

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Électromécanique

Présenté par

BOUTERAA Ahmed, KAHMANE Abdelhamid et KHOUAZEM Abdelkerim

Thème

**Commande directe de tension d'un générateur
asynchrone double alimentation autonome
connecté aux AC micro réseaux**

Soutenu le 28/05/2025. Devant le jury composé de :

Dr. MESAI Ahmed Hamza	Maitre de conférences	Président
Dr. CHABANI Mohammed Saci	Maitre de conférences	Rapporteur
Dr. BENAMOR Afaf	Maitre de conférences	Examineur

Année Universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements



Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissante m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : CHABANI Mohammed Saci, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.

Ahmed

Dédicaces



*Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont soutenu de près
ou de loin tout au long de ce parcours.*

*À ma famille, pour leur amour inconditionnel et leur
encouragement constant.*

*À mes amis, pour leur présence et leurs paroles
réconfortantes dans les moments de doute.*

*Et à tous ceux qui croient en la valeur de la connaissance
et de l'effort.*

Abdelhamid

Dédicaces



*À ceux qui m'ont inspiré, soutenu et guidé tout au long de
cette aventure.*

*À mes parents, pour leurs sacrifices et leur foi inébranlable
en moi.*

À mes enseignants, pour leur savoir et leur patience.

*Et à tous ceux qui poursuivent leurs rêves avec passion et
persévérance.*

Abdelkerim

الملخص
résumé
Abstract

Résumé :

Les générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) sont largement utilisés dans les éoliennes en raison de leur efficacité, notamment parce que seuls un tiers de la puissance passe par l'électronique de puissance, ce qui réduit les pertes et les coûts. Parmi les configurations possibles, l'utilisation de convertisseurs de source de tension à modulation de largeur d'impulsion (VSC) dos à dos est particulièrement efficace, même en mode autonome. Cette thèse se concentre sur l'application autonome des GADA, en présentant leur modélisation mathématique et deux stratégies de commande innovantes pour le convertisseur côté rotor. Ces approches visent à améliorer la régulation de la fréquence et de l'amplitude de la tension du stator. Les résultats sont validés par simulation et expérimentation sur un banc d'essai de 3 kW.

Mots clés: Générateur asynchrone à double alimentation (GADA) autonome, amplitude et fréquence de la tension du stator, convertisseur côté rotor (RSC), commande vectoriel du flux du rotor direct DRFVC.

Abstract:

Doubly-fed induction generators (DFIGs) are widely used in wind turbines due to their efficiency, particularly because only one-third of the generated power passes through the power electronics, reducing both losses and costs. Among various configurations, the use of back-to-back voltage source converters (VSCs) is especially effective, even in standalone applications. This thesis focuses on the autonomous application of DFIGs, presenting their mathematical modeling and two innovative control strategies for the rotor-side converter. These approaches aim to enhance the regulation of stator voltage frequency and amplitude. The proposed methods were validated through both simulation and experimental testing on a 3 kW DFIG laboratory bench.

Keywords: Standalone doubly fed induction generator (DFIG), stator-voltage magnitude and frequency, Rotor side converter (CCR), Direct rotor flux vector control DRFVC,

المخلص:

تُستخدم المولدات الحثية ذات التغذية المزدوجة (GADA) على نطاق واسع في توربينات الرياح نظرًا لكفاءتها، خاصةً لأن ثلث الطاقة فقط يمر عبر مكونات الإلكترونيات القدرة، مما يقلل من الخسائر والتكاليف. ومن بين التوصيلات المختلفة، تُعد استخدام محولات الجهد من نوع (VSC) المتصلة ظهرًا لظهر من بين أكثر التوصيلات فعالية، حتى في التطبيقات المستقلة. تركز هذه الأطروحة على تطبيق (GADA) في الوضع المستقل، حيث يتم تقديم النمذجة الرياضية للآلة، إلى جانب استراتيجيتين مبتكرتين للتحكم في محول جانب الدوّار. تهدف هذه الطّرق إلى تحسين تنظيم تردد الجهد ومقداره على ملفات الجزء الثابت، وقد تم التحقق من فاعلية هذه الطّرق من خلال المحاكاة والاختبارات المخبرية على منصة اختبار بقدرة 3 كيلواط.

