance active et réactive, la réduction des contraintes mécaniques et du bruit acoustique, l'amélioration de la qualité de la puissance et le faible coût. Cependant, la GADA est soumise à de nombreuses contraintes, telles que les effets des incertitudes paramétriques (causées par l'échauffement, la saturation, etc.) et les perturbations de la variation de vitesse, qui pourraient détourner le système de son fonctionnement optimal. C'est pourquoi le contrôle doit prendre en compte la robustesse et les performances. Dans notre travail, nous avons donc choisi d'utiliser la commande par mode glissant pour répondre à ces exigences.

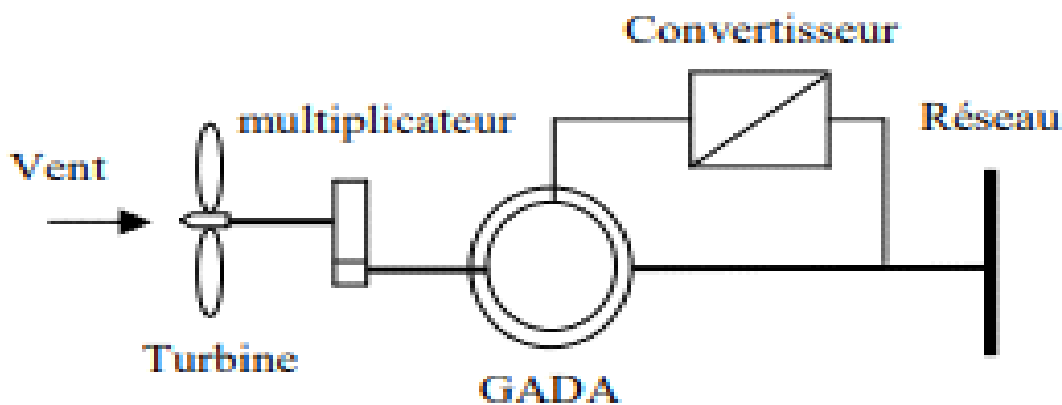


Figure.I.9 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne [22]

I.5.4. Domaines d'application de la GADA

La génératrice asynchrone double alimentation est un type de génératrice électrique qui est utilisée dans de nombreuses applications. Voici quelques exemples de domaines d'application de la GADA [23] :

- Énergie éolienne : La GADA est couramment utilisée dans les éoliennes pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique. La double alimentation permet une meilleure gestion de l'énergie produite par l'éolienne, ce qui la rend plus efficace.
- Conversion de fréquence : La GADA peut être utilisée dans les systèmes de conversion de fréquence pour convertir une tension alternative de fréquence donnée en une tension alternative de fréquence différente.
- Traction ferroviaire : La GADA peut être utilisée dans les trains à grande vitesse pour

fournir de l'énergie électrique aux moteurs de traction.

- Pompe hydraulique : La GADA peut être utilisée pour alimenter des pompes hydrauliques dans les systèmes de traitement des eaux usées, les systèmes de refroidissement industriels, les centrales hydroélectriques, etc.
- Machines industrielles : La GADA peut être utilisée pour fournir de l'énergie électrique aux machines industrielles telles que les machines-outils, les presses hydrauliques, les machines de moulage par injection, etc.

I.5.5. Types d'alimentation de la GADA

La GADA est une machine électrique qui est alimentée par deux sources d'énergie distinctes. Les deux configurations d'alimentation les plus couramment utilisées pour la GADA sont les suivantes :

- Alimentation directe : Dans cette configuration, la GADA est connectée directement au réseau électrique et alimentée par celui-ci. La tension et la fréquence de l'alimentation sont donc fixes et dépendent du réseau électrique. Cette configuration est la plus simple et la plus courante.
- Alimentation à travers un convertisseur de puissance : Dans cette configuration, la GADA est alimentée par un convertisseur de puissance, qui peut être contrôlé pour fournir une tension et une fréquence variables à la GADA. Cette configuration est plus complexe que l'alimentation directe, mais elle offre une plus grande flexibilité en termes de contrôle de la tension et de la fréquence de l'alimentation de la GADA. Elle est donc utilisée dans des applications nécessitant une grande précision de contrôle, comme dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

Le choix de la configuration d'alimentation dépend des exigences de l'application et des performances souhaitées de la GADA [24].

I.5.6. Avantages et inconvénients du GADA

- **Avantages** : La GADA offre plusieurs avantages notables. Tout d'abord, elle est capable de compenser efficacement la différence de fréquence entre le système mécanique et électrique grâce à l'utilisation d'un convertisseur. De plus, cette technologie permet un contrôle indépendant de la puissance active et réactive, offrant ainsi une flexibilité accrue dans la gestion de la production d'énergie. La GADA peut également être

magnétisée soit par le réseau électrique, soit par son propre rotor, offrant ainsi des options polyvalentes de démarrage et de fonctionnement. Enfin, elle est capable de générer sa propre puissance réactive, ce qui permet d'optimiser l'efficacité énergétique et d'améliorer la stabilité du réseau électrique. Ces avantages font de la machine synchrone une solution attrayante pour de nombreuses applications industrielles et de production d'énergie.

- **Inconvénients** : Malgré ses nombreux avantages, la GADA présente également quelques inconvénients. Tout d'abord, son coût est souvent élevé, ce qui peut rendre son adoption financièrement contraignante pour certaines applications. De plus, en cas de défaillance du système, la machine doit être en mesure de produire sa propre puissance réactive, ce qui peut poser des défis supplémentaires en termes de gestion et de maintenance. Un autre inconvénient est que la gamme des vitesses de fonctionnement de cette machine dépend souvent de l'investissement économique réalisé, ce qui peut entraîner un compromis entre l'efficacité et les coûts. Enfin, l'utilisation des bagues est nécessaire dans certains cas pour assurer le bon fonctionnement de la GADA, ce qui peut entraîner des contraintes supplémentaires en termes de conception et d'entretien. Malgré ces inconvénients, la GADA reste une technologie largement utilisée dans de nombreux domaines où ses avantages l'emportent sur ses limitations [25].

I.6. Conclusion

Ce chapitre a examiné l'état de l'art de l'énergie éolienne et a fourni une étude descriptive de l'ensemble des éléments constitutifs de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. De plus, différentes structures d'éoliennes existantes ainsi que leurs technologies ont été présentées.

De plus, Nous avons observé que la GADA est un choix courant pour les applications de production d'énergie renouvelable, car elle est capable de maintenir une fréquence et une tension stables sans avoir besoin d'un équipement de régulation externe. Elle présente également des avantages en matière de coût et de simplicité de construction par rapport à d'autres types de générateurs d'énergie renouvelable.

CHAPITRE II

**MODELISATION ET SIMULATION DE LA
TURBINE ET LA MADA**

II.1. Introduction

La modélisation de la MADA est une étape cruciale pour le développement des systèmes de production d'énergie renouvelable. Elle permet de comprendre le comportement du générateur dans différentes conditions de fonctionnement et d'optimiser son efficacité énergétique. En plus de la modélisation, la commande de la génératrice est également essentielle pour assurer une production d'énergie stable et efficace.

La modélisation de la MADA implique la représentation mathématique de ses différentes caractéristiques électromagnétiques, telles que les flux magnétiques, les courants et les tensions. Des équations spécifiques sont utilisées pour décrire le comportement dynamique de la machine, permettant ainsi de prédire son fonctionnement dans différentes conditions de charge et de vitesse. Ces modèles sont essentiels pour concevoir et optimiser les systèmes d'entraînement à double alimentation, ainsi que pour simuler et contrôler les processus de conversion d'énergie.

Parallèlement, la turbine est un élément clé des systèmes de conversion d'énergie. Elle est souvent utilisée pour convertir l'énergie cinétique d'un fluide (tel que l'eau ou l'air) en énergie mécanique, qui est ensuite utilisée pour générer de l'électricité à l'aide d'une machine électrique.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principes de base de la modélisation de la MADA et de la turbine. Nous examinerons les équations fondamentales et les modèles mathématiques utilisés pour décrire leur comportement, ainsi que la simulation à l'aide de logiciel « MATLAB ». En comprenant ces modèles, nous pourrions mieux appréhender les performances et les contraintes liées à la conversion d'énergie électrique à l'aide de ces composants clés.

II.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure.II.1) [26].

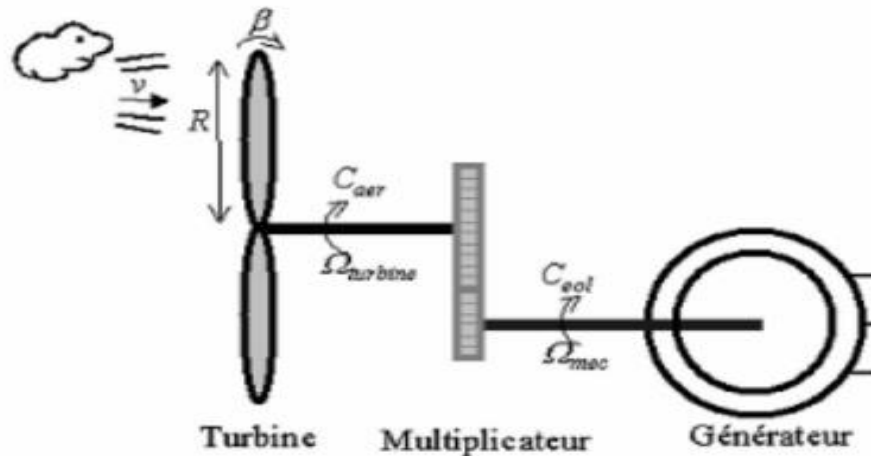


Figure.II.1 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance cinétique du vent est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{II-1})$$

$$S = \pi \cdot R^2$$

Avec :

- ρ : densité de l'air (approxima $1,225 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15 C°).
- S : surface circulaire balayée par la turbine.
- v : Vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

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

- C_p : Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

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

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (\text{II-3})$$

Ω_t : Vitesse de la turbine.

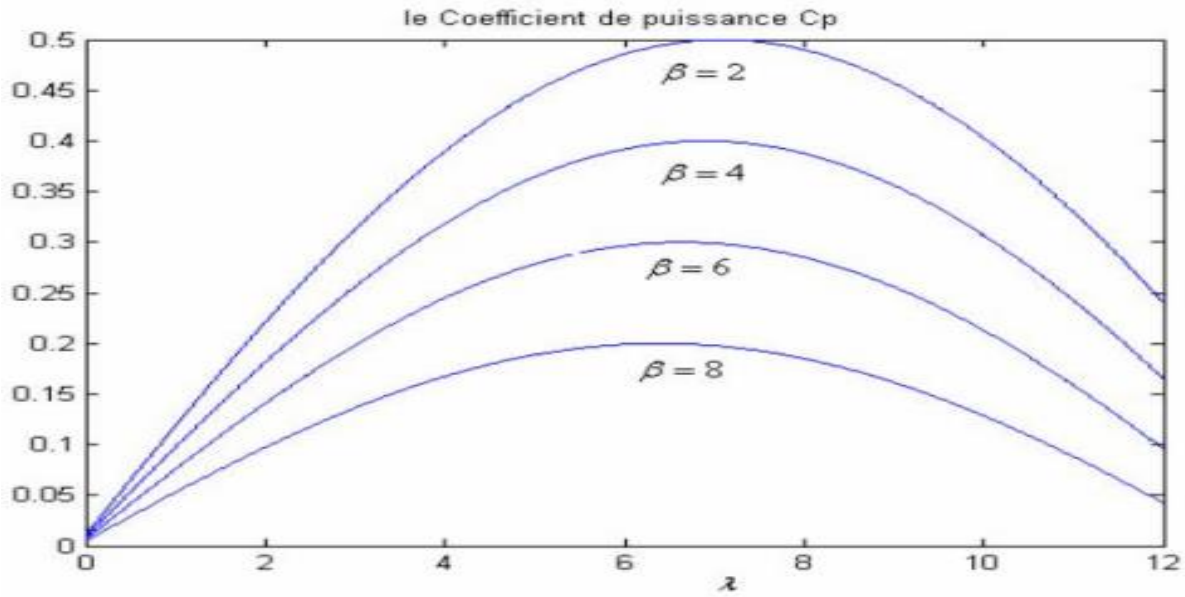


Figure.II.2 : Coefficient aérodynamique en fonction du rapport de vitesse de la turbine [26]

- A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante :

$$C_p = (0.5 - 0.0167)(\beta - 2) \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II-4})$$

- Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique C_{aer} est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II-5})$$

II.2.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure.II.1). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [27] :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II-6})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II-7})$$

C_g : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.

G : Le gain du multiplicateur.

II.2.2. Maximisation de puissance (MPPT)

On cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant la courbe $C_p(\lambda)$. Cette caractéristique qui est de forme parabolique admet un maximum C_{pmax} pour λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance [28], cela pour $C_{pmax} = 0.5270$ et $\lambda_{opt}=10$.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT). L'algorithme est donné par la relation suivante :

$$C_g = \frac{C_{pmax}(\lambda, \beta)}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{R^5}{G^3} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II-8)$$

Le tracé de l'allure $C_p = f(\lambda)$, pour cette turbine est représenté dans la figure ci-dessous :

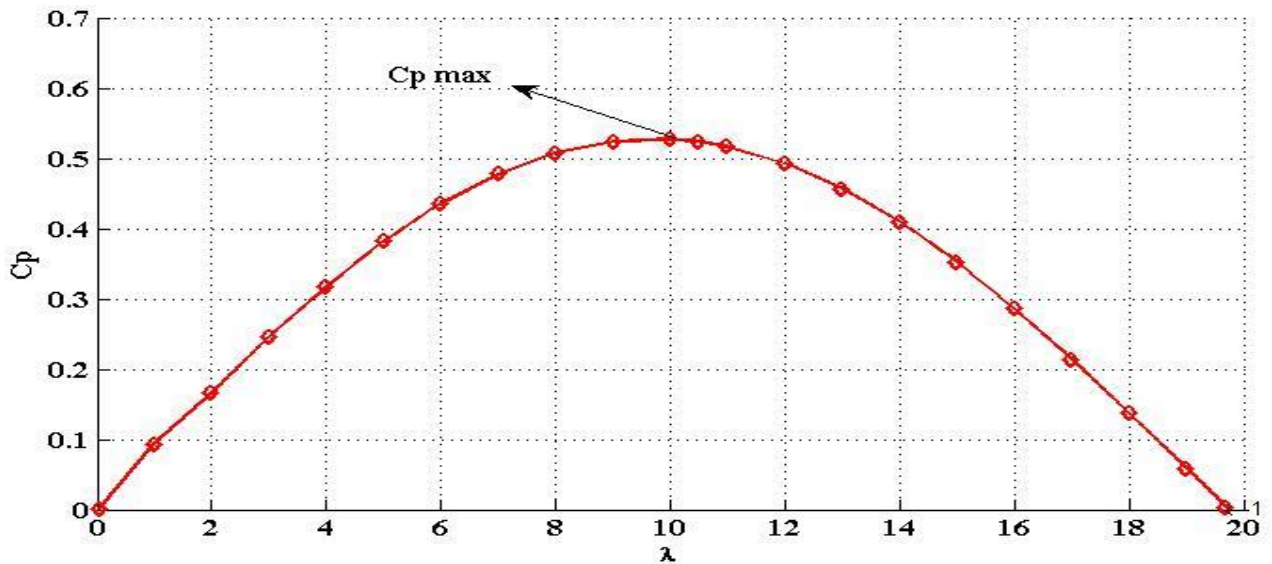


Figure.II.3 : Caractéristique de coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ)

II.2.3. Equation dynamique de l'arbre

Avec la présence du multiplicateur, l'équation dynamique de l'arbre est donnée par [29] :

$$Jt \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} = C_g - C_{aer} \quad (II-9)$$

Jt : Moment d'inertie de la turbine.

f : Le coefficient de frottement dynamique.

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basée sur ces équations, est donné par la figure suivante :

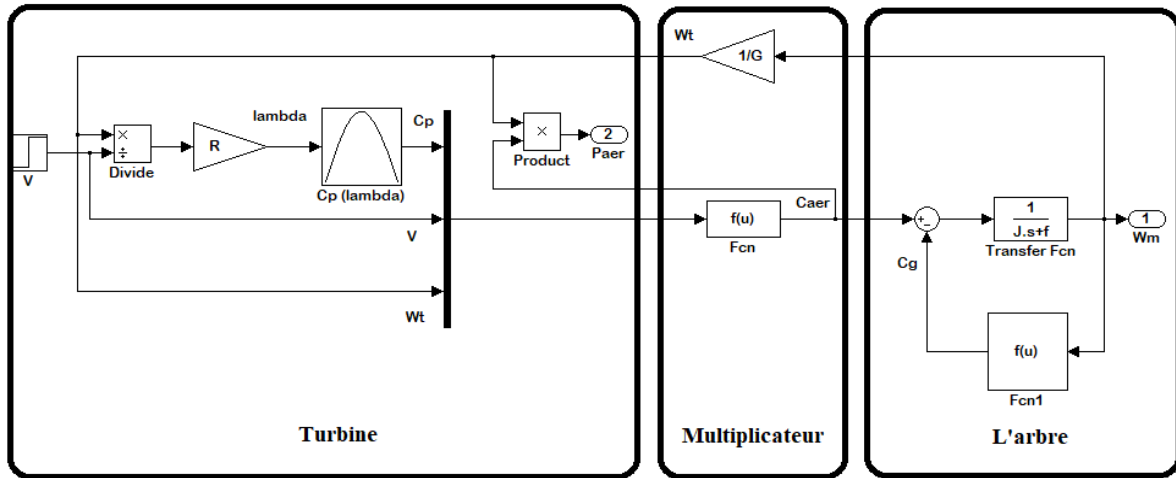


Figure.II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.2.4. Caractéristique de puissance

Le schéma ci-dessous, représente la caractéristique de puissance de la turbine éolienne [30] :

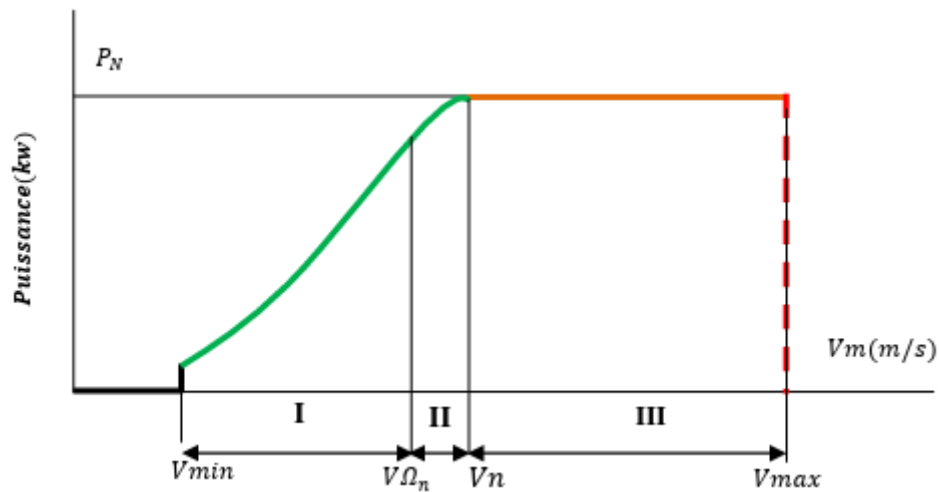


Figure.II.5 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne

La (figure.II.5) montre les trois zones différentes avec ses objectifs :

Zone I :

Elle représente les périodes où le vent souffle à des vitesses relativement basses, ce qui signifie que la puissance disponible est inférieure à la puissance nominale de la turbine éolienne. L'objectif de cette zone consiste à maximiser l'extraction de puissance du vent en utilisant la

technique de Maximum Power Point Tracking (MPPT), qui permet de suivre le point de puissance maximale.

Zone II :

Cette Zone correspond à la transition entre la zone de charge partiel (zone I) et la zone de charge nominale (zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et des raisons acoustiques afin de minimiser les bruits générés.

Zone III :

Elle représente les périodes où le vent est fort, et son objectif est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales.

II.2.5. Simulation de la turbine

Les simulations sont effectuées dans MATLAB. Dans notre travail, nous avons simulé la turbine avec ses paramètres et une vitesse de vent appliqué qui est dans la (figure II.8).

Les résultats de simulation de la turbine éolienne sont présentés dans les figures suivantes :

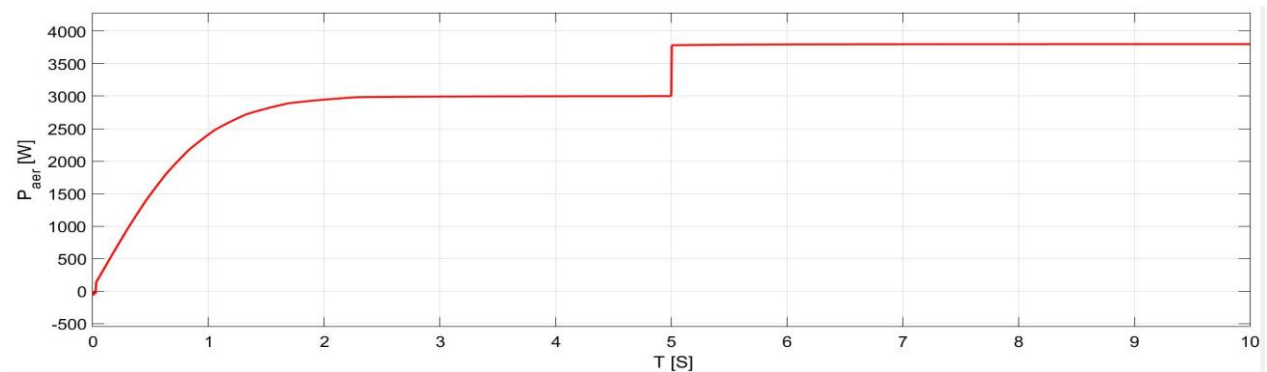


Figure.II.6 : La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine

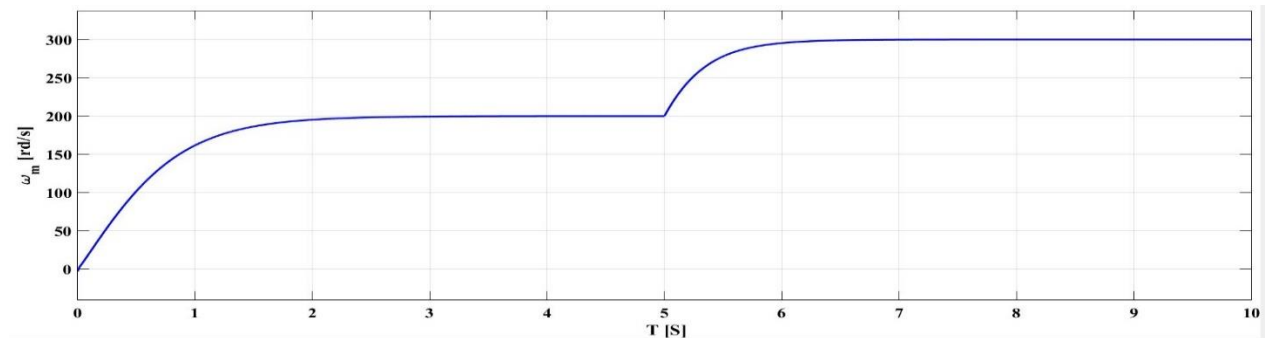


Figure.II.7 : La vitesse mécanique de la turbine

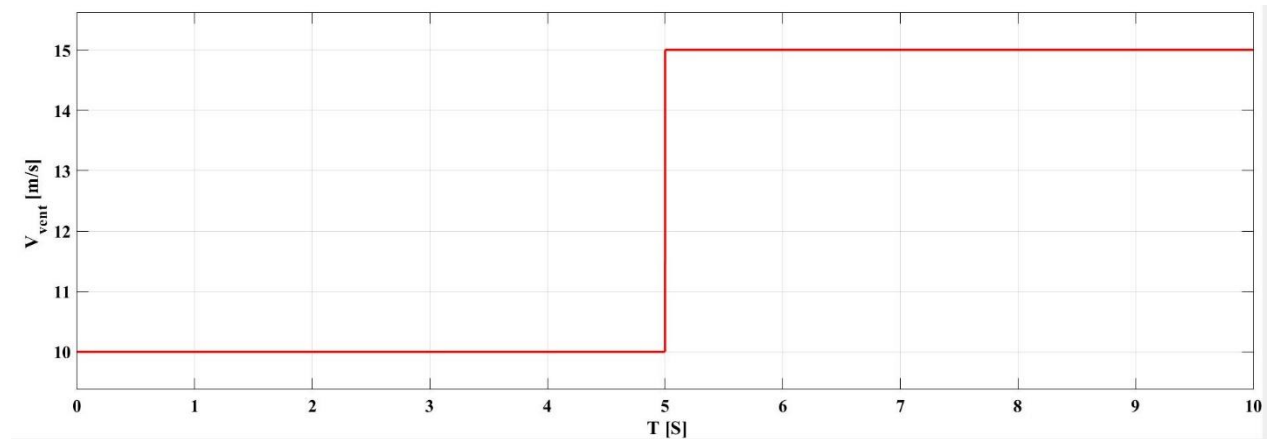


Figure.II.8 : La vitesse de vent

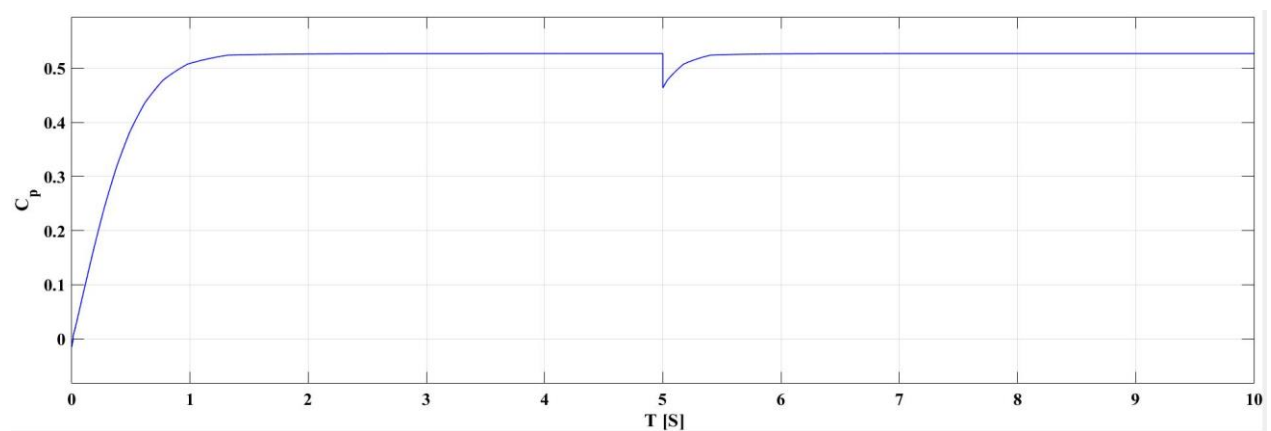


Figure.II.9 : Le coefficient de puissance

II.2.5.1. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance aérodynamique est adaptée à la variation de la vitesse mécanique de la turbine, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse de vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse de vent sur la vitesse mécanique et la puissance aérodynamique. Pour le coefficient de puissance C_p , il reste pratiquement égal à sa valeur de référence optimale 0.5270 malgré la variation de la vitesse de vent. Ce qui montre l'efficacité de la commande MMPT sur la turbine éolienne.

II.3. Modélisation de la MADA

II.3.1. Dans le repère triphasé

La (Figure.II.10) est adoptée comme point de départ à la modélisation qui suit. Les flux statorique et rotorique de la MADA sont définis comme suit [17, 31] :

II.3.1.1. Equation électrique

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

✓ On définit les vecteurs flux suivants : $\underline{\Phi}_{sabc} = \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix}$ et $\underline{\Phi}_{rabc} = \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix}$

✓ Et les vecteurs courants suivants : $\underline{I}_{sabc} = \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix}$ et $\underline{I}_{rabc} = \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix}$

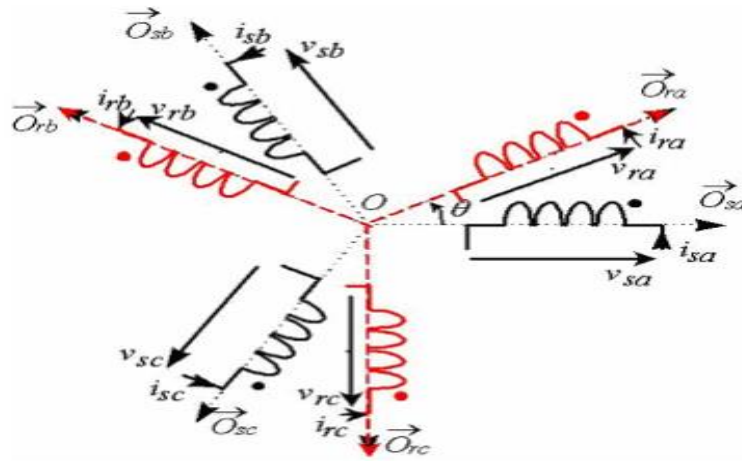


Figure.II.10 : Position des axes statoriques et rotoriques dans l'espace électrique
(• Indique le sens des enroulements de phases)

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment alors en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Avec: $L_s = I_s - M_s, L_r = I_r - M_r, M = \frac{3}{2} M_{sr}$

II.3.1.2. Equation magnétique

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

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_r][I_r] \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

✓ Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]' = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

✓ Finalement :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [L_s][I_s] + \frac{d}{dt} [M_{sr}][I_r] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [L_r][I_r] + \frac{d}{dt} [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

II.3.2. La transformée de Park

La transformée de PARK est appelée souvent transformation des deux axes, cette transformation a été présentée par PARK en 1929 lors de l'étude de la machine asynchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci. Fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- Homopolaire (indice o);
- D'axes directs (indice d);
- D'axes en quadrature (indice q).

L'idée de Park repose sur le fait qu'un champ tournant Créé par un système triphasé peut l'être aussi à l'identique par deux courants I_d, I_q et deux tension. La transformation qui traduit ce passage est donné par :

$$[V]_{dq0} = [P(\theta_a)][V]_{abc} \quad \text{et} \quad [I]_{dq0} = [P(\theta_a)][I]_{abc}$$

$[P(\theta_a)]$ est la matrice de Park :

$$[P(\theta_a)] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \quad (II-16)$$

Avec :

$\theta = \int \omega . dt$ Angle entre le système d'axes (d, q) et le système d'axes (O_a, O_b, O_c).

ω : Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système triphasé.

$[V_d]$ Est le vecteur des tensions du système biphasé d'axes direct.

$[V_q]$ Est le vecteur des tensions du système biphasé d'axes quadrature.

Le facteur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour conserver la puissance électrique instantanée.

Pour la transformation inverse, c'est-à-dire pour le passage du système biphasé au système triphasé, on utilise la matrice de Park inverse suivante :

$$[P(\theta_a)]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \quad (II-17)$$

Ou encore : $[V_s] = [P(\theta_a)]^{-1} [V_d]$

La matrice $[P(\theta_a)]^{-1}$ est appelée matrice de transformation de Park inverse. Equation matricielle :

Tension :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (II-18)$$

Courant :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (II-19)$$

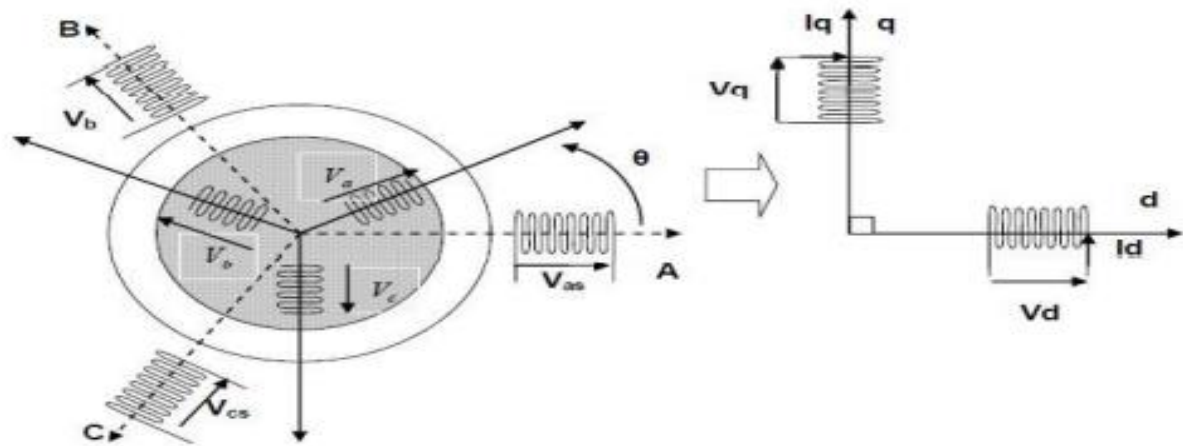


Figure.II.11 : Schéma de transformation de Park

II.3.3. Modèle de MADA dans le référentiel (d, q)

La théorie de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé a des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct d et axe quadrature q Pour des raisons de simplification ; nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine sera supposée idéale, c'est à dire que les ampères-tours seront supposés distribués sinusoidalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques de l'espace seront négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on Néglige l'effet de peau ;
- Les grandeurs homopolaires seront considérées nulles.

II.4. Modèle final de la MADA

II.4.1. Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante :

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

Avec respectivement :

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

w_s et w_r : sont les pulsations rotoriques ; des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$, et φ_{rq} : sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé leurs expressions sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

En introduisant le système d'équations des flux magnétiques (II.21) dans celui d'équations électriques (II.22), et en réarrangeant tout, on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \cdot \frac{dI_{sd}}{dt} + M \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} - w_s \cdot L_s \cdot I_{sq} - w_s \cdot M \cdot I_{rq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + L_s \cdot \frac{dI_{sq}}{dt} + M \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + w_s \cdot L_s \cdot I_{sd} + w_s \cdot M \cdot I_{rd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + L_r \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} + M \cdot \frac{dI_{sd}}{dt} - w_r \cdot L_r \cdot I_{rq} - w_r \cdot M \cdot I_{sq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + L_r \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + M \cdot \frac{dI_{sq}}{dt} + w_r \cdot L_r \cdot I_{rd} + w_r \cdot M \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

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

M : L'inductance mutuelle.

II.4.2. Représentation du modèle de la MADA sous forme d'état

En considérant les flux statoriques ($\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$) et les courants rotoriques (I_{rd}, I_{rq}) comme variables d'état, et les tensions statoriques et rotoriques ($V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$) comme variables de commande [32], on a donc :

$$[\dot{X}] = A \cdot [X] + B \cdot [U] \quad \text{Avec :} \quad X = (\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, I_{rd}, I_{rq})$$

$$U = (V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq})$$

D'après l'équation (II.21), nous avons :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} \\ I_{sq} = \frac{\varphi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ I_{rd} = \frac{\varphi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} \cdot I_{sd} \\ I_{rq} = \frac{\varphi_{rq}}{L_r} - \frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

En remplaçant les équations (II.20) et (II.21) dans l'équation (II.23) et après le calcul et la simplification nous aurons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{sd} + w_s \cdot \varphi_{sq} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{rd} + V_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{sq} + w_s \cdot \varphi_{sd} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{rq} + V_{sq} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} = -\delta \cdot I_{rd} + w_r \cdot I_{rq} + \alpha \cdot \varphi_{sd} - \beta(w_s - w_r) d\varphi_{sq} - \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} \cdot V_{sd} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot V_{rd} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = -\delta \cdot I_{rq} + w_r \cdot I_{rd} + \alpha \cdot \varphi_{sq} - \beta(w_s - w_r) d\varphi_{sd} - \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} \cdot V_{sd} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot V_{rd} \end{array} \right. \quad (II.24)$$

On pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s = \frac{L_s}{R_s} \\ T_r = \frac{L_r}{R_r} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \\ \alpha = \frac{M}{\sigma \cdot T_s \cdot L_r \cdot L_s} \\ \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s \cdot L_r \cdot L_s} \right) \\ \gamma = \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} \end{array} \right. \quad (II.25)$$

En remplaçant σ, T_s, T_r, α et γ dans le système d'équation (II-24) on obtient système sous forme

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\gamma(w_s - w_r) & -\sigma & w_r \\ \gamma(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\sigma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II-26)$$

Pour faciliter la simulation, nous avons écrit la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s[A_2] + w_r[A_3]$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\sigma & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\sigma \end{bmatrix}$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 1 \\ -\gamma & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II.4.2.1. Expression de couple

L'équation mécanique :

$$C_{em} = C_r + f \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (II-27)$$

Avec respectivement :

- C_{em} : Le couple électromagnétique.
- C_r : Le couple résistant.
- f : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.
- Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA.
- J : Moment d'inertie des parties tournantes.

On a :

$$P_a = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \quad (II-28)$$

En remplaçant les tensions par leurs valeurs, on obtient :

$$\begin{cases} P_a = R_s \cdot I_{sd}^2 + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \cdot I_{sd} - w_s \cdot \varphi_{sq} \cdot I_{sd} + R_s \cdot I_{sq}^2 + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \cdot I_{sq} + w_s \cdot \varphi_{sd} \cdot I_{sq} \\ P_a = R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \cdot I_{sq} \right) + w_s (\varphi_{sd} \cdot I_{sq} - \varphi_{sq} \cdot I_{sd}) \\ P_a = P_j + P_r + P_{el} \end{cases} \quad (II-29)$$

Avec :

$$\begin{cases} P_j = R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) \\ P_r = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \cdot I_{sq} \\ P_{el} = w_s (\varphi_{sd} \cdot I_{sq} - \varphi_{sq} \cdot I_{sd}) \end{cases} \quad (II-30)$$

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{el} = w_s \cdot C_{em} \quad (II-31)$$

On distingue l'équation du couple :

$$C_{em} = P(\varphi_{sd} \cdot I_{sq} - \varphi_{sq} \cdot I_{sd}) \quad (II-32)$$

Aussi, il est possible d'exprimer le couple en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques de la manière suivante :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{sq} \cdot I_{rd} - \varphi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (II-33)$$

Avec P : est le nombre de paires de pôles de la GADA.

II.4.2.2. Expressions des puissances actives et réactives

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sd} \cdot I_{sq} - V_{sq} \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (II-34)$$

Les puissances actives et réactives rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_r = V_{rq} \cdot I_{rq} + V_{rd} \cdot I_{rd} \\ Q_r = V_{rq} \cdot I_{rd} - V_{rd} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (II-35)$$

II.5. Simulation du modèle de la MADA (fonctionnement moteur)

II.5.1. Résultats de la simulation

Le logiciel MATLAB a été utilisé pour exécuter une simulation de la machine asynchrone à double alimentation, d'une puissance de 4 kW, dans le mode moteur. Le modèle de simulation est basé sur les équations dérivées à partir de la transformation de Park, utilisant un repère biphasé (d, q) lié au champ tournant. Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures ci-dessous.

Dans ce fonctionnement moteur, les figures II-12 et II-13 montrent les caractéristiques de la vitesse, du couple. Le rotor de la machine est en court-circuit.