الكلمات المفتاحية: مولد الحث المستقل ذو التغذية المزدوجة، حجم وتردد الجهد الثابت، محول الجانب الدوار، التحكم الاتجاهي المباشر في متجه التدفق المغناطيسي للدوّار.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et symboles	
Introduction générale	1

CHAPITRE I : État de l'art

I.1.Introduction	6
I.2. Micro-réseaux	8
I.3. Topologies des systèmes GADA	8
I.4. Évaluation des méthodes de lutte pour les GADA	11
I.4.1. Commande vectorielle a flux orienter pour les GADA connectés au réseau	12
I.4.2. Méthodes de commande de synchronisation du réseau GADA	14
I.4.3. Méthodes de commande des GADA autonomes	15
I.5. Méthodologie de la thèse	17
I.6.Conclusion	18

CHAPITRE II : Structure et modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation

II.1. Introduction	20
II.2. Structure de la machine	20
II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	21
II.4. Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation	21
II.5. Les avantages et les inconvénients	22
II.5.1. Les avantage	22
II.5.2. Les inconvénient	23
II.6. Modélisation de la GADA	23
II.6.1. Hypothèses simplificatrices	23
II.6.2. Modélisation de générateurs asynchrone à double alimentation	24
II.6.3. Représentation vectorielle de l'espace d'état des systèmes triphasés	26
II.6.4. Modèle vectoriel de l'espace d'état du GADA	28
II.6.5. Configuration du système	29

II.6.6. Circuit équivalent GADA autonome	30
II.6.7. Modèle mathématique CCR	31
II.7. Conclusion	32

CHAPITRE III : Commande vectorielle de la génératrice asynchrone double alimentation autonome

III.1. Introduction	34
III.2. Stratégie de systèmes GADA autonomes	34
III.2.1. Commande de l'orientation du champ statorique	35
III.3. Résultats obtenus	40
III.3.1 Variation de charge	40
III.3.2. Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :	42
III.3.3. L'influence de défaut capteur de vitesse sur la commande vectorielle	44
III.4. Conclusion	44

CHAPITRE IV : Commande direct de tension d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

IV.1. Introduction	46
IV.2. Commande amélioré CCR basé sur le commande vectoriel du flux du rotor direct et la modulation par vecteur spatial (DRFVC-SVM)	46
IV.2.1. Description du schéma de commande	46
IV.2.2. Boucle de commande de la magnitude de la tension de stator	47
IV.2.3. Boucle de commande de la fréquence de tension du stator	48
IV.2.4. Calcul de vecteurs de flux rotor référencés	49
IV.2.5. Calcul de vecteurs de tension de rotor référencés	49
IV.2.6. Algorithme de modulation par vecteur spatial	49
IV.3. Résultats de simulation obtenus	53
IV.3.1. DRFVC	53
IV.3.1.1. Variation de l'amplitude de la tension du stator	54
IV.3.1.2. Variation de Charge	56
IV.3.1.3. Variation de la vitesse du rotor autour de la vitesse synchrone	58
IV.4. Conclusion	61
Conclusion générale	63
Bibliographique	
Annexe	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : État de l'art

Figure 1	<i>Structure typique d'un micro-réseau à courant alternatif</i>	8
Figure 2	<i>Topologies GADA de base : a) GADA connecté au réseau, b) GADA autonome à 4 fils, c) 3-GADA autonome avec un transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle un micro-réseau.</i>	9
Figure 3	<i>Classification des méthodes de commande des GADA</i>	12
Figure 4	<i>Schéma de commande avec orienté de flux</i>	14
Figure 5	<i>Bloc de diagramme pour le processus de synchronisation basé sur FOC</i>	15
Figure 6	<i>Bloc de schéma des systèmes de commande autonomes</i>	16

Chapitre II : Structure et modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation

Figure 1	<i>Principe du rotor bobiné</i>	20
Figure 2	<i>Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation.</i>	22
Figure 3	<i>Schéma représente la MADA</i>	22
Figure 4	<i>Circuit triphasé stator et rotor de GADA</i>	24
Figure 5	<i>Représentation biaxiale dans l'espace d'état de systèmes triphasés (a-b-c) montrant la relation entre les cadres de référence du rotor (α-β) et synchrones (d-q).</i>	26
Figure 6	<i>Schéma de base des WPGS autonomes basés sur GADA.</i>	29
Figure 7	<i>Circuit équivalent de GADA dans un référentiel arbitraire par une vitesse de rotation de ω</i>	30
Figure 8	<i>À gauche : onduleur de source de tension à deux niveaux ; À droite : Vecteurs de tension.</i>	31

Chapitre III : Commande vectorielle de la génératrice asynchrone double alimentation autonome