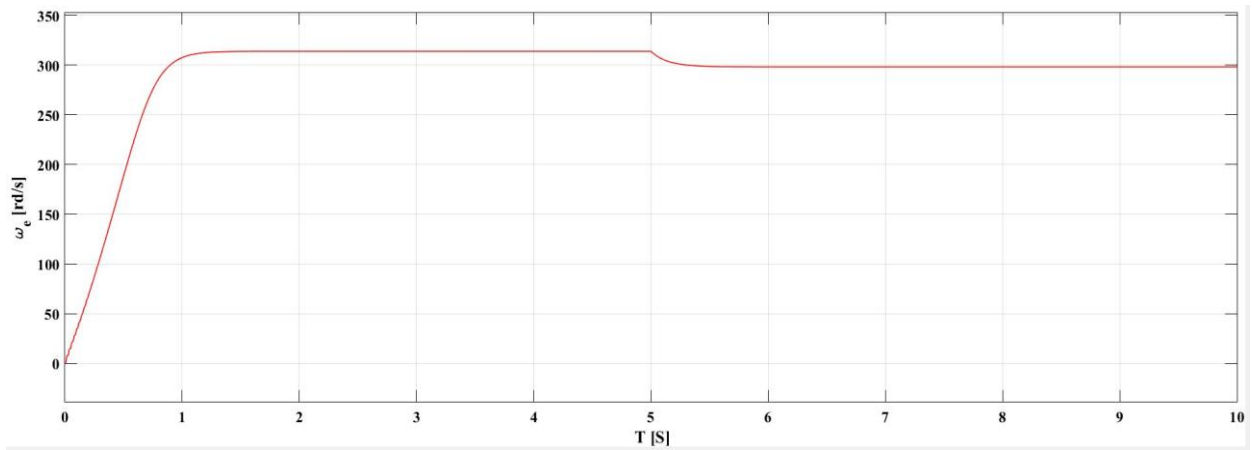


Figure.II.12 : la vitesse électrique

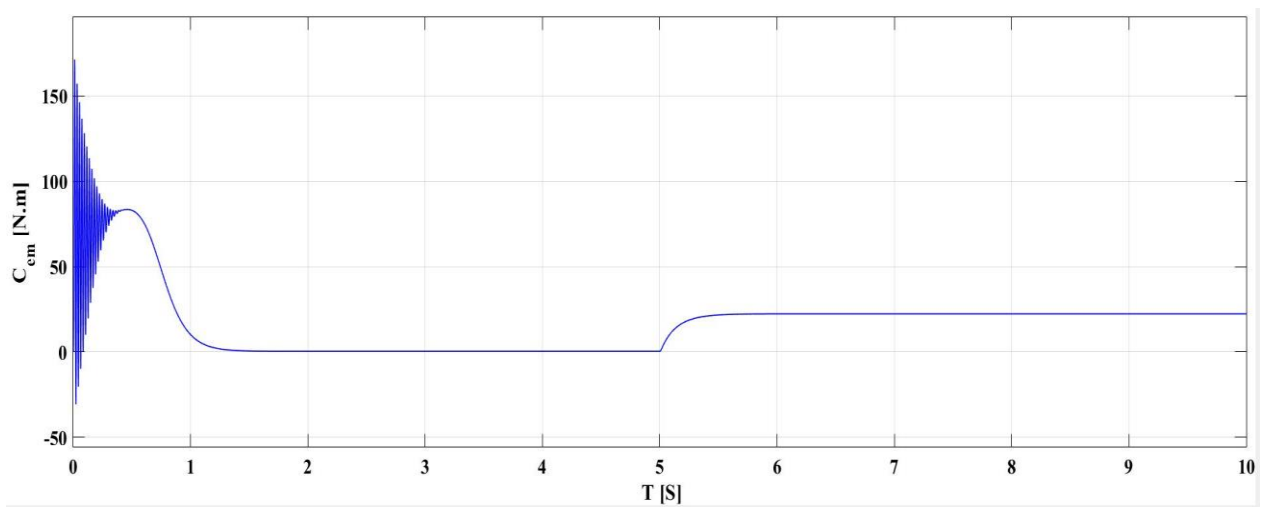


Figure.II.13 : Le couple électromagnétique

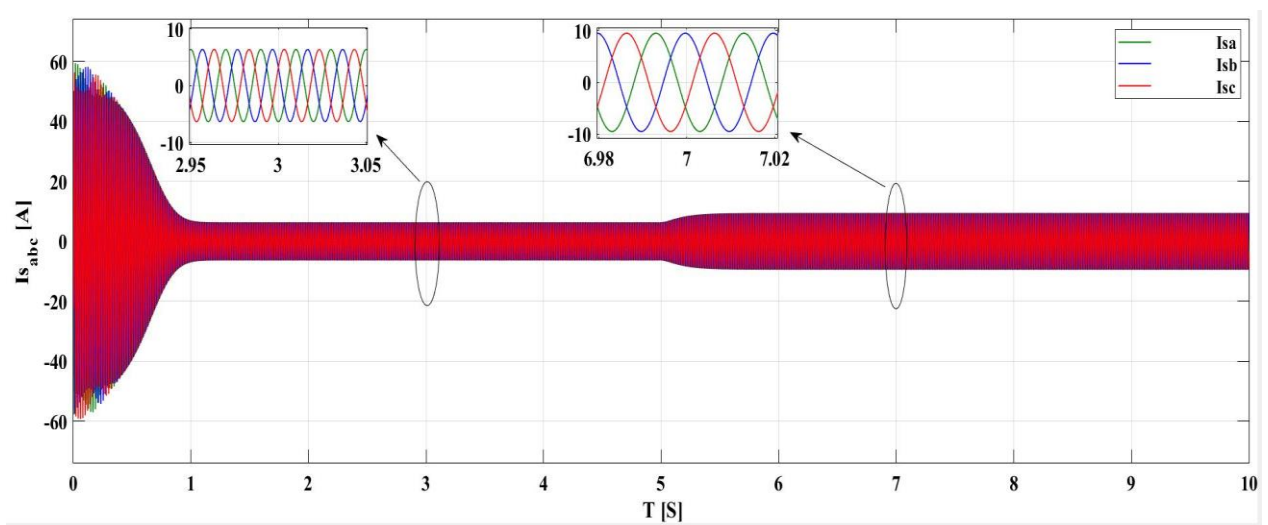


Figure.II.14 : Les courants statoriques triphasés avec zoom

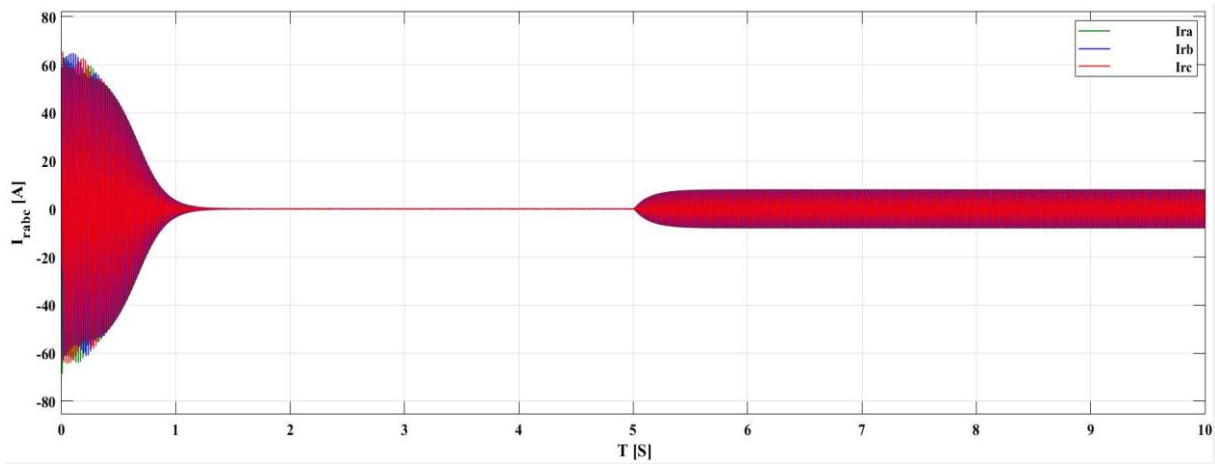


Figure.II.15 : Les courants rotoriques triphasées avec zoom

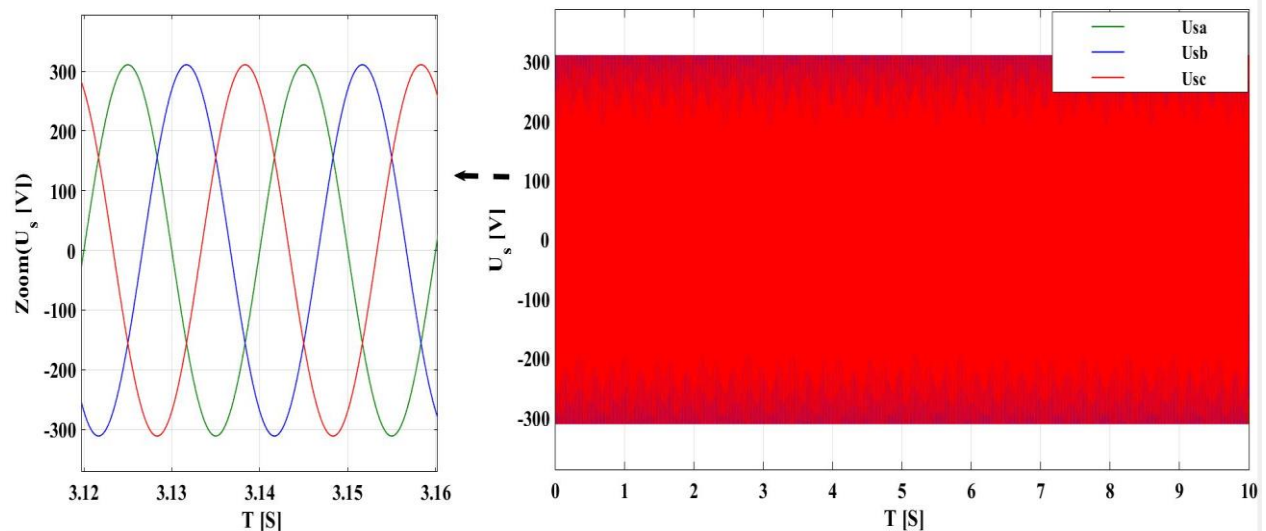


Figure.II.16. Tension d'alimentation statorique et rotorique

II.5.2. Interprétation des résultats

Au départ, la simulation débute avec une mise en marche à vide de la machine. On observe que le régime transitoire présente des oscillations pour toutes les grandeurs de la machine. Une fois que la machine atteint son régime permanent, sa vitesse de rotation se rapproche de la vitesse de synchronisme, avec un très faible glissement (Figure II.12). De plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche de zéro en raison de la présence des frottements visqueux.

L'application d'un couple résistant entraîne une augmentation du couple électromagnétique, de l'amplitude des courants statoriques et rotoriques, ainsi qu'une diminution de la vitesse de rotation en raison d'un glissement accru. Dans ces conditions, la machine fonctionne en tant que moteur hypo synchrone.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans le MATLAB la structure d'une MADA, qui est largement utilisée dans l'énergie éolienne (fonctionnement générateur), en examinant ses différentes configurations.

Ensuite, pour simplifier le modèle de la machine, nous avons établi son modèle dans un système d'axe biphasé (d-q) lié au stator à l'aide de la transformation de Park. Les résultats de la simulation ont montré que pour le fonctionnement de la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui détermine le mode de fonctionnement générateur. L'étude de fonctionnement de la MADA a mis en évidence sa stabilité dans ce cas.

La modélisation et la simulation de la MADA ont permis de mieux comprendre son fonctionnement et son comportement dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats obtenus ont montré l'importance des courants statoriques et rotoriques lors du démarrage, ainsi que leur stabilisation et leur forme sinusoïdale après l'application de la charge. De plus, la simulation a permis de mettre en évidence que le couple électromagnétique est positif pendant le régime dynamique et atteint une valeur maximale au démarrage.

Ces résultats sont importants pour l'optimisation de la conception et du fonctionnement de la GADA, ainsi que pour la mise en place de stratégies de contrôle efficaces pour maximiser son efficacité énergétique et sa fiabilité.

Ce modèle sera utilisé dans le chapitre suivant pour étudier la stratégie de commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive.

CHAPITRE III

LA COMMANDE VECTORIELLE D'UNE GADA

III.1. Introduction

La commande vectorielle, également connue sous le nom de commande à flux orienté, est une technique de contrôle avancée largement utilisée dans le contrôle des GADA. Ce chapitre se concentre sur l'application de la commande vectorielle à une GADA, qui est une configuration particulièrement intéressante pour les systèmes d'énergie renouvelable tels que l'éolien ou l'hydroélectricité. Cette commande vise à réguler le flux magnétique et le couple de la génératrice en contrôlant les courants statoriques. Pour cela, des modèles mathématiques de la machine sont utilisés pour estimer et réguler les grandeurs internes de la génératrice, telles que le flux rotorique et le couple électromagnétique. Ces grandeurs sont ensuite utilisées pour générer les références de courant statorique nécessaires pour atteindre les objectifs de contrôle souhaités, tels que la régulation de la puissance active ou réactive fournie par la génératrice.

Aussi, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d , q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur).

On ajoute que lorsqu'on implique un onduleur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) dans la commande vectorielle d'une GADA, cela permet de contrôler précisément le flux magnétique et le couple électromagnétique de la machine en ajustant les signaux de tension envoyés aux bobines statoriques. L'onduleur MLI convertit l'énergie électrique en signaux de tension pulsés en modifiant la durée et la fréquence des impulsions. Cela offre une flexibilité accrue pour répondre aux besoins spécifiques du système d'énergie renouvelable et optimiser la performance de la génératrice.

III.2. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle vise à simplifier le modèle de la machine asynchrone afin de permettre un contrôle indépendant du flux et du couple en mode moteur, ainsi que des puissances active et réactive en mode générateur. Pour ce faire, l'axe " d " du repère de Park est aligné avec le flux rotorique (ou statorique) de la MADA. Cette orientation permet de simplifier les équations de commande en éliminant les termes liés au flux dans l'axe " q ". Ainsi, le contrôle du flux se fait uniquement en ajustant le courant dans l'axe " d ", tandis que le contrôle du couple

se fait en ajustant le courant dans l'axe "q". Cela permet une régulation indépendante et précise de ces grandeurs, ce qui facilite l'optimisation du fonctionnement de la MADA en fonction des exigences du système. En alignant l'axe "d" avec le flux, la commande vectorielle garantit une gestion efficace de la puissance active et réactive, ainsi qu'une meilleure performance globale de la génératrice [33].

III.3. Les différentes techniques de la commande vectorielle

Il existe deux méthodes pour commander la MADA. La première méthode consiste à commander directement les puissances statoriques en utilisant les tensions rotoriques, cette approche est appelée méthode directe. L'autre méthode consiste à commander les puissances statoriques à l'aide de deux boucles distinctes, une pour le courant et une autre pour la puissance. Cette approche est connue sous le nom de méthode indirecte.

La différence entre ces deux méthodes réside dans leur complexité. La méthode directe est plus simple par rapport à la méthode indirecte. Cependant, la méthode indirecte offre une meilleure protection de la machine car elle permet de contrôler les courants [34].

III.4. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

- **Avantages :** La commande vectorielle est largement utilisée dans les GADA des systèmes éoliens. Elle permet un contrôle précis du couple et de la vitesse du générateur, ce qui maximise la production d'énergie éolienne en adaptant rapidement la vitesse du rotor aux variations du vent. De plus, la commande vectorielle offre une réponse dynamique élevée, permettant au générateur de s'ajuster rapidement aux fluctuations de charge et de maintenir une tension et une fréquence stables dans le réseau électrique.
- **Inconvénients :** Cependant, la mise en œuvre de la commande vectorielle dans les GADA peut être complexe. Elle nécessite des calculateurs de puissance avancés et des algorithmes de commande sophistiqués pour gérer les interactions entre le rotor et le stator du générateur. La maintenance peut également être plus délicate en raison de la complexité du système de commande. Malgré ces défis, la commande vectorielle reste une solution efficace pour optimiser les performances des générateurs asynchrones à double alimentation dans les applications éoliennes [35].

III.5. Établissement du modèle de la GADA

Nous optons pour une modélisation diphasée de la machine et nous choisissons d'orienter le repère ($d - q$) de telle sorte que l'axe "d" soit aligné avec le flux statorique.

D'abord, rappelons le système d'équations différentielles qui décrit la génératrice décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est l'équation [36] :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (III-1)$$

III.5.1. Choix de référentiel pour le modèle diphasé

Dans le cadre de ce travail, nous allons présenter le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la GADA. Comme illustré dans la (figure.III.1) nous allons caler le flux sur l'axe 'd' et la tension du stator sur l'axe 'q'. Cette contrainte nous permet de disposer d'un modèle de commande simplifié [37].

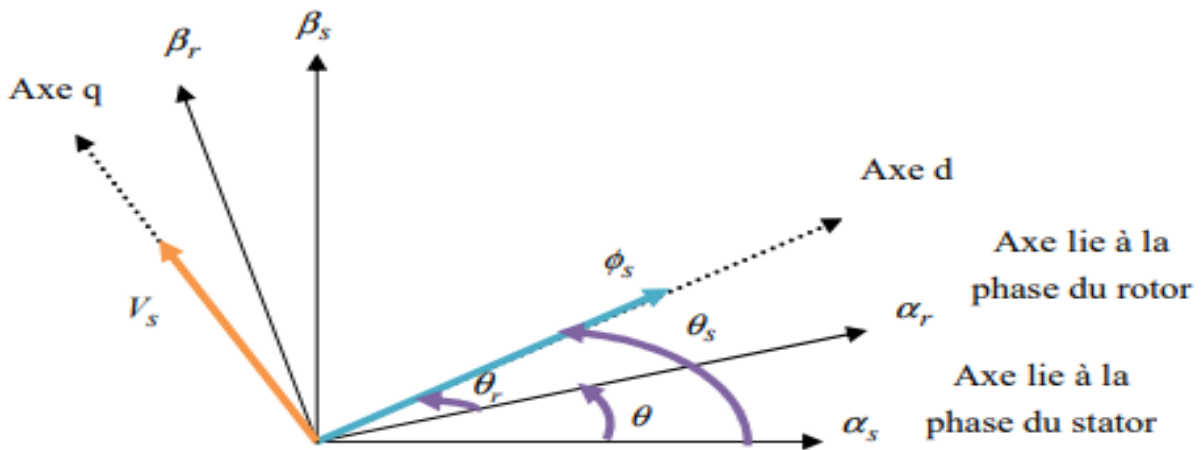


Figure.III.1. Orientation du flux statorique sur l'axe 'd'

Les grandeurs de contrôle dans les MADA sont les tensions statorique et rotorique. Avant de poursuivre, il convient de rappeler le système d'équations de la machine sans orientation du flux statorique :

En appliquant la méthode d'orientation du flux statorique, c'est-à-dire orienter le repère de Park avec un angle qui assure que le flux soit aligné avec l'axe direct 'd' du repère (d, q), ce qui conduit à :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Ensuite :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Pour les machines de grandes et moyennes puissances utilisées dans l'énergie éolienne, la résistance des enroulements statorique est négligeable ($R_s \approx 0$). En plus, le réseau électrique connecté au stator est stable, ce qui implique que le flux est constant : $\varphi_{sd} = \varphi_s = cst \Rightarrow \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0$, donc les deux équations électriques du stator deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Ces équations montrent que le flux est en retard de $(\pi/2)$ par rapport à la tension parce qu'il tourne avec la même vitesse angulaire de cette dernière.

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

III.5.1.1. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

L'utilisation de l'hypothèse d'orientation ($\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $\varphi_{sq} = 0$), permet de simplifier les relations entre les flux et les courants :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{(\varphi_{sd} - M \cdot I_{rd})}{L_s} \\ I_{sq} = -\left(\frac{M \cdot I_{rq}}{L_s}\right) \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

III.5.1.2. Relation entre les puissances statoriques et les courant rotoriques

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, les équations de puissances actives et réactives peuvent se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{sq} \\ Q_s = -V_s \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

En remplaçant (III-6) dans (III-7) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M \cdot I_{rq}}{L_s} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{(M \cdot I_{rd} - \varphi_s)}{L_s} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Avec : $V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \Rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$

III.5.1.3. Relation entre les tensions rotoriques et les courant rotoriques

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leurs expressions, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rd} + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s L_s} \right) - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \omega_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

Avec : $\omega_r = g \cdot \omega_s$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s L_s} \right) - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + g \cdot \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

En situation de régime permanent, les termes impliquant les dérivées des courants rotoriques biphasés s'annulent, ce qui nous permet d'établir les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (III-12)$$

En effectuant la transformation de Laplace sur ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rd} - g \cdot w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rq} + g \cdot w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (III-13)$$

À partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre.

Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la GADA est illustré dans la (figure.III.2) :

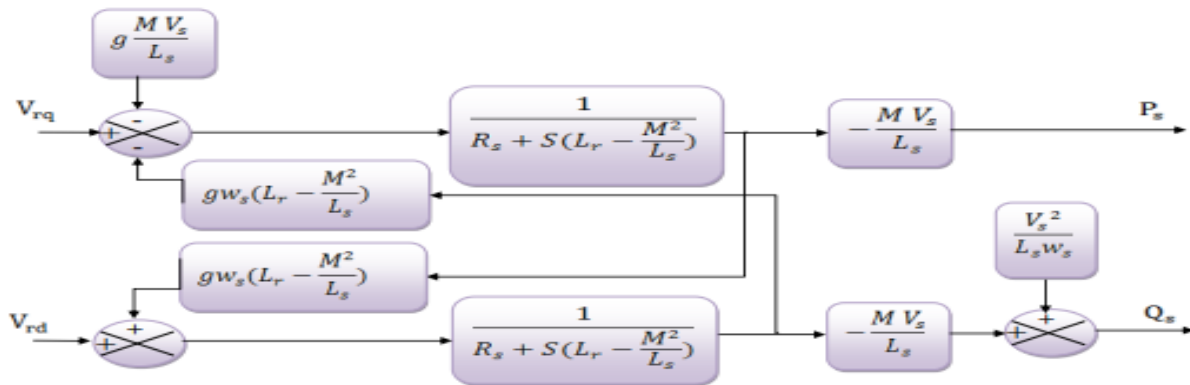


Figure.III.2. Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la GADA

Dans ce schéma, nous avons inclus des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes reliant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Cela nous permet de mettre en œuvre une commande vectorielle. Comme l'impact du couplage est négligeable, chaque axe peut être contrôlé de manière indépendante à l'aide de son propre régulateur [38].

III.6. Commande vectorielle de la GADA avec un onduleur à deux niveaux

III.6.1. Modélisation de l'onduleur à MLI

L'onduleur de tension est un dispositif électronique qui convertit une tension continue en une tension alternative à fréquence et valeur efficace fixes ou ajustables. Il est composé d'une cellule de commutation généralement équipée de transistors ou de thyristors pour les

applications de grande puissance. Pour commander l'onduleur, la méthode la plus courante est la modulation de largeur d'impulsion (MLI). La structure à trois bras est présentée sur la (figure.III.12).

Pour garantir que les courants alternatifs i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} soient continus, il est nécessaire de contrôler les interrupteurs (T_1 et T'_1), (T_2 et T'_2), et (T_3 et T'_3) de manière complémentaire. Les tensions de sortie de l'onduleur, V_{Ao} , V_{Bo} et V_{Co} , sont référencées par rapport à un point milieu fictif d'un pont diviseur d'entrée appelé point "o" pour plus de commodité. Afin que ces tensions soient identiques à 1/3 de la période près, chaque interrupteur doit être commandé avec un retard d'une période de 1/3 par rapport à celui du demi-pont précédent. Cela permet de réduire les risques de court-circuitage entre les phases et de garantir un fonctionnement sûr et fiable de l'onduleur [39].

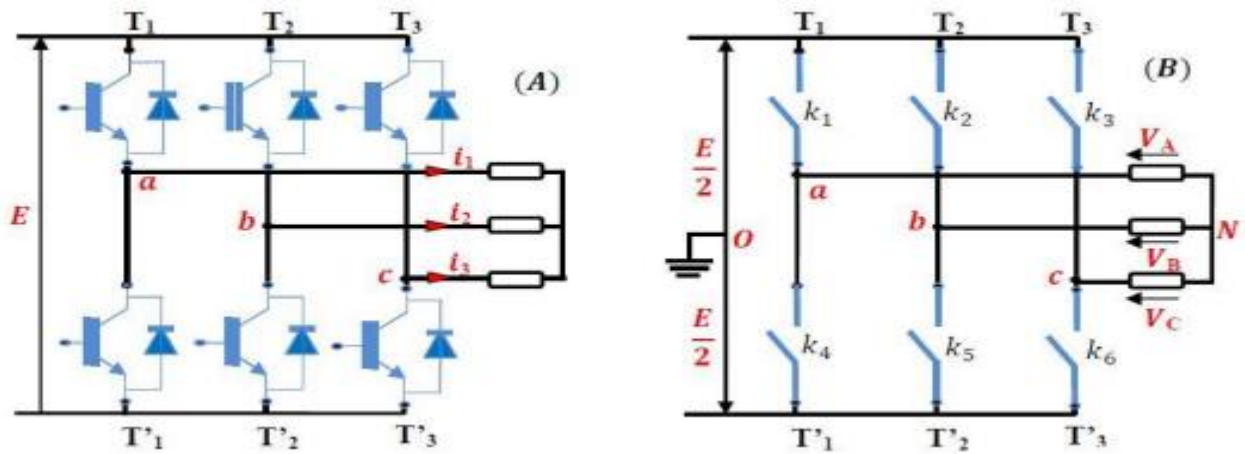


Figure.III.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

L'onduleur est alimenté par une source de tension continue constante d'amplitude E , on déduit aisément les expressions des tensions composées :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ V_{BC} = V_{Bo} - V_{Co} \\ V_{CA} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (III-14)$$

Les tensions simples des phases de la charge issue des tensions composées ont une somme nulle :

$$\begin{cases} V_{An} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{AB} - U_{CA}] \\ V_{Bn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{BC} - U_{AB}] \\ V_{Cn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{CA} - U_{BC}] \end{cases} \quad (III-15)$$

La matrice de connexion [T] de l'onduleur s'écrit :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III-16})$$

Les tensions imposées de chaque bras de l'onduleur sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-17})$$

En remplaçant les trois tensions composées de l'équation (III-14) dans l'équation (III-15) on trouve :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3}V_{Ao} - \frac{1}{3}V_{Bo} - \frac{1}{3}V_{Co} \\ V_{Bn} = -\frac{1}{3}V_{Ao} + \frac{2}{3}V_{Bo} - \frac{1}{3}V_{Co} \\ V_{Cn} = -\frac{1}{3}V_{Ao} - \frac{1}{3}V_{Bo} + \frac{2}{3}V_{Co} \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

Peut-être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} \quad (\text{III-19})$$

III.6.2. Commande par modulation largeur d'impulsion MLI

La stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulaire sinusoïdale utilise une onde modulante et une onde porteuse triangulaire pour contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. Les deux paramètres qui caractérisent cette stratégie sont [40] :

- Le rapport cyclique : C'est le rapport entre la durée pendant laquelle l'interrupteur est ouvert et la durée totale du cycle de commutation. Ce paramètre est déterminé par la comparaison de l'amplitude de l'onde modulante et de l'onde porteuse triangulaire.
- La fréquence de commutation : C'est la fréquence à laquelle les interrupteurs sont ouverts et fermés. Elle dépend de la fréquence de l'onde porteuse triangulaire.

En modulant la largeur des impulsions de la porteuse triangulaire en fonction de l'onde modulante, la stratégie permet de générer un signal de sortie qui est une version amplifiée de l'onde modulante. Cette stratégie est largement utilisée dans les convertisseurs de puissance, les onduleurs et les variateurs de vitesse.

III.7. Types de régulateurs utilisés et calcul du régulateur PI

Nous allons maintenant synthétiser les régulateurs nécessaires pour la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) est largement utilisé pour la commande de la GADA, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe sont chargés de réduire l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées.

La (Figure.III.3) illustre une section du système bouclé qui a été corrigée à l'aide d'un régulateur PI. Le régulateur PI a une fonction de transfert de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$, ce qui est conforme aux régulateurs utilisés dans notre commande [41].

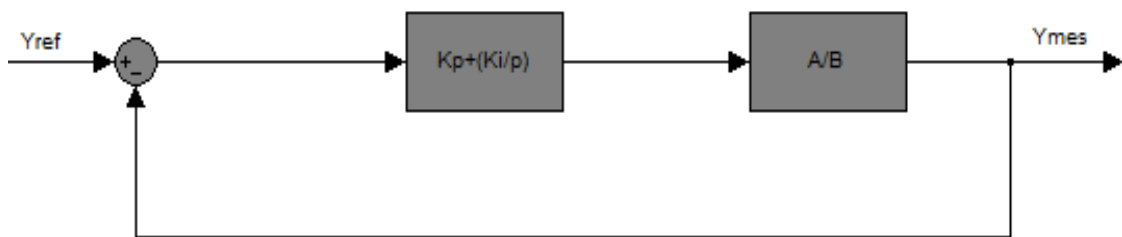


Figure.III.4 : Schéma bloc de régulateur PI

Ou $A = M \cdot V_s$

Et $B = L_s \cdot R_r + p \cdot L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$

La formulation de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs est la suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{L_s \cdot R_r}{p + \frac{M^2}{L_s}}} \quad (III-20)$$

Nous optons pour l'approche de compensation des pôles lors de la synthèse du régulateur pour éliminer le zéro de la fonction de transfert. Cela nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III-21)$$

En effectuant la compensation, la FTBO obtenue est la suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{M \cdot V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (III-22)$$

Ce qui nous donne en BF :

$$FTBF = \frac{1}{1+p.\tau_r} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} \quad (\text{III-23})$$

Si nous considérons un temps de réponse τ_r (5%) de 1 ms, le résultat obtenu est le suivant :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} = 1.8036.10^{-2} \quad (\text{III-24})$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r.L_s}{M.V_s} = 2.7026 \quad (\text{III-25})$$

III.8. Simulation et interprétations des Résultats de la commande

III.8.1. Résultats de la simulation

En utilisant MATLAB, nous avons effectué une simulation pour évaluer les performances de la commande vectorielle appliquée à la GADA et entraînée à une vitesse fixe égale à 1425tr/min, cette GADA est alimentée au côté de rotor par un onduleur à deux niveaux, en utilisant la stratégie de commande "triangulaire-sinusoidale". Les résultats obtenus, présentés dans les figures ci-dessous, mettent en évidence le comportement du système. La simulation a débuté suivant l'application d'une puissance active $P_s = -3000$ W entre $t = 0$ s et $t = 5$ s, $P_s = -3800$ W à partir de 5s. Ainsi qu'une puissance réactive $Q_s = 1000$ VAR entre $t = 5$ s et $t = 6.5$ s. Ces résultats nous permettent d'évaluer la performance globale de la GADA et de mettre en évidence son comportement dynamique dans ces conditions de fonctionnement spécifique.

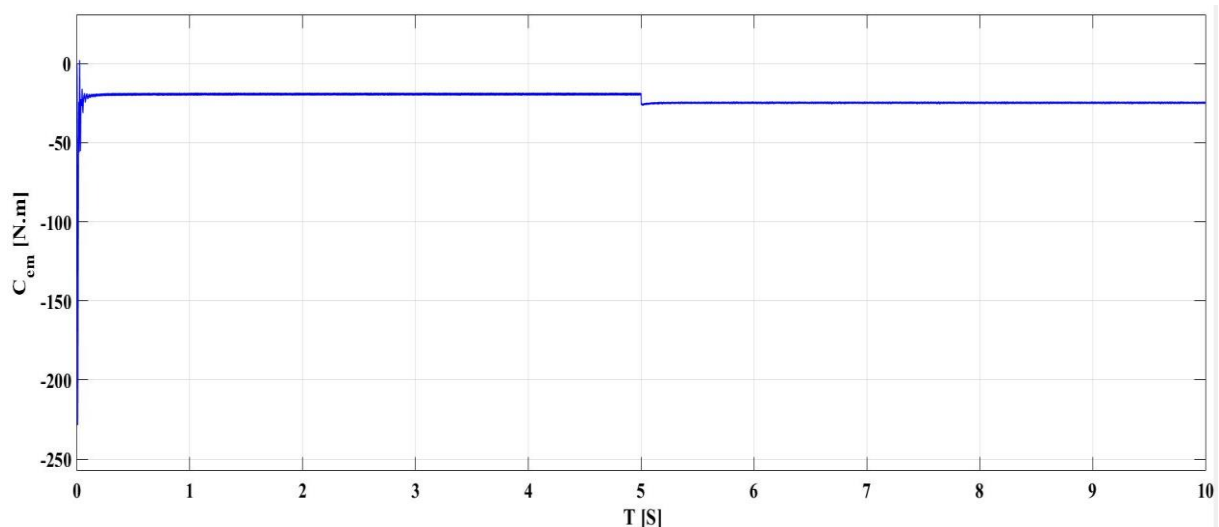


Figure.III.5 : le couple électromagnétique

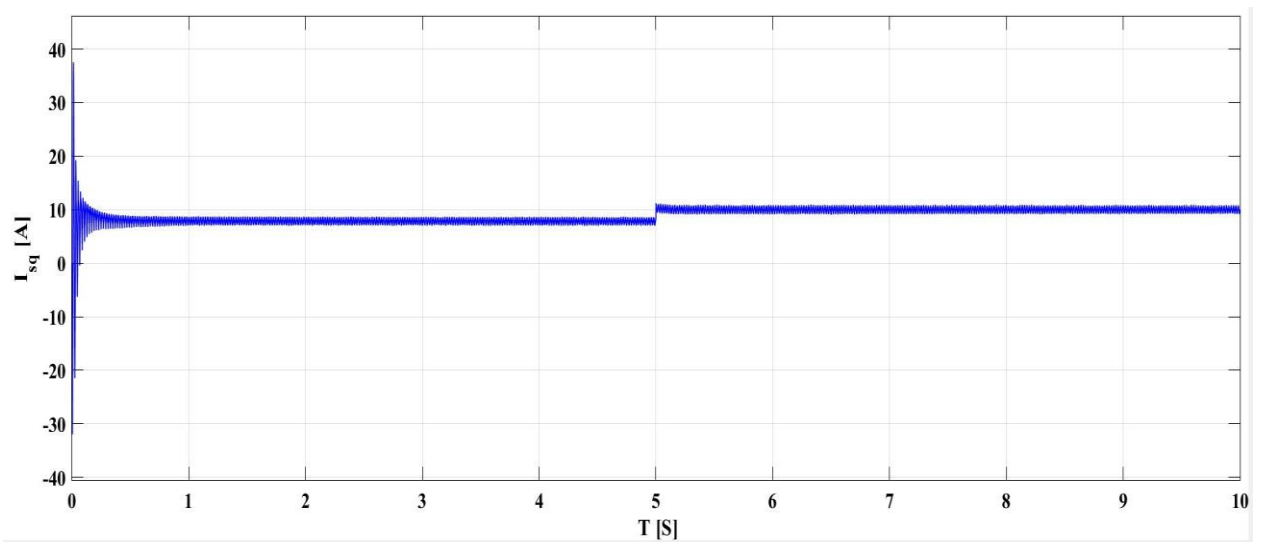
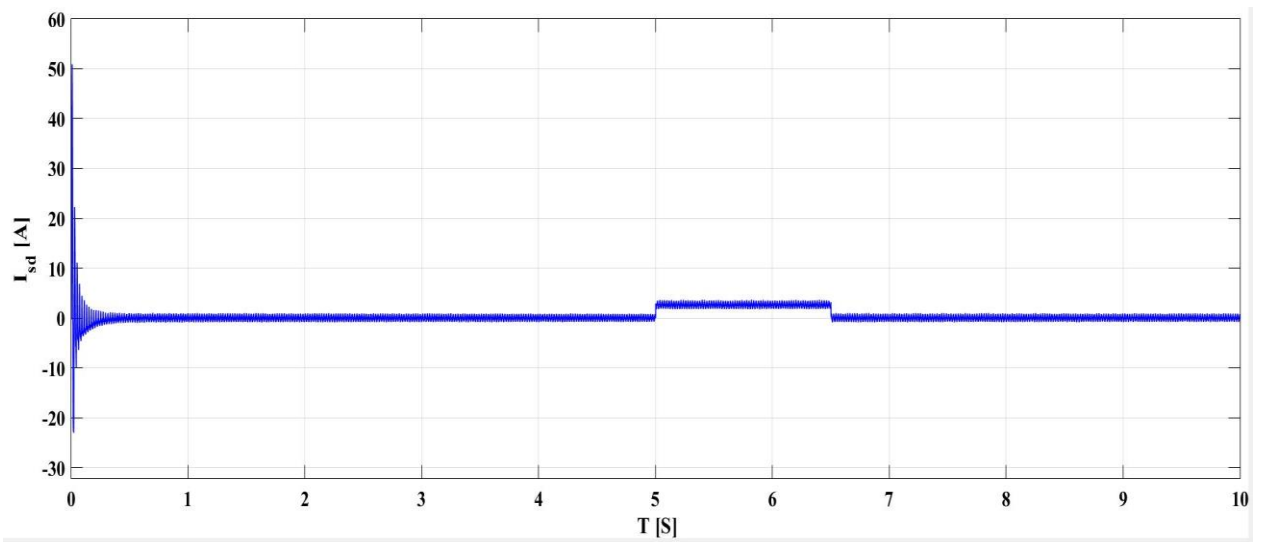


Figure.III.6 : Les courants statoriques (direct et quadrature)