Figure 1	<i>Schéma vectoriel du système de commande GADA</i>	34
Figure 2	<i>Diagramme de phase.</i>	35
Figure 3	<i>Schéma de stratégie de commande de base du CCR pour un système GADA autonome.</i>	38
Figure 4	<i>Système à boucle fermée de commande du courant de l'axe d-q</i>	39
Figure 5	<i>Système à boucle fermée de commande de l'amplitude de la tension du stator</i>	40
Figure 6	<i>Reselta Variation de charge</i>	40
Figure 7	<i>Reselta Variation de charge</i>	41
Figure 8	<i>Résultats Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique</i>	43
Figure 9	<i>Résultats Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique</i>	43

Chapitre IV :Commande direct de tension d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

Figure 1	<i>Schéma du bloc du DRFVC proposé.</i>	47
Figure 2	<i>(a) Vecteurs de commutation de base et secteurs. (b) Projection du vecteur de tension de référence sur deux vecteurs adjacents.</i>	50
Figure 3	<i>Étapes de l'algorithme de modulation</i>	51
Figure 4	<i>Test de changement de référence de tension avec le GADA autonome fonctionnant à charge fixe. De haut en bas : amplitude de la tension du stator, fréquence du stator, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant du rotor. (Gauche) Résultats de simulation. (Droit) Test expérimental.</i>	54
Figure 5	<i>Fonctions de tension du stator triphasé lors d'un changement de magnitude de tension. De haut en bas : magnitude de la tension du stator, fréquence du stator et forme d'onde de la tension du stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.</i>	55
Figure 6	<i>Tester le changement de charge avec le GADA autonome fonctionnant à une référence de tension fixe. De haut en bas : amplitude de la tension statorique, fréquence statorique, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant du rotor. (Gauche) Résultats de simulation. (Droit) Test expérimental.</i>	57
Figure 7	<i>Courants de stator triphasés - formes d'onde lors du changement de charge. De haut en bas : Amplitude de la tension de stator, fréquence de stator, forme d'onde de la tension de stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.</i>	57
Figure 8	<i>Test de changement de vitesse du rotor avec le GADA autonome fonctionnant à une référence de tension fixe. De haut en bas : amplitude de la tension statorique, fréquence statorique, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant rotorique. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.</i>	59
Figure 9	<i>Fonctions de tension du stator triphasé lors du changement de vitesse du rotor. De haut en bas : Amplitude de la tension du stator, fréquence du stator, flux du rotor, forme d'onde du courant du stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.</i>	59
Figure 10	<i>Fréquence de la tension du stator dans la méthode basée sur la FOC présentée dans sans erreur de capteur et avec une erreur de capteur de - 5%.</i>	60

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Chapitre II : Structure et modélisation de la génératrice asynchrone double	
alimentation	
Tableau 1 Paramètres du générateur synchrone triphasé	32
Chapitre IV : Commande direct de tension d'une génératrice asynchrone double	
alimentation autonome	
Tableau 1 Séquence des vecteurs de tension SVM et plan de chronométrage.	52
Conclusion générale	
Tableau 1 Comparaison des différentes stratégies de commande pour le CCR.	64

Notations et symboles

Liste des symboles

X^*	: Valeur de référence.
\hat{X}	: Valeur estimée.
$ X $: Valeur de magnitude.
R_s, R_r	: [Ω] Résistance du stator et du rotor.
L_s, L_r	: [H] Inductance du stator et du rotor.
L_m	: [H] Inductance magnétisante.
L_{ls}	: [H] Inductance de fuite du stator.
L_{lr}	: [H] Inductance de fuite du rotor.
$\vec{\psi}_s$: Vecteur de flux du stator.
$\vec{\psi}_r$: Vecteur de flux du rotor.
\vec{v}_r, \vec{v}_s	: Vecteur de tension du stator et du rotor.
p	: nombre de paires de pôles.
Ω	: vitesse mécanique [rad/s].
$\omega_m = p\Omega$: Vitesse angulaire du rotor [rad/s].
ω_r	: vitesse de glissement [rad/s].
ω_s	: Vitesse synchrone [rad/s].
$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$: Coefficient de dispersion ou de Blondel.
T_e	: Couple électromagnétique [N.m].
f_s, f_r	: Fréquence du stator et du rotor [Hz].
δ	: Angle entre le rotor et le stator vecteur de liaison de flux, rad ou degré.