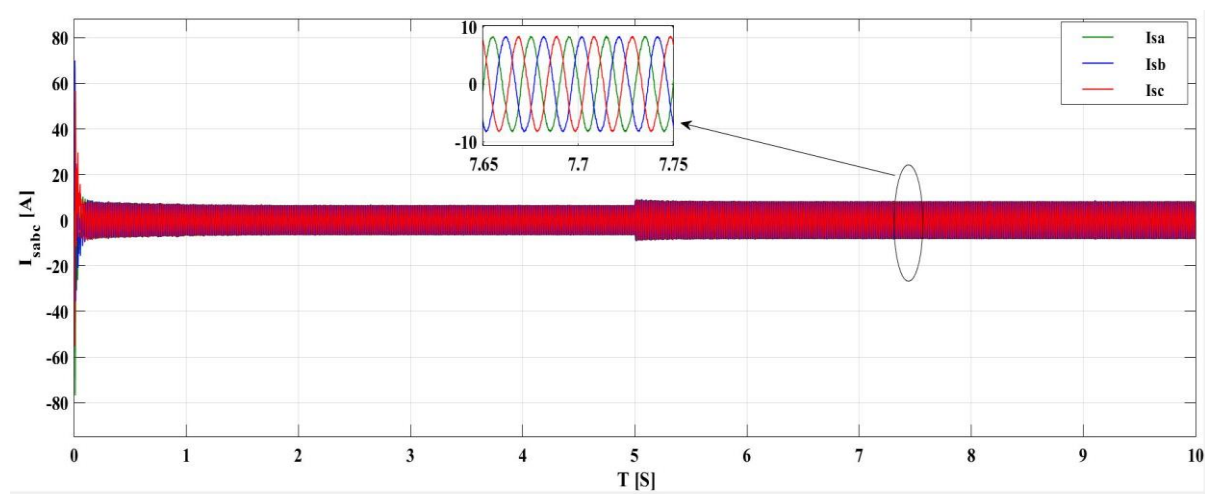


Figure.III.7 : Les courants statoriques des phases A, B et C

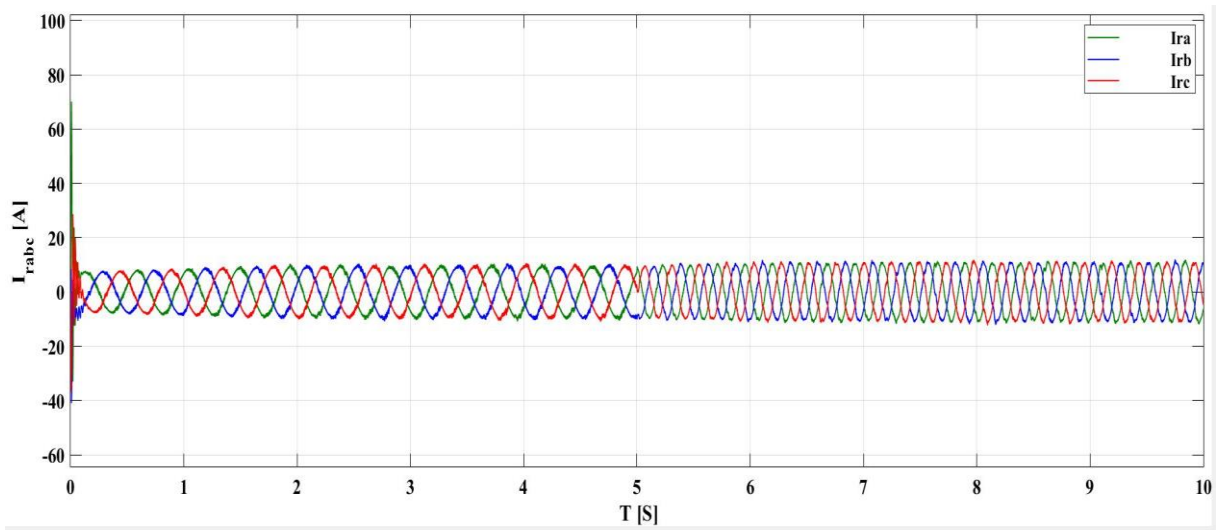


Figure.III.8 : Les courants rotoriques des phases A, B et C

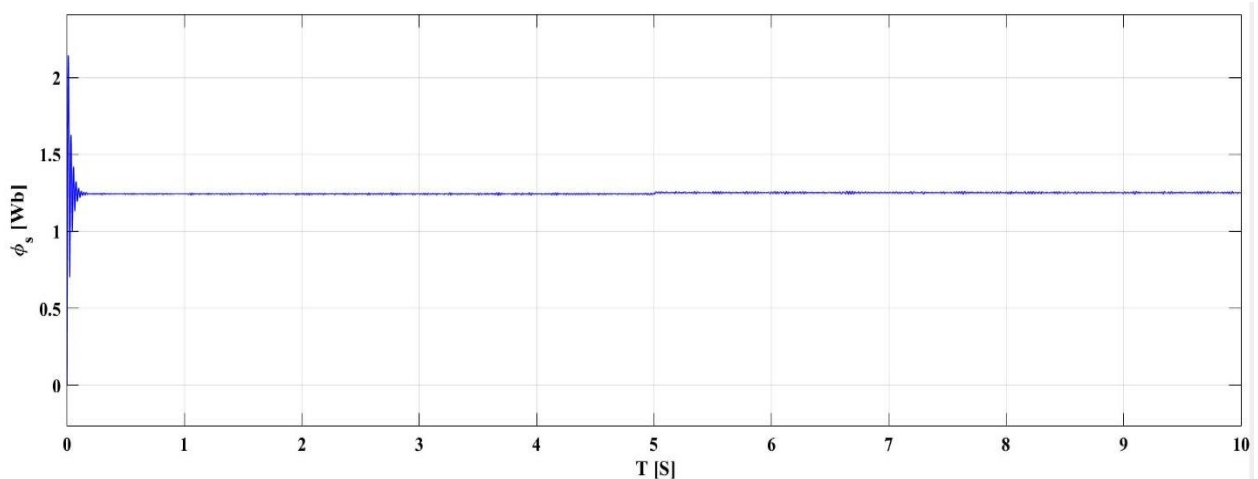


Figure.III.9 : Les flux statorique des phases A, B et C

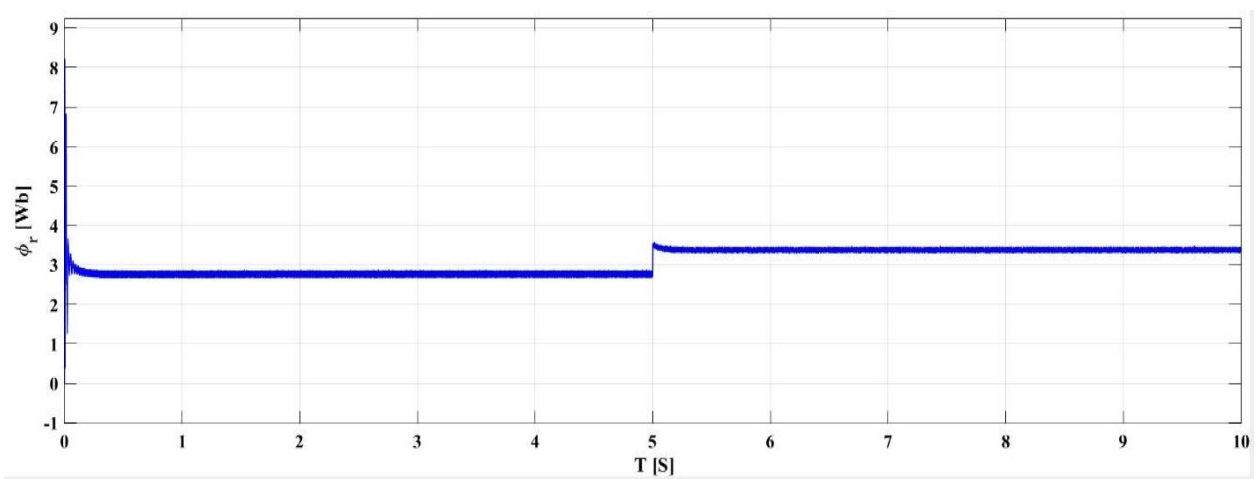


Figure.III.10 : Les flux rotorique des phases A, B et C

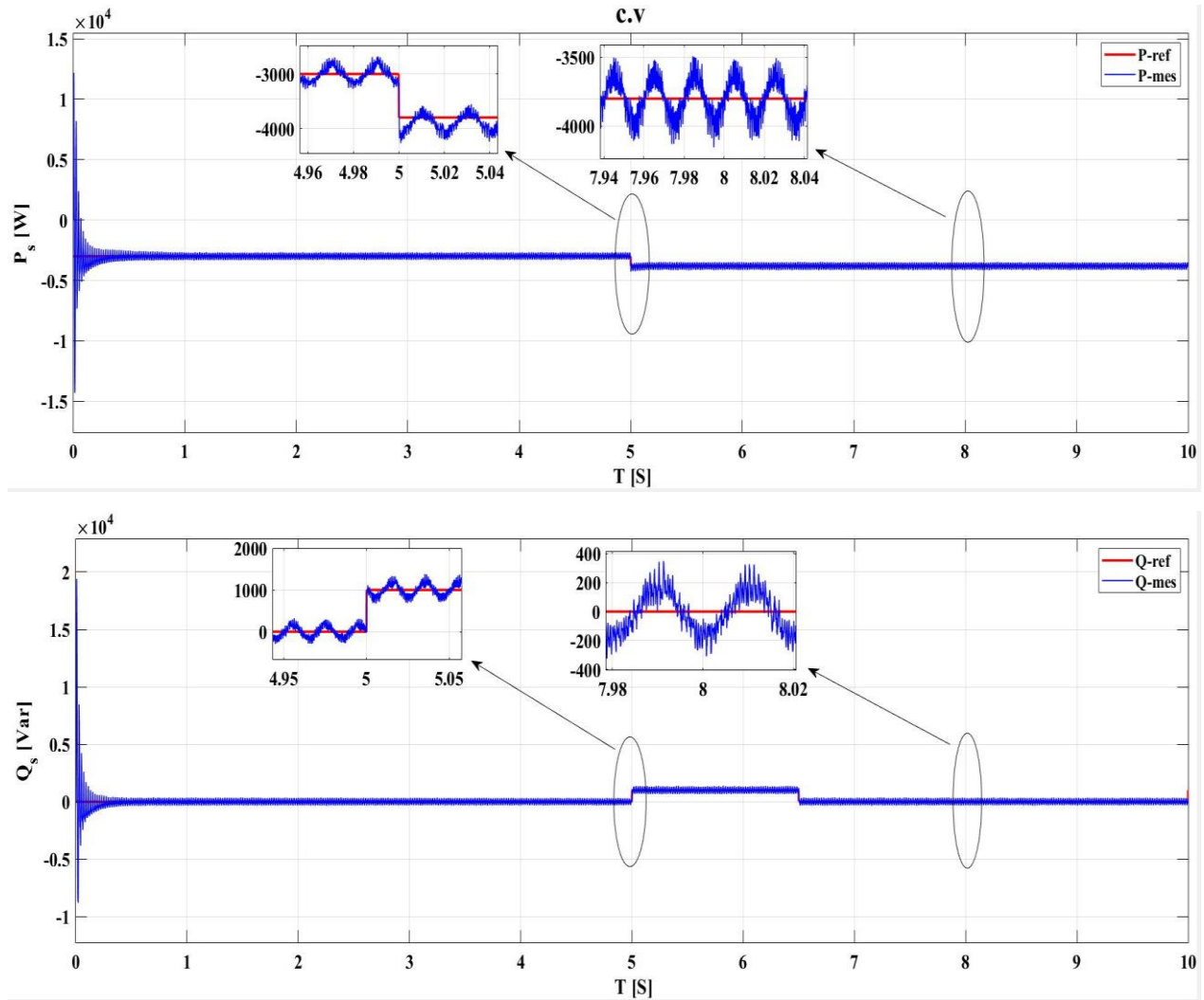


Figure.III.11 : Les puissances actives et réactives statoriques suivant leurs références avec zoom

III.8.2. Interprétation des résultats

Les résultats de la simulation montrent l'efficacité du système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante, comme le montrent les différentes figures de simulation. Les performances du système sont évaluées en termes de suivi de consigne pour les puissances actives et réactives au niveau du stator.

On observe que les courants du réseau suivent parfaitement leurs références, ce qui indique un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives au niveau du stator.

De plus, il est intéressant de noter que le couple électromagnétique est directement influencé par la puissance active au niveau du stator. Cela se traduit par une forme identique entre le profil de la P_s et celui du C_{em} , observée à l'instant 5s.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle pour la régulation de la puissance active et réactive au niveau du stator. Le choix de l'orientation du flux a été effectué en orientant le flux statorique le long de l'axe ' d '. La méthode du flux orienté, largement utilisée depuis plusieurs années pour la MADA, reste la plus préférée. En effet, cette méthode permet non seulement de simplifier le modèle de la machine, mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

De plus, nous avons étudié deux configurations de la commande vectorielle d'une GADA. Tout d'abord, nous avons analysé les performances de la GADA sans onduleur, en évaluant les résultats de simulation. Ensuite, nous avons examiné les performances de la commande vectorielle lorsque l'onduleur est associé à la GADA. Ces simulations nous ont permis de mieux comprendre l'impact de l'onduleur sur la régulation de la puissance active et réactive au niveau du stator.

Ces résultats de simulation nous ont permis d'analyser le comportement du système et d'évaluer l'efficacité de la commande vectorielle pour la régulation de la puissance active et réactive statorique dans le contexte de la GADA. Ces informations sont précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes d'alimentation électrique utilisant ce type de machine.

CHAPITRE IV

**LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'UNE
GADA**

IV.1. Introduction

L'étude de la commande par mode glissant de la GADA est un domaine de recherche important dans le contrôle des systèmes électromécaniques. Le mode glissant est une technique de commande non linéaire qui permet de concevoir des lois de commande robustes face aux perturbations, non-linéarités et incertitudes du système.

L'objectif de cette étude est de développer des stratégies de commande efficaces pour contrôler la vitesse, le courant et la puissance de la GADA par mode glissant. Cette stratégie de commande permet de réguler les performances du système électromécanique, d'optimiser l'utilisation de l'énergie et de garantir la sécurité et la fiabilité du système.

Cette étude nécessite une connaissance approfondie des propriétés électromécaniques de la GADA, de la théorie de la commande en mode glissant et des techniques de simulation numérique pour valider les résultats théoriques. Les applications de cette étude sont larges, allant de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables, tels que l'éolien et l'hydraulique, à la propulsion électrique des navires et des trains.

VI.2. Historique de la commande par mode glissant

Le mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en union soviétique, tout d'abord par le professeur EMELYANOV, puis par d'autres collaborateurs également UTKIN, à partir des résultats des études du mathématicien FILIPOVE sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par SLOTINE, et au Japon par Young, HARASHIMA et HASHIMOTO. Ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [42].

VI.3. Principe de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant.

Ainsi, 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 d'y rester au voisinage de cette surface (figure suivante). Cette dernière est appelée surface de glissement [42, 43].

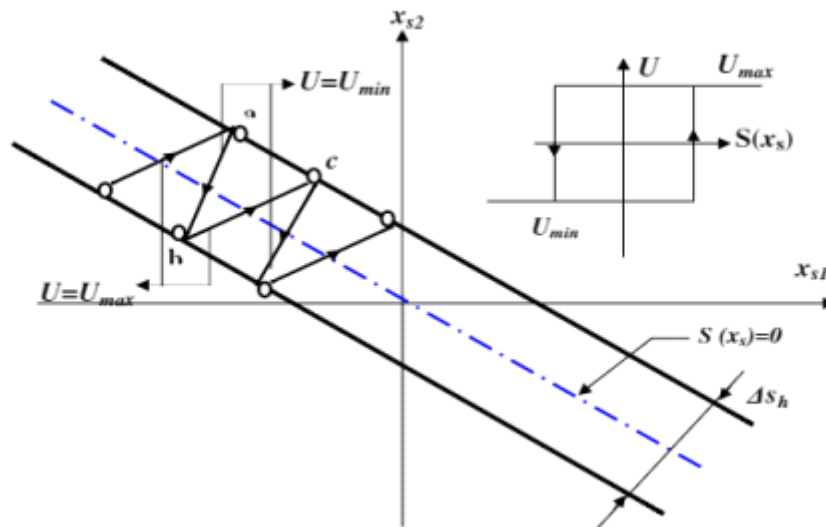


Figure.IV.1. Mode de glissement réel

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence (MC) : durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation $S(x)=0$ et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG) : durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x)=0$.
- Le mode de régime permanent (MRP) : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

IV.4. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

- **Avantages** : l'avantage principal de cette méthode de commande est sa capacité à fournir un bon contrôle de la vitesse et de la puissance de la génératrice. Le mode glissant permet de réguler la vitesse de rotation de la génératrice en ajustant la

fréquence de l'alimentation principale. Cela permet de maintenir une vitesse constante même en présence de variations de charge ou de perturbations du réseau électrique. De plus, la double alimentation offre une plus grande flexibilité en permettant d'alimenter la génératrice à partir de deux sources d'énergie distinctes, ce qui peut être utile dans les systèmes où la disponibilité d'énergie est variable [44].

- **Inconvénients** : D'un autre côté, la commande par mode glissant peut présenter certains inconvénients. Tout d'abord, cette méthode nécessite une régulation précise de la fréquence de l'alimentation principale, ce qui peut être complexe et nécessiter des capteurs et des contrôleurs sophistiqués. De plus, la réponse de la génératrice asynchrone à double alimentation peut être plus lente que celle des autres types de génératrices, en raison de l'inertie du système. Cela peut entraîner des temps de réponse plus longs lors des variations de charge, ce qui peut être préjudiciable dans certaines applications sensibles aux variations rapides de la puissance électrique.

IV.5. Conception de la commande par mode glissant

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent [45] :

- Le choix des surfaces.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- La détermination de la loi de commande.

IV.5.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé. Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur erreur du vecteur d'état. Considérons le système non linéaire défini par les équations suivantes [46] :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \quad (\text{IV-1})$$

Où : $X(t)$ est le vecteur d'état, $U(t)$ est le vecteur de commande.

Les surfaces de glissement S sont définies par la disparition d'une variable glissant correspondant et ses dérivées temporelles successive jusqu'à certain ordre, c'est-à-dire r^{th} l'ordre défini précédemment. La surface de glissement définie dans le formalisme réduit l'ordre du système en boucle fermée, ce qui ne permet pas dans certains cas, d'imposer au système un mode de stabilisation.

La surface de glissement $S(x) = 0$ représente le comportement dynamique désiré du système, **Stoline** propose une forme générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur désirée x_{ref} cette fonction est donnée par l'équation.

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1}(x_{ref} - x) \quad (IV-2)$$

r : est le degré relatif au nombre qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande

λ : est une constante positive.

IV.5.2. Conditions l'existence et de convergence au mode glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence :

➤ Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, elle est donnée sous la forme :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (IV-3)$$

➤ Approche LYAPUNOV

Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$.

Cette fonction de LYAPUNOV est définie comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad (\text{IV-4})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{IV-5})$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV-6})$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [47].

IV.5.3. La détermination de la loi de commande

Afin d'assurer l'attractivité et l'invariance de la surface de glissement, on doit définir une loi de commande sous la forme suivante [1] :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{IV-7})$$

Telle que U_{eq} est la commande équivalente définie par UTKIN correspond à la commande du système nominale permettant de satisfaire la condition $\dot{S}(x) = 0$.

La dérivée de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} (A \cdot x(t) + B \cdot U(t)) \quad (\text{IV-8})$$

En remplaçant l'expression de dans l'équation (IV-8), on obtient :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} [A \cdot x(t) + B \cdot U_{eq}] + \frac{dS}{dx} B \cdot U_n \quad (\text{IV-9})$$

On déduit l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = -\left[\frac{dS}{dx} B\right]^{-1} \left[\frac{dS}{dx} A \cdot x(t)\right] \quad (\text{IV-10})$$

Avec la condition d'existence :

$$\left[\frac{dS}{dx} B\right]^{-1} \neq 0 \quad (\text{IV-11})$$

Elle peut être interprétée autrement comme étant une valeur moyenne qui prend la commande

lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{max} et U_{min} .

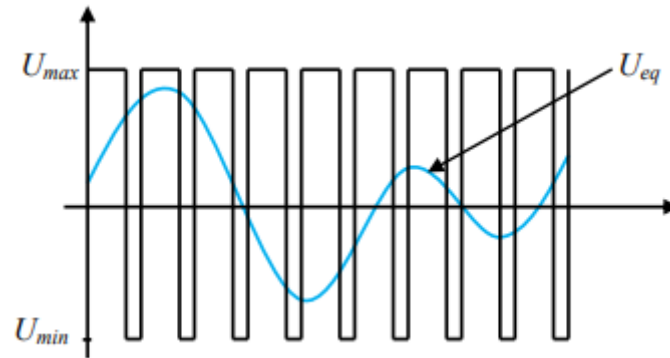


Figure IV.2. Commande équivalente

Tandis que U_n est la commande discrète qui est déterminée afin de vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système quand le système défini par l'équation (IV-1) fonctionne en régime glissant, sa dynamique vérifie la condition $\dot{S}(x) = 0$; C'est-à-dire :

$$S(x) = \frac{dS}{dt} B \cdot U_n < 0 \tag{IV-12}$$

Pour que cette condition soit vérifiée, il suffit que le signe de U_n soit opposé à celui de $S(x) = \frac{dS}{dx} B$. Généralement la commande discrète en mode glissant peut prendre la forme de type relais donnée par l'expression suivante :

$$U_n = K \cdot \text{sign}(S(x)) \tag{IV-13}$$

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

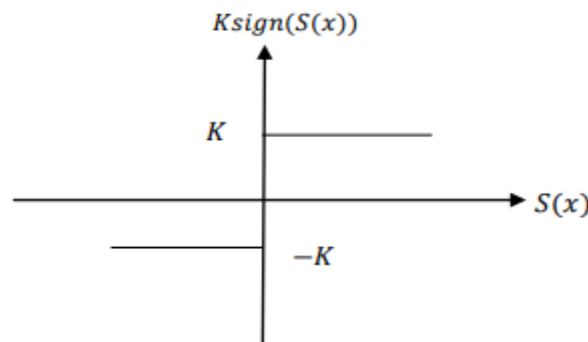


Figure IV.3. Fonction sign (Commande de type relais)

Le principal inconvénient de la commande de la fonction signe réside dans le phénomène bien connu de "chattering". En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe. Ce phénomène de chattering ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de la commande par mode de glissement, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets. L'une des solutions envisagées consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation. Pour ce faire, il suffit de substituer une fonction de saturation voir figure (III.4) à la fonction signe dont les discontinuités au voisinage de zéro sont moins brutales, cette fonction de saturation peut être exprimée par la suit :

$$sat(S(x)) = \begin{cases} K & \text{si } S(x) > \varepsilon \\ -K & \text{si } S(x) < -\varepsilon \\ \frac{K.S}{\varepsilon} & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (IV-14)$$

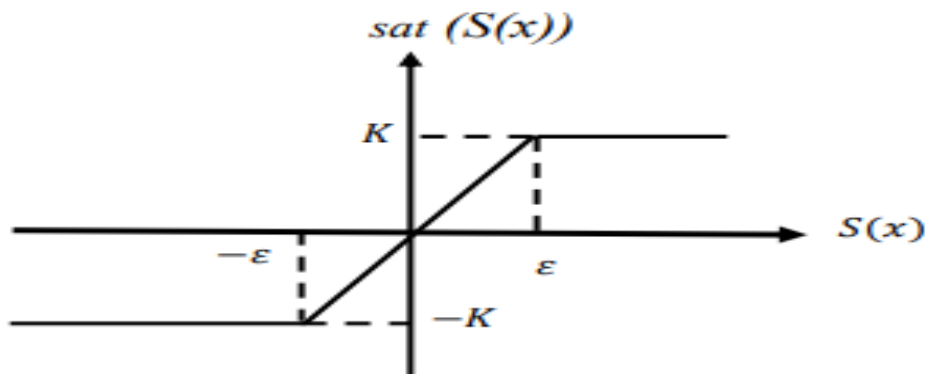


Figure IV.4. Fonction de saturation (Commande adoucie)

IV.6. Applications de la commande par mode glissant à la GADA

La commande en mode glissant est une technique de commande de vitesse de moteur qui permet de réguler la vitesse de rotation d'une machine électrique en mesurant la différence entre la vitesse de rotation réelle et la vitesse de rotation de référence, puis en ajustant la tension appliquée au stator de la machine pour maintenir la vitesse de rotation à la valeur de référence.

Dans le cas d'une GADA, la commande en mode glissant peut-être utilisée pour réguler la vitesse de rotation de la machine et contrôler la puissance électrique générée.

Voici quelques applications possibles de la commande en mode glissant à la GADA:

- Régulation de la vitesse : La commande en mode glissant peut-être utilisée pour réguler la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone double alimenté en maintenant la fréquence de sortie constante, ce qui est important pour la production d'énergie électrique de qualité.
- Contrôle de la puissance : La commande en mode glissant peut également être utilisée pour contrôler la puissance électrique générée par la génératrice asynchrone double alimenté en ajustant la tension appliquée au stator de la machine en fonction de la charge et de la vitesse de rotation.
- Réduction des pertes : La commande en mode glissant peut aider à réduire les pertes dans la génératrice asynchrone double alimenté en ajustant la tension appliquée au stator de la machine en fonction de la charge et de la vitesse de rotation, ce qui peut réduire les pertes par effet Joule et améliorer l'efficacité énergétique.
- Gestion de la transition entre les modes de fonctionnement : La commande en mode glissant peut-être utilisée pour faciliter la transition entre les différents modes de fonctionnement de la génératrice asynchrone double alimenté, tels que le passage de la production en mode autonome à la production en mode connecté au réseau électrique.

IV.6.1. Modèle de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère (d, q) .

Le modèle d'état est donné comme suit [39] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV-15)$$

✚ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (IV-16)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (IV-17)$$

✚ Equations des dérivées de courants rotoriques :

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \left(V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{w_s \cdot L_s} \right) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \end{cases} \quad (IV-18)$$

IV.6.2. Choix des surfaces de glissements

La puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d . Pour contrôler la puissance, on prend $n = 1$.

Les expressions de la surface de contrôle des puissances active et réactive sont:

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV-19)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (IV-20)$$

IV.6.3. Conditions de convergences

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles.

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt} (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (IV-21)$$

Lorsque les conditions de convergences sont satisfaites, les puissances active et réactive tendent exponentiellement vers leurs valeurs de références, et pour suivre ces valeurs, il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

Le mode glissant est réalisé à condition que la relation d'attractivité de Lyapunov soit inférieure à zéro; c'est-à-dire $S(X) \cdot \dot{S}(X) \leq 0$.

IV.6.4. Loi de commande par mode glissant

L'algorithme de commande est défini par les relations :

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (IV-22)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (IV-23)$$

avec : V_{rq}, V_{rd} : les tensions de commandes ;

$V_{rq-Equi}, V_{rd-}$: les tensions de commandes équivalentes ;

$V_{rq-attr}, V_{rd-attr}$: les tensions de commandes de commutations.

✚ Contrôle de la puissance active :

Pour contrôler la puissance active, on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient :

$$S(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (IV-24)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (IV-25)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références \dot{I}_{rq}^{ref} et \dot{I}_{rq} par leurs expressions données par les équations (IV-17) et (IV-18), on obtient :

$$\dot{S}(P) = \left(-\frac{L_s}{M.V_s} \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot (V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M.V_s}{L_s}) \right) \quad (IV-26)$$

$$\dot{S}(P) = \left(-\frac{L_s}{M.V_s} \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M.V_s}{L_s}) \right) \quad (IV-27)$$

$$\dot{S}(P) = -V_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \quad (IV-28)$$

$$-\frac{L_s}{M.V_s} \dot{P}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M.V_s}{L_s}) = -V_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \quad (IV-29)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{M.V_s} \dot{P}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M.V_s}{L_s} + L_r \cdot \sigma \cdot V_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \quad (IV-30)$$

$$\begin{cases} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{M.V_s} \dot{P}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M.V_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot V_1 \cdot \text{sgn}(s(P)) \end{cases} \quad (IV-31)$$

✚ Contrôle de la puissance réactive :

De manière similaire à ce qui a été expliqué précédemment. Pour contrôler la puissance réactive, on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient :

$$S(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (IV-32)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{I}_{rd}^{ref} - \dot{I}_{rd}) \quad (IV-33)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références \dot{I}_{rd}^{ref} et \dot{I}_{rd} par leurs expressions données par les équations (IV-17) et (IV-18), on obtient :

$$\dot{S}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (IV-34)$$

$$\dot{S}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (IV-35)$$

$$\dot{S}(Q) = -V_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (IV-36)$$

$$\left(\left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) = -V_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (IV-37)$$

$$V_{rd} = L_r \cdot \sigma \left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) + L_r \cdot \sigma \cdot V_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (IV-38)$$

$$V_{rd} = L_r \cdot \sigma \left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot V_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (IV-39)$$

$$\begin{cases} V_{rd-Equi} = L_r \cdot \sigma \left(\frac{V_s}{w_{s.M}} - \frac{L_s}{V_{s.M}} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} \\ V_{rd-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot V_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \end{cases} \quad (IV-40)$$

Les équations (IV-40) et (IV-31) permettent d'établir un schéma bloc de commande par mode glissant appliqué à une GADA (Figure IV.5), qui comprend plusieurs blocs fonctionnels, tels que l'estimation du glissement, la régulation de la fréquence du réseau, la régulation de la tension du réseau, la régulation de la puissance active et réactive. Ces blocs fonctionnels sont interconnectés pour former un système de commande cohérent qui permet de maintenir la stabilité et la qualité de l'énergie produite par la génératrice.

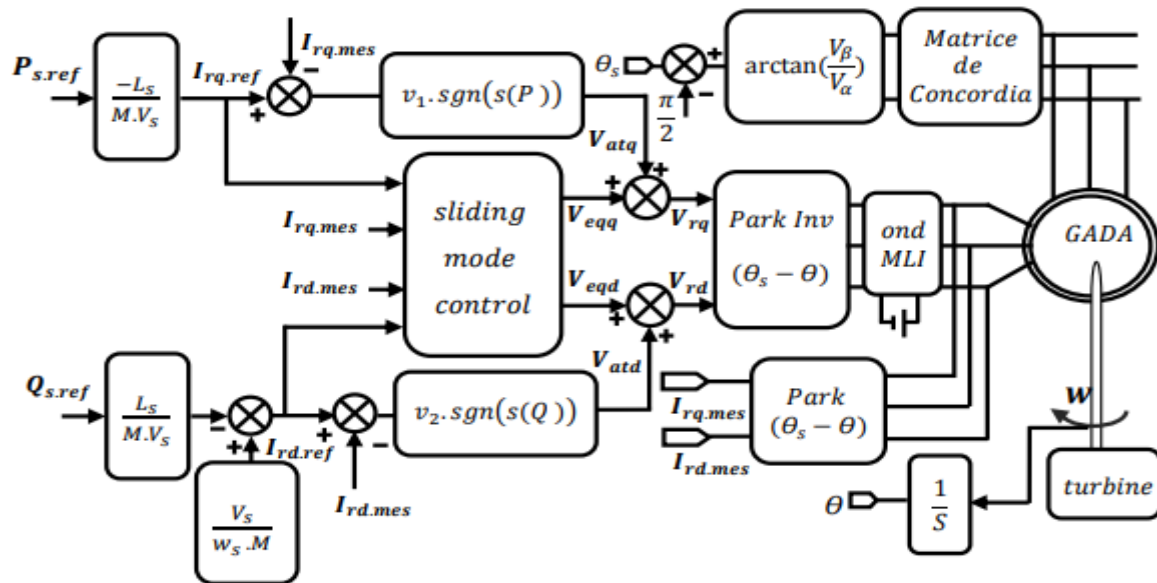


Figure.IV.5 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant

IV.7. Simulation et interprétations des Résultats de la commande

IV.7.1. Résultats de la simulation

Nous avons utilisé MATLAB pour effectuer une simulation visant à évaluer les performances de la commande par mode glissant appliquée à une GADA entraînée à une vitesse fixe de 1425 tr/min. La GADA est alimentée au côté de rotor par un onduleur à deux niveaux. Les figures ci-dessous présentent les résultats obtenus, mettant en évidence le comportement du système. La simulation a débuté avec l'application d'une puissance active $P_s = -3000$ W entre $t = 0$ s et $t = 5$ s, puis $P_s = -3800$ W à partir de 5 s. De plus, une puissance réactive $Q_s = 1000$ VAR a été appliquée entre $t = 5$ s et $t = 6.5$ s. Ces résultats nous permettent d'évaluer les performances globales de la GADA et de mettre en évidence son comportement dynamique dans ces conditions de fonctionnement spécifiques.

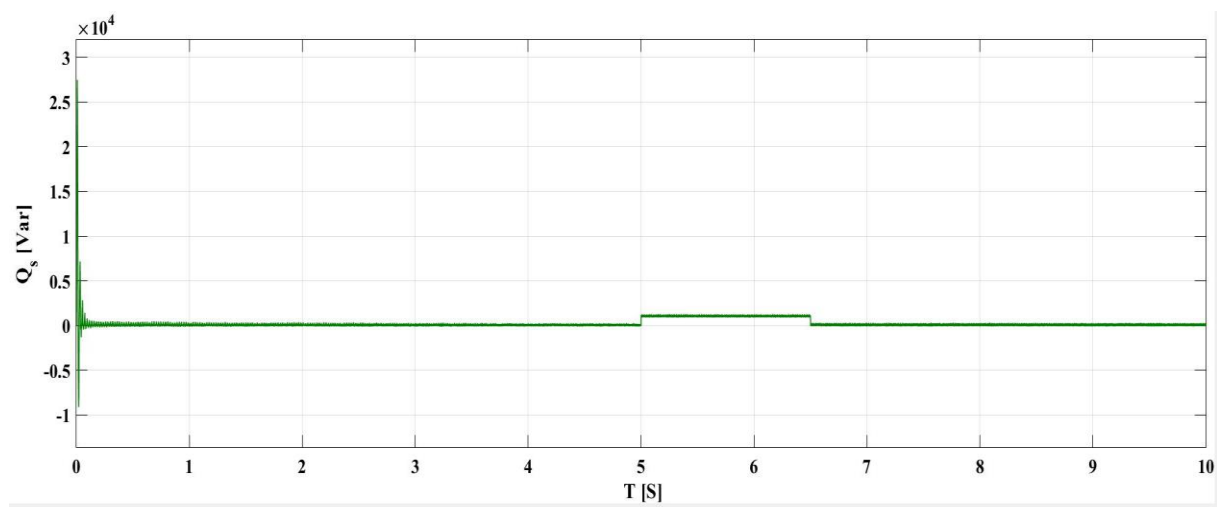
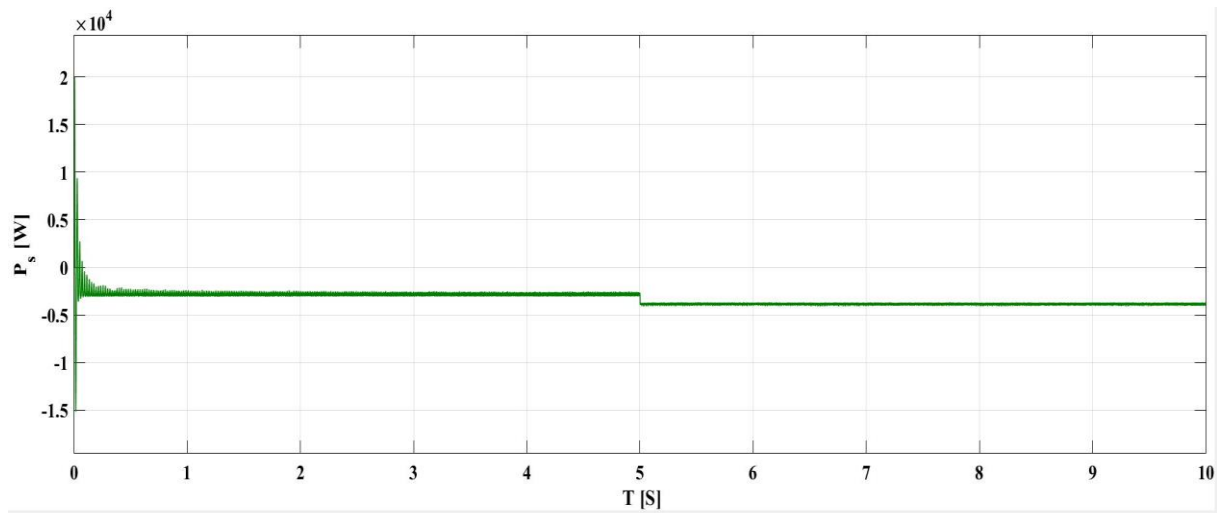


Figure.IV.6 : La puissance active et réactive statorique

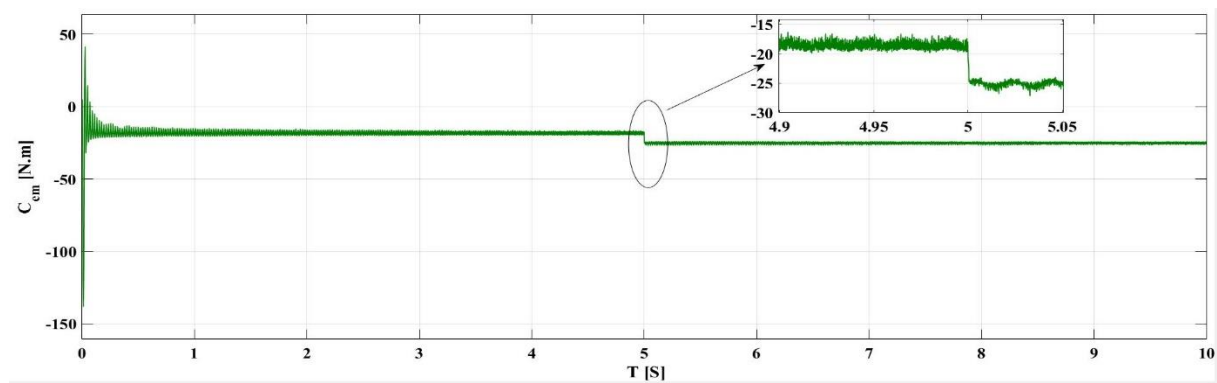


Figure.IV.7 : Le couple électromagnétique

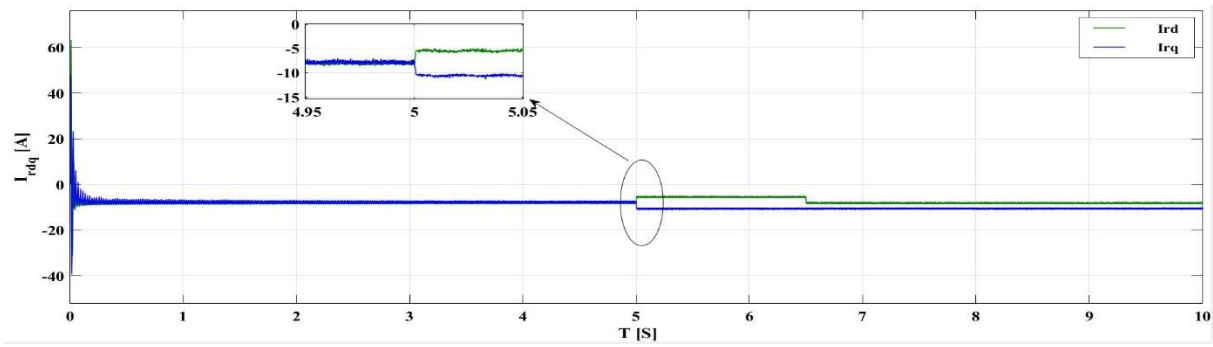


Figure.IV.8 : Les courants rotorique (direct et quadrature)

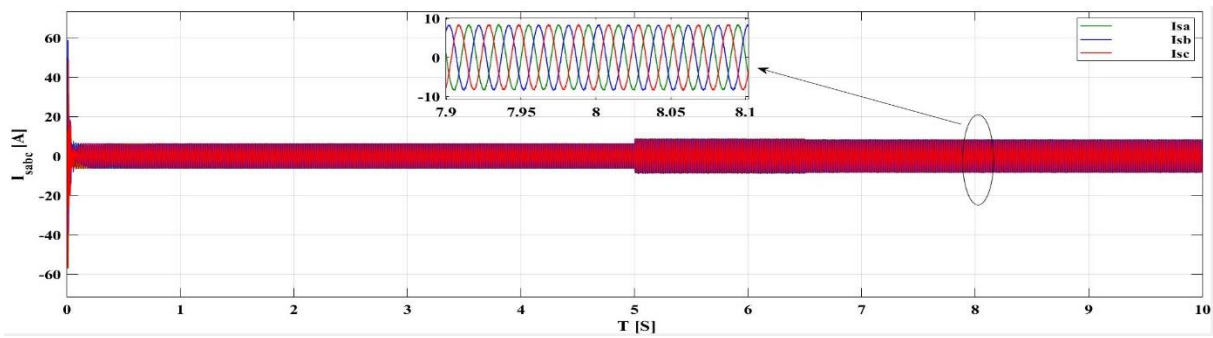


Figure.IV.9 : Le courant statorique des phases A, B et C

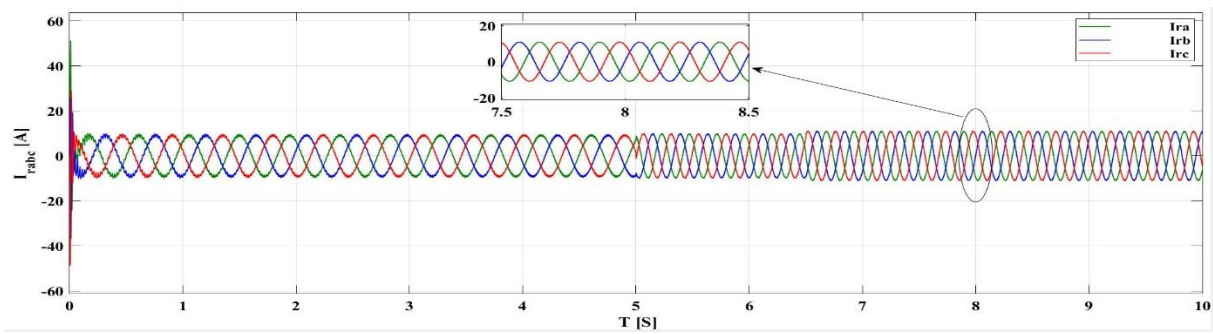


Figure.IV.10 : Le courant rotorique des phases A, B et C

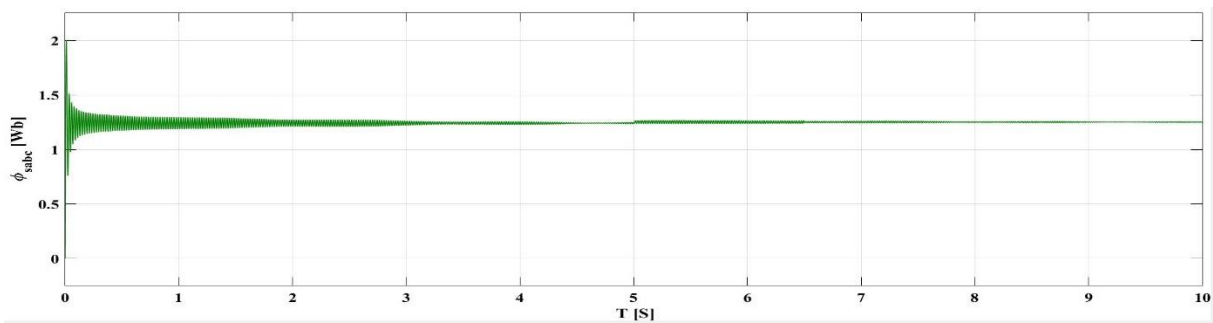


Figure.IV.11 : Les flux statorique naturel

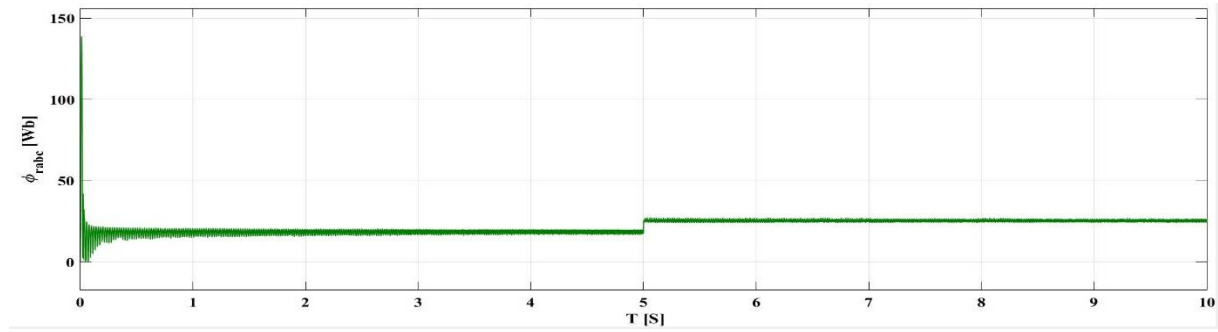


Figure.IV.12 : Les flux rotorique naturel

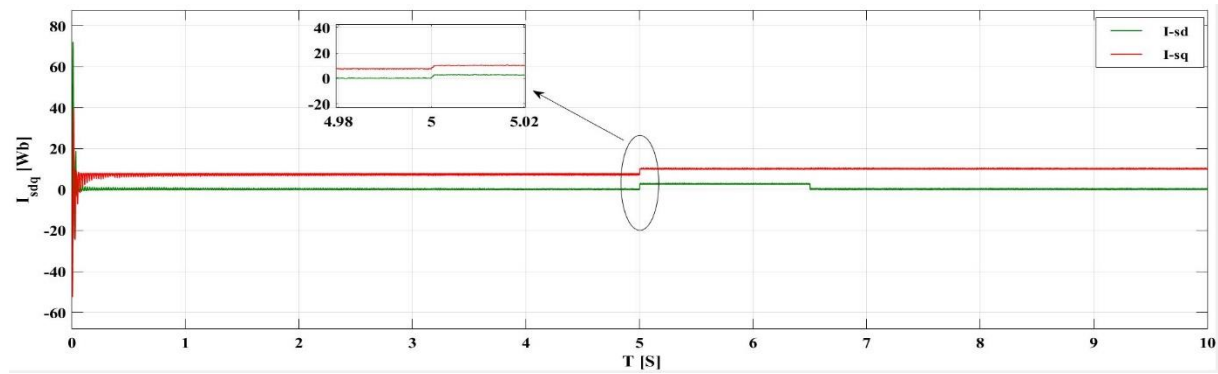


Figure.IV.13 : Les courants statorique (direct et quadrature)