List of Abbreviations

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

CCR : Convertisseur Côté Rotor

CCC : Le convertisseur côté charge

BVP :Boucle à verrouillage de phase

PI : Proportionnel et Intégral.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

SVM :Modulation vectorielle spatiale.

FS-PCC : commande prédictif du courant à états finis.

DRFVC : Commande Vectorielle Directe du Flux Rotorique.

FOC: Field Oriented Control (Commande orientée champ ou Commande vectorielle).

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie est le facteur le plus essentiel dans la croissance sociale et économique du monde moderne. Les dangers environnementaux et la rareté des sources d'énergie non renouvelables ont suscité une préoccupation mondiale concernant les sources d'énergie existantes. Le manque de remplacements à long terme pour les combustibles fossiles a accru l'intérêt pour les sources d'énergie renouvelables. Depuis environ deux décennies, deux tendances dans les systèmes électriques ont été observées : une augmentation rapide de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables et la production d'énergie électrique distribuée. Celles-ci sont causées à la fois par des préoccupations écologiques et la hausse des coûts des combustibles fossiles (à long terme). L'énergie éolienne est l'une des solutions à long terme les plus favorables pour la problématique énergétique par rapport aux combustibles fossiles. L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie les plus compétitives et viables grâce à plusieurs avancées dans le système des éoliennes. Le document de revue présente le développement historique de l'énergie éolienne. Dans, le scénario actuel de l'énergie éolienne dans le monde et les avancées dans la conception des éoliennes sont discutés. L'inclusion de l'énergie éolienne dans le réseau augmente la fluctuation et l'imprévisibilité de l'énergie. La forte pénétration des parcs éoliens peut mener à des oscillations du système électrique.

Les générateurs synchrones en régime de vitesse fixe produisent une tension à fréquence constante, c'est pourquoi ils sont utilisés comme générateurs principaux dans les systèmes de réseau électrique. Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil sont parfois utilisés dans des unités de production d'énergie de puissance moyenne en raison de leur construction simple et robuste et de l'absence de besoin de synchronisation précise. Ils sont utilisés, par exemple, dans de petites centrales hydroélectriques en tant que générateurs fixes non contrôlés. Ils sont également installés dans des parcs éoliens, qui utilisent soit la caractéristique mécanique de la turbine soit la commande de pas pour maintenir la vitesse du rotor proche de la pulsation synchrone du réseau et garder le générateur dans la partie stable de sa caractéristique mécanique. Malheureusement, cette topologie ne permet pas d'obtenir la puissance maximale disponible du moulin à vent sous un vent de faible vitesse, car la vitesse du rotor dépend de la fréquence du réseau. Au contraire, les générateurs à vitesse variable entraînés par le vent sont capables d'ajuster la vitesse de leur rotor en fonction des conditions de vent, montrant ainsi une efficacité de conversion de l'énergie supérieure. Il a été décrit dans de nombreuses

publications (par exemple) que les générateurs à vitesse variable augmentent l'efficacité des systèmes de conversion de l'énergie éolienne par rapport aux solutions à vitesse fixe. Les algorithmes de suivi du point de puissance maximal (MPPT) permettent de récolter plus d'énergie éolienne en utilisant un générateur à vitesse variable. En plus des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les générateurs à vitesse variable montrent leurs avantages dans les systèmes de génération à moteur à combustion (principalement diesel), utilisés couramment dans les générateurs mobiles et en tant que sources d'alimentation sans interruption. Bien que les générateurs diesel puissent fonctionner à une vitesse fixe, leur fonctionnement à vitesse variable réduit de manière significative la consommation de carburant du moteur, comme le montre. L'échelle mondiale de l'utilisation des moteurs à combustion pour la production d'électricité implique que le développement de générateurs à vitesse variable peut considérablement réduire la consommation de carburant. Les systèmes de générateurs hybrides éolien-diesel tirent parti des avantages de ces deux sources d'énergie différentes et atténuent également leurs inconvénients. Le moteur diesel fournit une alimentation électrique contrôlable, tandis que l'éolienne réduit la consommation de carburant du système électrique grâce à l'énergie éolienne. Ainsi, ces systèmes hybrides peuvent être utilisés dans des zones reculées et isolées, où une source d'énergie contrôlable est requise, et en même temps, le prix des carburants peut être élevé en raison des coûts logistiques.