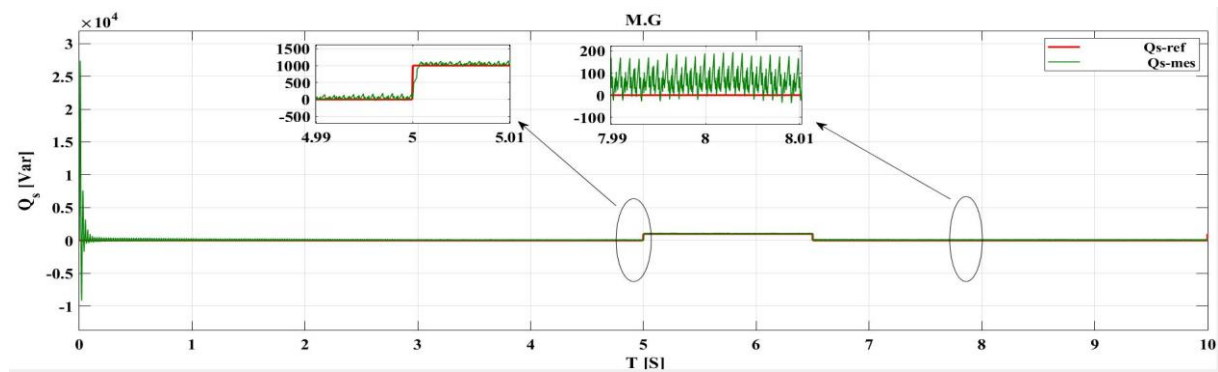
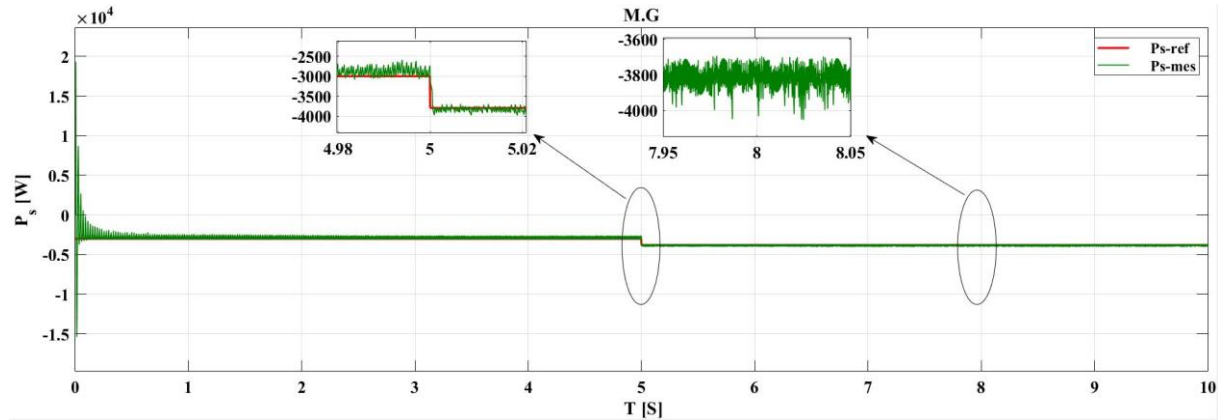


Figure.IV.14 : Les puissances actives et réactives statoriques suivant leurs références avec zoom

IV.7.2. Interprétation des résultats

Les figures de simulation mettent en évidence l'efficacité du système de réglage considéré lorsqu'il fonctionne à une vitesse constante. Les résultats montrent que le système est capable de suivre de manière précise les consignes de puissances actives et réactives au niveau du stator. Une observation importante est que les courants du réseau correspondent parfaitement à leurs références, ce qui indique un excellent suivi de consigne pour les puissances actives et réactives au niveau du stator. De plus, il convient de souligner que le couple électromagnétique est directement influencé par la puissance active statorique. Cela se traduit par une similitude de forme entre le profil de la puissance active P_s et celui du couple électromagnétique C_{em} à l'instant 5s.

IV.8. Teste de robustesse

Dans la fin de ce travail, ont vas tester la robustesse des deux commandes utilisées dans les chapitres III et IV. Nous représentons les puissances actives et réactives statoriques.

IV.8.1. Simulation de teste de robustesse pour la C.V et la C.M.G

- Résultats de tests de robustesse pour les deux commandes sans variation des paramètres :

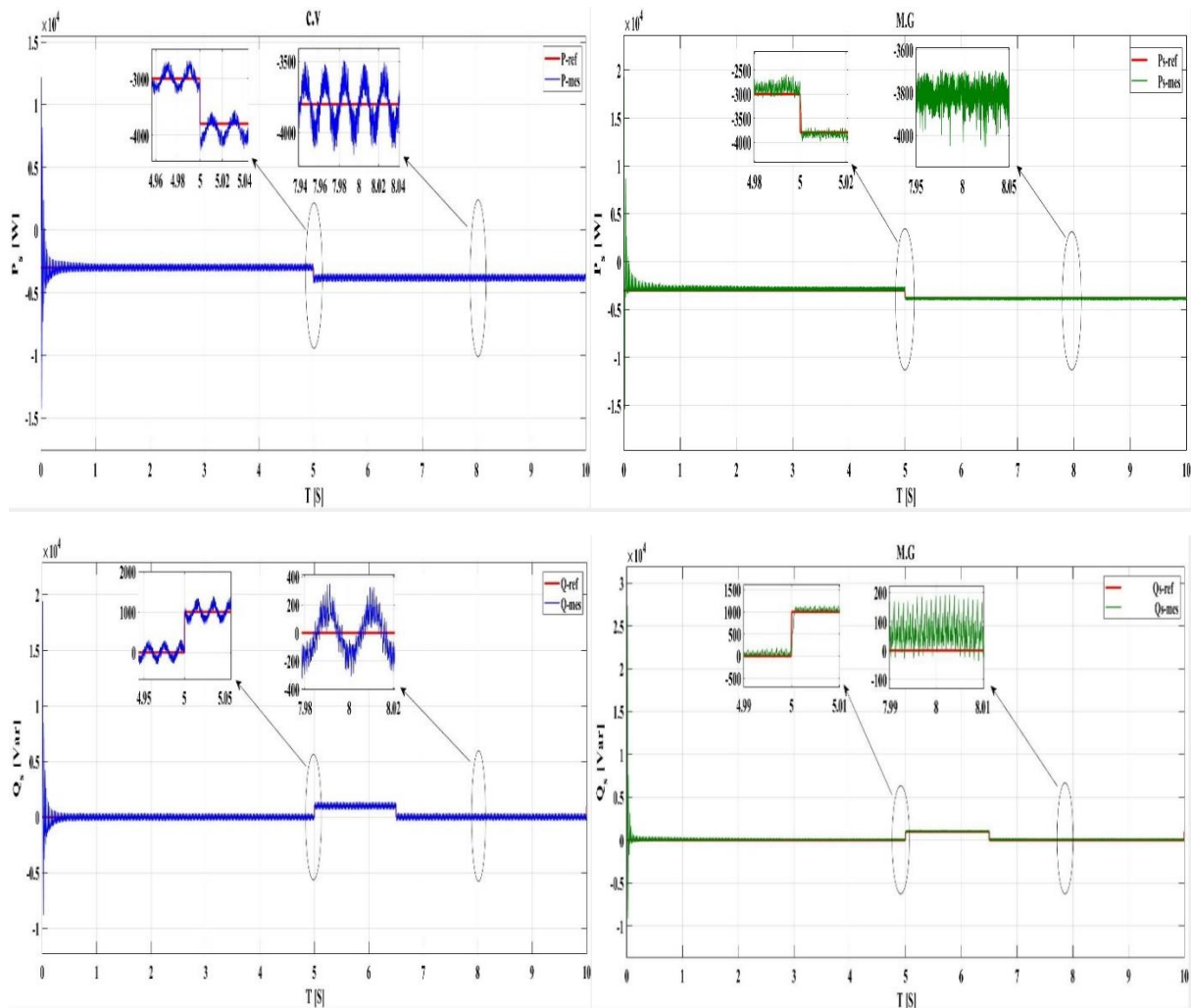


Figure.IV.15 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)

Remarque : Dans ce cas, La commande vectorielle offre un contrôle précis mais elle présente des ondulations importantes. Malgré cela, elle reste une approche classique permettant une dynamique de réponse élevée. Cependant, La commande par mode glissant présente des ondulations plus petites et un meilleur temps de réponse.

- Résultats des tests de robustesse pour les deux commandes avec (augmentation de 25% pour R_s , augmentation de 15% pour L_s et 10% pour le coefficient de frottement f) :

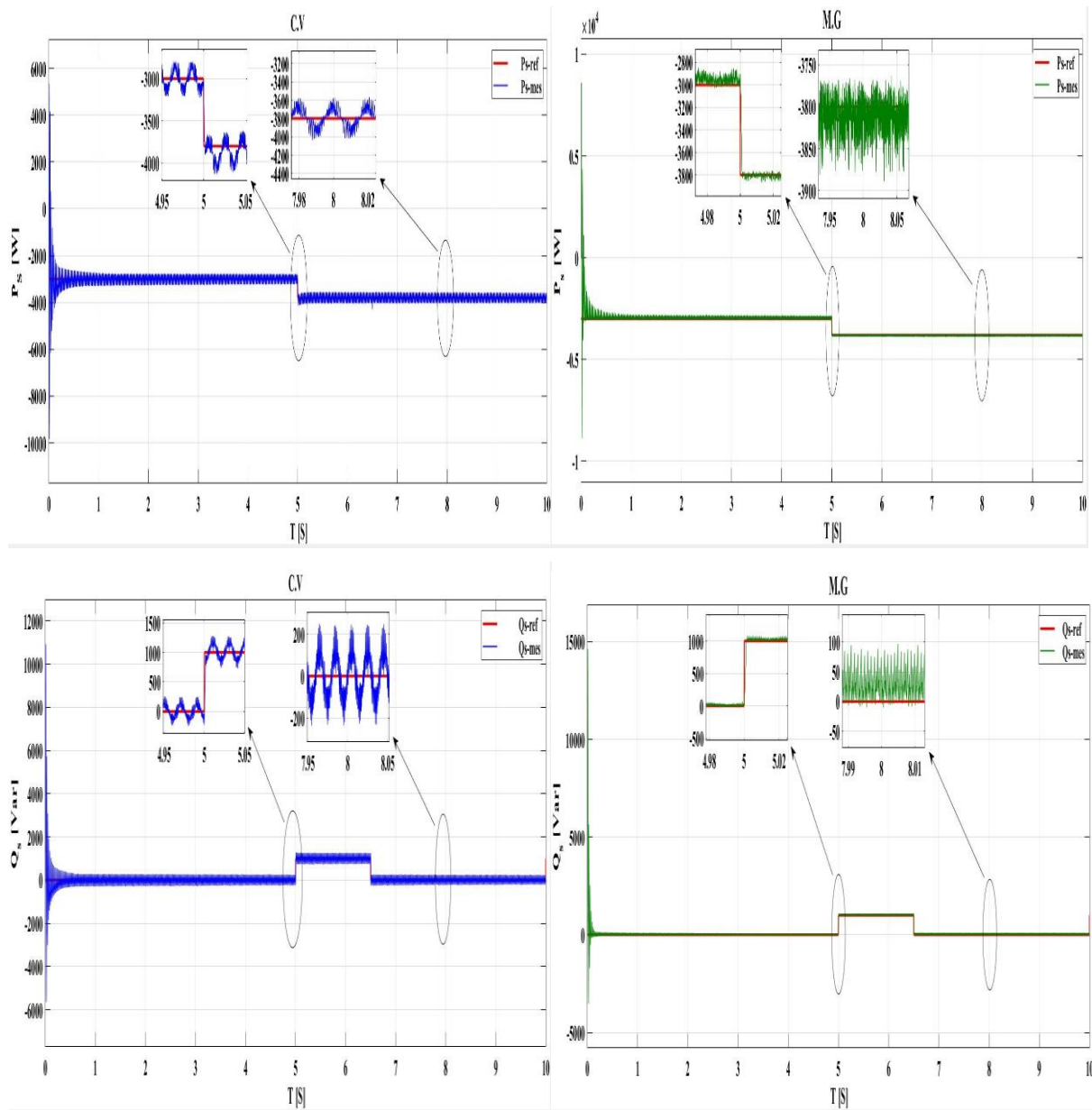


Figure.IV.16 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)

- Résultats des tests de robustesse pour les deux commandes avec (augmentation de 25% pour R_r , augmentation de 15% pour L_r et 10% pour le coefficient de frottement f) :

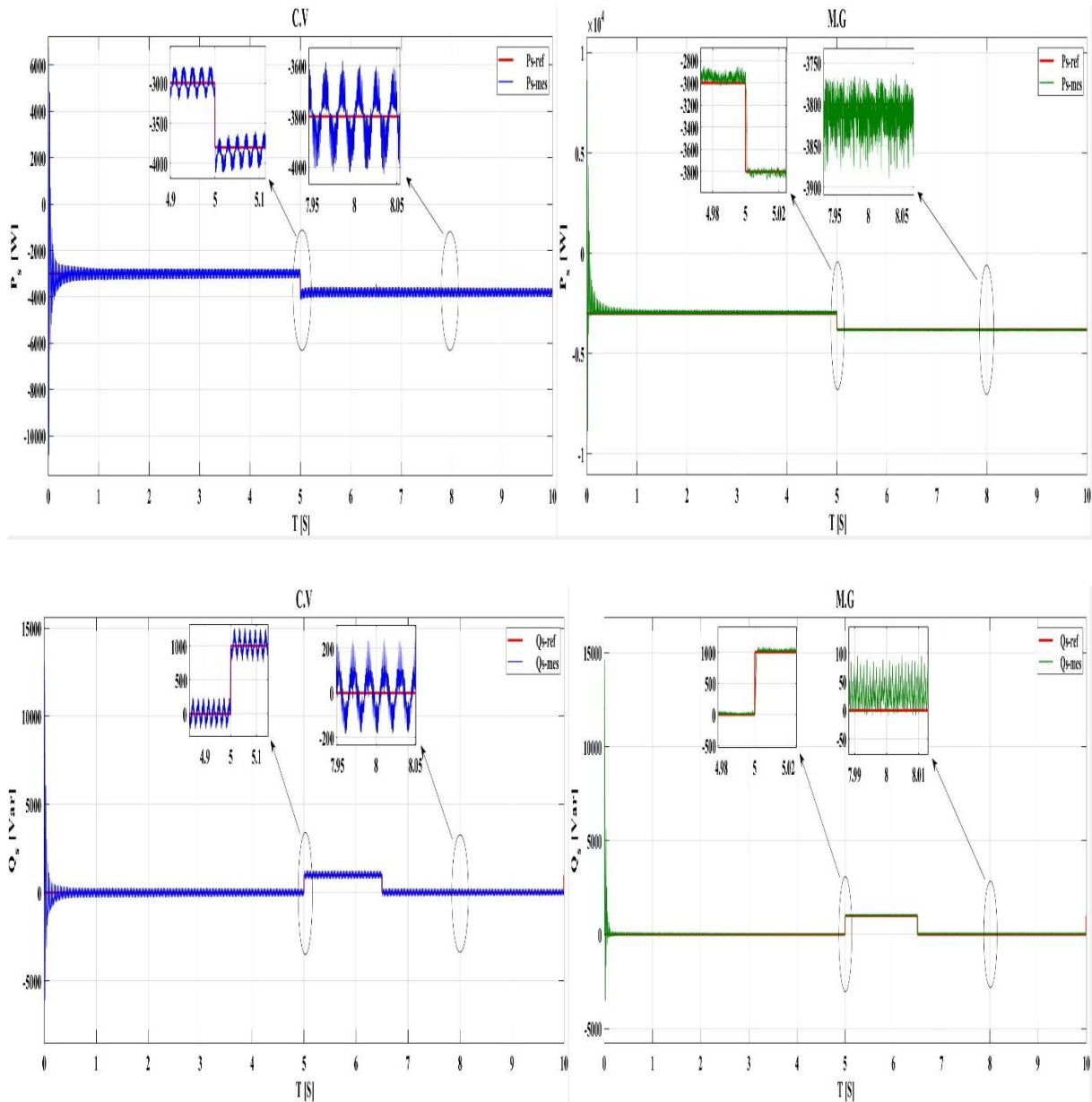


Figure.IV.17 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)

Remarque : Dans ces deux derniers cas (figures 2 et 3), La commande vectorielle présente une diminution de plus de 30% des ondulations (de 600 à 400). Cependant, La commande par mode glissant présente aussi une diminution des ondulation (de 300 à 100 presque).