La génération distribuée et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables sont des tendances complémentaires observées dans la génération d'électricité, qui répondent à l'idée d'une économie durable. La plupart des sources d'énergie renouvelables (à l'exception de l'hydroélectricité) sont réparties sur de vastes zones, il est donc requis d'adopter un nouveau modèle de réseau électrique – le Smart Grid. La génération distribuée réduit considérablement les pertes de transmission, ce qui a un impact indirect sur la consommation de carburant et la pollution de l'environnement. Malheureusement, les sources d'énergie renouvelables sont imprévisibles et incontrôlables. Néanmoins, les réalisations du génie électrique permettent de connecter des réseaux électriques plus petits et de stabiliser l'équilibre de puissance dans le réseau. Tout d'abord, les interfaces électroniques de puissance entre les générateurs et le réseau rendent possible la connexion de systèmes micropower dans un réseau commun. De plus, ils permettent de commander le chargement des sources d'énergie, ce qui conduit à une plus grande efficacité de la conversion énergétique. Deuxièmement, la puissance instantanée imprévisible des ressources renouvelables entraîne l'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie afin de stabiliser le système électrique dominé par des sources renouvelables. De nombreux dispositifs de stockage d'énergie différents sont utilisés pour équilibrer la puissance

dans les micro-réseaux : supercondensateurs, cellules chimiques, volants d'inertie. Des systèmes hybrides sont également utilisés, combinant les avantages des supercondensateurs (fort courant de charge et de décharge, nombre de cycles de charge durant leur durée de vie) et la densité énergétique des batteries Li-on. Un concepteur de systèmes d'énergie doit répondre à la question de savoir si le stockage d'énergie est économique, en se basant sur la connaissance des prix historiques de l'énergie et de la demande en électricité.

OBJECTIF DE LA THESE

L'objectif principal de cette recherche est de contribuer à la méthode de commande pour le générateur asynchrone à double alimentation autonome. La modélisation, l'analyse et la conception du système GADA autonome sans stockage d'énergie sont effectuées. La recherche étudie également le fonctionnement à vitesse variable et fréquence fixe de l'éolienne à GADA autonome. La thèse vise à améliorer les boucles de courant pour la commande orientée sur le champ du GADA autonome. La thèse vise également à développer une nouvelle méthode de commande sans capteur pour réduire le coût requis pour la mise en œuvre de la commande.

Les domaines d'investigation de la thèse sont résumés ci-dessous :

- Modélisation et analyse de la commande du vecteur d'orientation du flux du stator pour le convertisseur côté rotor.
- Mise en œuvre de la commande du courant par hystérésis et du commande prédictif du courant à état fini pour améliorer la commande du courant du rotor dans le convertisseur côté rotor.
- Mise en œuvre de la commande directe du flux du rotor pour le convertisseur côté rotor.
- Mise en œuvre de la commande directe du couple pour le convertisseur côté rotor.
- Vérification des méthodes de commande proposées lors de tests de simulation et dans un environnement de laboratoire sous vitesse sub-synchrone, synchrone et super-synchrone.

La dissertation se compose de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, les systèmes GADA et les méthodes de commande GADA à la pointe de la technologie sont présentés. Dans le deuxième chapitre, la modélisation et le commande de base du GADA autonome sont présentés. Le troisième chapitre décrit l'amélioration du courant du rotor de l'approche de

commande basée sur le CCR. Le quatrième chapitre traite de l'utilisation de la méthode de commande direct, comme basée sur le DTC et le DRFVC. Un observateur du flux, de la vitesse et de la position est conçu et analysé. Les deuxièmes et troisièmes chapitres montrent les résultats expérimentaux de simulation de l'approche de commande proposée. La dissertation se termine par quelques conclusions et des travaux futurs.

Chapitre I

État de l'art

I.1.Introduction

Le générateur asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est directement connecté au réseau/charge et dont le rotor est connecté au réseau/charge via un convertisseur de puissance dos à dos (deux ponts actifs triphasés reliés via une liaison DC). Le principal avantage de cette topologie parallèle est la réduction de la puissance nominale du convertisseur par rapport à la topologie en série, ce qui permet de réduire le coût, la taille et le poids du convertisseur. Un convertisseur de puissance plus petit dans cette topologie ne peut être utilisé que lorsque le système GADA fonctionne à une vitesse proche de la vitesse synchrone, ce qui est généralement le cas. Cette propriété fait de GADA le générateur le plus populaire dans les systèmes éoliens. En outre, les GADA peuvent également être utilisés dans les centrales hydroélectriques [1], les unités de production de moteurs à combustion [2] et éventuellement toutes les sources d'énergie dont l'efficacité dépend de la vitesse du générateur et dont le fonctionnement à très basse vitesse est soit impossible, soit non rentable.