- Résultats des tests de robustesse pour les deux commandes avec (augmentation de 25% pour R_s et R_r , augmentation de 15% pour L_s , L_r et 10% pour le coefficient de frottement f) :

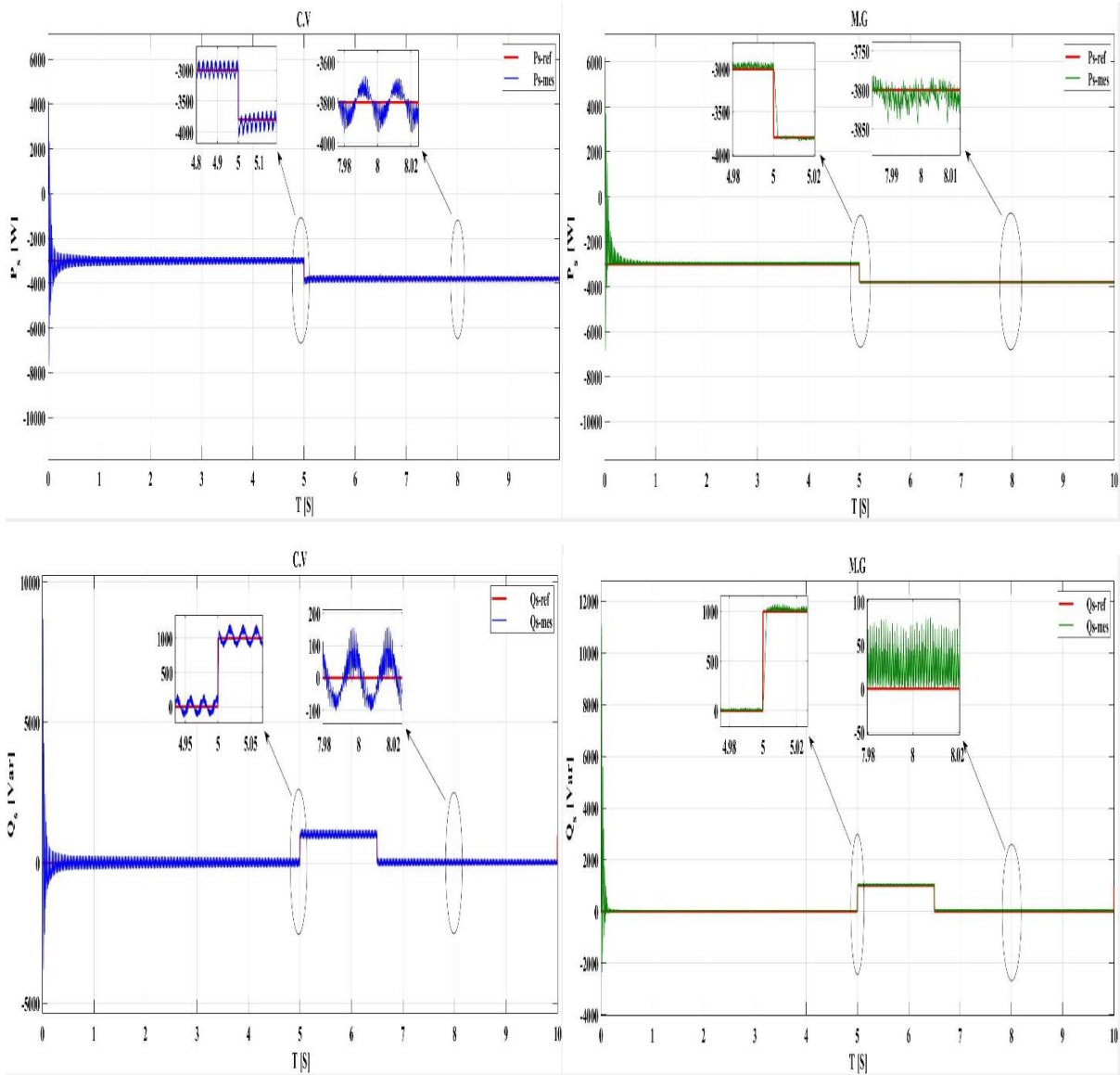


Figure.IV.18 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)

Remarque : Dans ce cas ou on à varier les 5 paramètres à la fois, La commande vectorielle présente une diminution de plus de 60% des ondulations (de 600 à 200). Pour la commande par mode glissant, la figures montres une diminution des ondulation (de 300 à 50 presque).

- Résultats de tests de robustesse pour les deux commandes avec (augmentation de 25% pour R_r , augmentation de 15% pour L_s et 10% pour le coefficient de frottement f) :

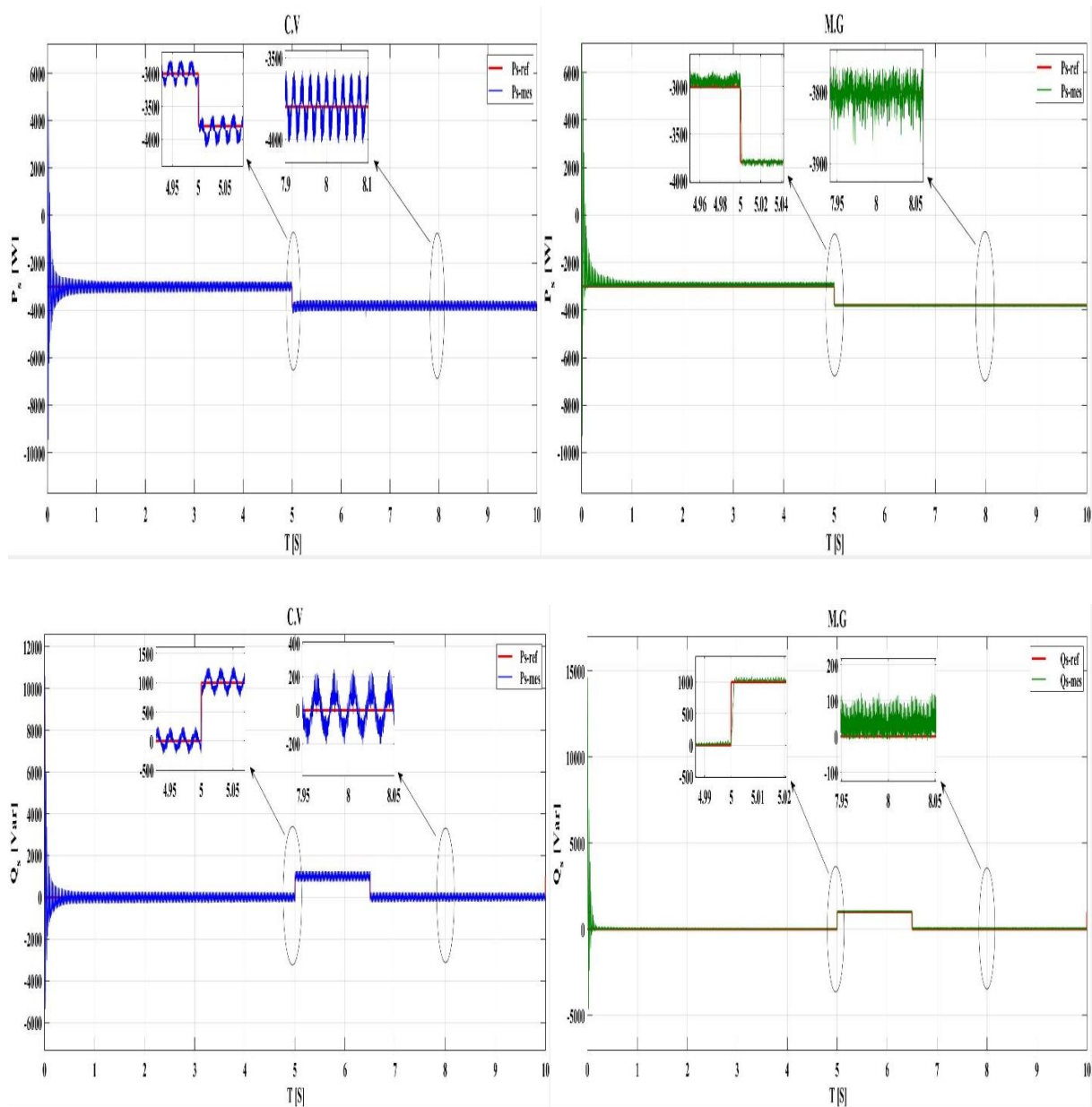


Figure.IV.19 : Les puissances actives et réactives statoriques pour les deux commandes (vectorielle et par mode glissant)

IV.8.2. Comparaison des interprétations des résultats des deux commandes

Les courbes présentées dans les figures montrent de manière évidente que les deux techniques de commande permettent un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique (active et réactive).

Les résultats de la simulation indiquent clairement que l'utilisation des deux techniques de commande permet de maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs souhaitées, mais avec une amélioration significative des performances observées avec la commande par mode glissant par rapport à la commande vectorielle. De plus, le changement des paramètres presque n'influence pas sur la commande par mode glissant contrairement à la commande vectorielle. Les avantages spécifiques du mode glissant par rapport à la commande vectorielle sont les suivants :

- Une réponse rapide lors des régimes transitoires et des changements de consignes.
- Une réduction maximale de l'erreur entre les valeurs de consigne et les mesures effectuées (quasiment nulle).
- Une diminution notable des oscillations des puissances.

IV.9. Conclusion

En conclusion, la commande par mode glissant d'une GADA est une méthode efficace et flexible pour réguler les puissances de la génératrice. Cette approche permet un contrôle précis et rapide, adapté aux conditions variables de charge. Elle offre également une meilleure efficacité énergétique et contribue à la stabilité du réseau électrique. En résumé, la commande par mode glissant est une solution prometteuse pour les applications de génération d'énergie électrique, notamment dans les systèmes éoliens et hydroélectriques.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude de la commande d'une GADA utilisée dans les éoliennes. À travers les quatre chapitres qui ont été développés, nous avons pu approfondir notre compréhension de différents aspects liés à la commande de cette technologie.

Le premier chapitre nous a permis de nous familiariser avec les généralités sur la GADA et les éoliennes. Nous avons pu comprendre l'importance croissante de l'énergie éolienne dans le contexte de la transition énergétique et le rôle crucial joué par la GADA dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.

Le deuxième chapitre nous a conduits à explorer la modélisation et la simulation de la turbine et de la MADA. Grâce à une analyse approfondie des modèles mathématiques et à l'utilisation d'outils de simulation adaptés, nous avons pu étudier le comportement dynamique de ces composants et acquérir une vision plus claire de leur interaction au sein du système. Cette étape était cruciale pour la mise en place d'une stratégie de commande efficace.

Le troisième chapitre a traité la commande vectorielle d'une GADA. Nous avons examiné en détail les principes de base de la commande vectorielle, en mettant l'accent sur leur application à la GADA. Cette approche avancée de commande offre des avantages significatifs en termes de stabilité, de précision et d'efficacité énergétique.

Le dernier chapitre a exploré la commande par mode glissant d'une GADA, une approche non linéaire qui offre une robustesse accrue face aux perturbations et aux variations des conditions de fonctionnement. De plus, nous avons effectué des tests de robustesse pour évaluer les performances des deux commandes étudiés. Les résultats ont montré que le changement des paramètres n'influence pas sur la commande par mode glissant contrairement à la commande vectorielle.

En guise de conclusion, cette étude approfondie des commandes d'une GADA dans le contexte des éoliennes nous a permis de mieux comprendre les défis et les enjeux associés à cette technologie. Les différentes stratégies de commande étudiées dans les chapitres précédents offrent des perspectives prometteuses pour améliorer l'efficacité, la stabilité et la fiabilité des éoliennes à double alimentation.

En fin de compte, cette étude de la commande d'une génératrice asynchrone double alimentation a permis de développer une compréhension approfondie des principes

CONCLUSION GENERALE

fondamentaux et des techniques avancées de commande de la GADA. Les connaissances acquises dans ce mémoire constituent une base solide pour la conception et l'optimisation des systèmes éoliens utilisant une GADA. Ce travail ouvre également la voie à de futures recherches visant à améliorer plus que ça les performances et l'efficacité énergétique des éoliennes équipées de GADA.

Annexe

➤ Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [31]

Valeurs nominales :

Puissance nominale : $P_n = 4Kw$

Tension nominale : $v = 220V, U = 380V - 50Hz$

La vitesse nominale : $\Omega_n = 1425tr/min$

Nombre de paires de pôles : $P = 2$

Les paramètres de la turbine utilisée :

Rayon : $R = 5.1m$

Gain de vitesse : $G = 70$

Inertie : $Jt = 40kg.m^2$

Paramètre :

Résistance du stator : $R_s = 1.2\Omega$

Résistance du rotor : $R_r = 1.8\Omega$

Inductance stator : $L_s = 0.1554H$

Inductance du rotor : $L_r = 0.1568H$

Inductance mutuelle : $M = 0.15H$

Constantes mécaniques :

Moment Inertie : $J = 0.2kg.m^2$

Coefficient de frottement : $f = 0.001N.m.S/rad$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. MAZOUZ, « Contrôle des puissances active et réactive dans les aérogénérateurs doubles alimentés », Thèse de Doctorat, Université Batna. 2020.
- [2] M. ADJOUDJ, M. ABID, A. AISSAOUI, Y. RAMDANI, H. BOUNOUA, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne », Revue (Nature et Technologie), Laboratoire IRECOM, Algérie, 2010.
- [3] A. BEN AMAR, « Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA », Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2016.
- [4] M.T. LATRECHE, « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolienne », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, setif. 2012.
- [5] A. SEFSAF, I. BELDJERBA, « Modélisation et Contrôle d'un aérogénérateur connecté au réseau », Mémoire de fin d'étude, Ecole supérieure en sciences appliquées, Tlemcen, 2020.
- [6] Y. BOUANANI, N. OURDANI, « Contribution à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation », Mémoire de fin de cycle, université A. Mira Bejaia, 2015.
- [7] M. HACIL, « Amélioration des performances des énergies éoliennes », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2012.
- [8] <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/les-principales-technologies-eoliennes/>
- [9] M. SMAILI, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [10] <https://eolmienne.com/eolienne-horizontale-vs-eolienne-verticale/>
- [11] S. CHIKHA, « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Algérie, 2017.
- [12] I. MEZERZI, « Contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation », Mémoire de fin d'étude, université de M'sila, 2013.
- [13] K. IDJDARENE, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse de Doctorat, Université de Lille 1 (France). 2010.

BIBLIOGRAPHIE

- [14] D. MIDA, « Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride (éolien – photovoltaïque) », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2019.
- [15] Y. LATBI, S. MANSOUR, « Commande non linéaire d'une génératrice asynchrone à double alimentation en fonctionnement autonome », Mémoire de fin de cycle, université A.Mira Bejaia, 2013.
- [16] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [17] B. BELTRAN, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest, France, 2010.
- [18] A. CHEMIDI « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2015.
- [19] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [20] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éoliennes », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [21] S. GHEMAM AMARA, A. GHEMAM AMARA, A. SADOON, « Contrôle des puissance d'un système éolien basé sur une MADA », Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , 2021.
- [22] M. LOPEZ, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, France, 2008.
- [23] H. BEN SLIMANE, A. HAMZA, « Commande d'un moteur asynchrone à double alimentation », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, 2021.
- [24] A. SYED, L. BOLDEA, « The induction machine handbook », 2002.
- [25] A. KECIOUR, M. A. AYADI, « Modélisation d'une génératrice asynchrone double alimentation (GADA) », Mémoire de master, Université Saad Dahlab, Blida, 2021.
- [26] k. HAMOUDA, « Modélisation et commande vectorielle d'un système éolien basé sur un générateur asynchrone à double alimentation (GADA) », mémoire de fin d'étude, université d'Adrar, 2013.
- [27] S. DJEMA, N. NASRI « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation destinée à l'énergie éolienne », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud

BIBLIOGRAPHIE

Maammeri Tizi-Ouzou, 2015.

[28] M. MANSOUR, N. AISSOU, « Contrôle d'une génératrice asynchrone dans un système d'énergie renouvelable », mémoire de fin d'étude, université A. Mira Bejaia, 2013.

[29] C. BRAHMI, D. ZENADI, « Modélisation et commande d'un système éolien », mémoire de fin d'étude, université A.Mira Bejaia, 2020.

[30] R. CHEIKH, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents et d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2018.

[31] F. DEHOUM, « Commande d'un système éolien basé sur une GADA par différentes techniques », mémoire de master, université de M'sila, 2019.

[32] M. ZIANE, A. SIOUANI, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de fin d'étude, université de Mohamed Boudiaf- M'sila, 2018.

[33] S. FARHI, « Contribution à la commande et l'estimation d'un variateur de vitesse asynchrone par l'approche du mode glissant », Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2022.

[34] R. ROUABHI, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse de Doctorat, Université Batna. 2016.

[35] M. AMIRI, O. ALI DAHMANE, « Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur mode glissant », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2017.

[36] R. ROUABHI, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, setif. 2012.

[37] W. SLIMANE, « Modélisation et commande d'une GADA destinée à la production de l'énergie électrique dans une chaîne éolienne », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2021.

[38] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2009.

[39] A. GUASMI, S. GUELMINE, « Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA », mémoire de fin d'étude, université de Mohamed Boudiaf- M'sila, 2017.

[40] R. DEHIRI, F. AICHAOUI, « Commande par mode glissant et flou d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) application à l'énergie éolienne », mémoire de fin d'étude, université de Mohamed Boudiaf- M'sila, 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- [41] MOHAMED A .et al, « Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la machine asynchrone à double alimentation(MADA) dédiée à une application éolienne », Journal of Advanced Research in Science and Technologie, 2014.
- [42] B. HOUAS, A. KHALDI, « Amélioration de la commande par mode glissant d'un générateur asynchrone à double alimentation », Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2019.
- [43] D. KAIROUS, « Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2019.
- [44] Y. ZOUAOUI, « Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [45] F. Z. TRIA, « Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2018.
- [46] A. SAIBI, « Commande par régulateurs IP et par mode glissement d'une machine synchrone à double étoile », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [47] H. AMIMEUR, « Contribution à la Commande d'une machine asynchrone à double étoile par mode de glissement », Mémoire de Magister, Université EL Hadj Lakhdar, Batna, 2008.

Résumé

Ce travail présente l'étude de la commande d'une GADA utilisée dans les éoliennes. Il s'est concentré sur deux méthodes de commande : la commande vectorielle et la commande par mode glissant et les deux sont associées à un onduleur. Les chapitres ont abordé les généralités sur la GADA et les éoliennes, la modélisation et la simulation de la turbine et de la MADA, ainsi que la mise en œuvre des méthodes de commande. La commande vectorielle a été explorée, son objectif principal est de contrôler les puissances générées par la génératrice d'une façon Indépendante, on les découple par orientation du flux statorique. Tandis que, la commande par mode glissant a été étudiée pour améliorer la robustesse de la GADA face aux perturbations externes. Ce mémoire contribue à la compréhension et à l'amélioration des stratégies de commande pour une utilisation plus efficace de la GADA dans les éoliennes.

Mots clés : MADA, GADA, Eolienne, Turbine, Onduleur, Commande vectorielle, Commande par mode glissant.

Abstract

This work presents the study of control in a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) used in wind turbines. It focuses on two control methods: vector control and sliding mode control, both associated with an inverter. The chapters cover general information about DFIG and wind turbines, modeling and simulation of the turbine and Doubly-Fed Induction Machine (DFIM), as well as the implementation of control methods. Vector control is explored, with the main objective of independently controlling the powers generated by the generator by decoupling them through stator flux orientation. On the other hand, sliding mode control is studied to enhance the robustness of DFIG against external disturbances. This research contributes to understanding and improving control strategies for a more efficient utilization of DFIG in wind turbines.

Keywords : DFIM, GFIG, Wind turbine, Turbine, Inverter, Vector control, Sliding mode control.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة للتحكم في مولد الطاقة الكهربائية المستخدم في محركات الرياح. وركز البحث على اثنتين من أساليب التحكم: التحكم الاتجاهي والتحكم بالانزلاق وكلاهما مرتبط بمحول الكهرباء. تناولت الفصول المفاهيم العامة عن المولد الكهربائي لمحركات الرياح والتحكم فيه، بالإضافة إلى نمذجة ومحاكاة التوربين والمولد الكهربائي وتطبيق طرق التحكم. تم دراسة التحكم الاتجاهي وهدفه الرئيسي هو التحكم في الطاقة المولدة بشكل مستقل وتفريقها عن طريق توجيه تدفق الستاتور. بينما تم دراسة التحكم بالانزلاق لتحسين صلابة المولد الكهربائي أمام التشويش الخارجي. يُساهم هذا البحث في فهم وتحسين استراتيجيات التحكم لاستخدام المولد الكهربائي بكفاءة أكبر في محركات الرياح.

الكلمات الرئيسية: مولد الكهرباء لمحركات الرياح، التحكم الاتجاهي، التحكم بالانزلاق، التوربين، المحول الكهربائي، المولد الكهربائي.