La construction de la machine asynchrone à rotor bobiné est bien connue et peut être trouvée dans [3]. Un inconvénient considérable de cette construction sont les bagues collectrices, qui nécessitent un entretien fréquent. Ainsi, un nouveau concept de générateur asynchrone sans balais à double alimentation a récemment émergé en deux variantes – avec une cage de rotor [4] et un rotor réticent [5]. GADA est généralement conçu pour avoir un rapport d'enroulement rotor/stator d'environ 3, de sorte que la tension du rotor est approximativement égale à la tension du stator sous un glissement maximal égal à $\frac{1}{3}$. Cela permet de connecter le convertisseur côté réseau au réseau sans transformateur élévateur intermédiaire. Le convertisseur côté réseau CCR est connecté au stator via une inductance. Le convertisseur côté rotor CCR est généralement directement connecté aux enroulements du rotor, car l'inductance de la machine est généralement suffisante pour réduire les harmoniques élevées du courant du rotor à un niveau acceptable. Cependant, dans [6], il est proposé d'utiliser un filtre supplémentaire du côté du rotor afin d'obtenir une tension de rotor sinusoïdale et de diminuer l'échauffement de la machine dû à des harmoniques élevées et d'obtenir une protection de l'enroulement du rotor contre les du/dt élevés de la tension du convertisseur.

Les premiers convertisseurs de puissance utilisés dans le GADA étaient des thyristors-cycloconvertisseurs en raison du manque d'interrupteurs de haute puissance entièrement contrôlés. La technologie IGBT à transistor bipolaire à grille isolée a permis de construire des

convertisseurs à commutation forcée, qui délivrent des courants de haute qualité avec modulation de largeur d'impulsion MLI. Une topologie classique d'un variateur de fréquence est le convertisseur AC/DC/AC, également appelé convertisseur dos à dos. Un grand avantage de cette topologie est que les défauts et les distorsions d'un convertisseur de puissance sont isolés du second par la liaison DC, qui a une grande capacité. De plus, il permet d'intégrer facilement le stockage d'énergie dans la liaison DC via un convertisseur DC/DC. Les convertisseurs matriciels sont une solution compétitive, qui a émergé récemment et ils permettent de supprimer un condensateur de liaison DC au détriment d'un nombre accru de commutateurs électroniques de puissance. Cependant, l'absence de condensateur fait que l'oscillation d'énergie dans un système d'alimentation ne peut pas être stockée dans la liaison DC en raison de l'absence d'un condensateur intermédiaire. De plus, des circuits snubés compliqués sont souvent requis dans le convertisseur matriciel, ce qui remet en question l'avantage de cette topologie. Une autre tendance dans le développement des convertisseurs de puissance est apparue lorsque la technologie IGBT est devenue incapable de fournir des niveaux de tension suffisants pour les convertisseurs de moyenne et haute puissance. Les convertisseurs à plusieurs niveaux résolvent ce problème en utilisant un plus grand nombre de commutateurs avec des tensions nominales réduites par rapport à la topologie à deux niveaux. Par conséquent, il est devenu possible de construire des convertisseurs pour les tensions les plus élevées utilisées dans le réseau électrique. De plus, la forme de la tension générée par le convertisseur se compose d'harmoniques moins élevées, ce qui permet de réduire les filtres inductifs utilisés dans ces convertisseurs. Les convertisseurs multiniveaux à la pointe de la technologie sont du type convertisseur DC/DC utilisé dans les lignes de transmission à courant continu haute tension, qui utilisent de nombreux convertisseurs connectés en cascade [7].

Les topologies et les propriétés des convertisseurs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes GADA ne sont pas le sujet principal de cette thèse et en raison de la riche littérature ; Le lecteur est prié de se reporter aux documents suivants :

- Topologies AC/DC/AC – questions générales [8], application dans GADA [9].
- Topologies multiniveaux – problèmes généraux [10], application dans GADA [11].
- Topologies de convertisseurs matriciels – problèmes généraux [12], application dans GADA [13].

I.2. Micro-réseaux

Les Micro-réseaux sont des systèmes électriques de petites tailles situées sur le site d'utilisation, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils associent de multiples installations de production locales et diffuses (Générateurs photovoltaïques, mini-éoliennes, micro-turbines à gazou à vapeur, piles à combustible, petits générateurs diesel, petite hydraulique, etc.), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution ou fonctionner en régime îloté (Figure I.1) [14].

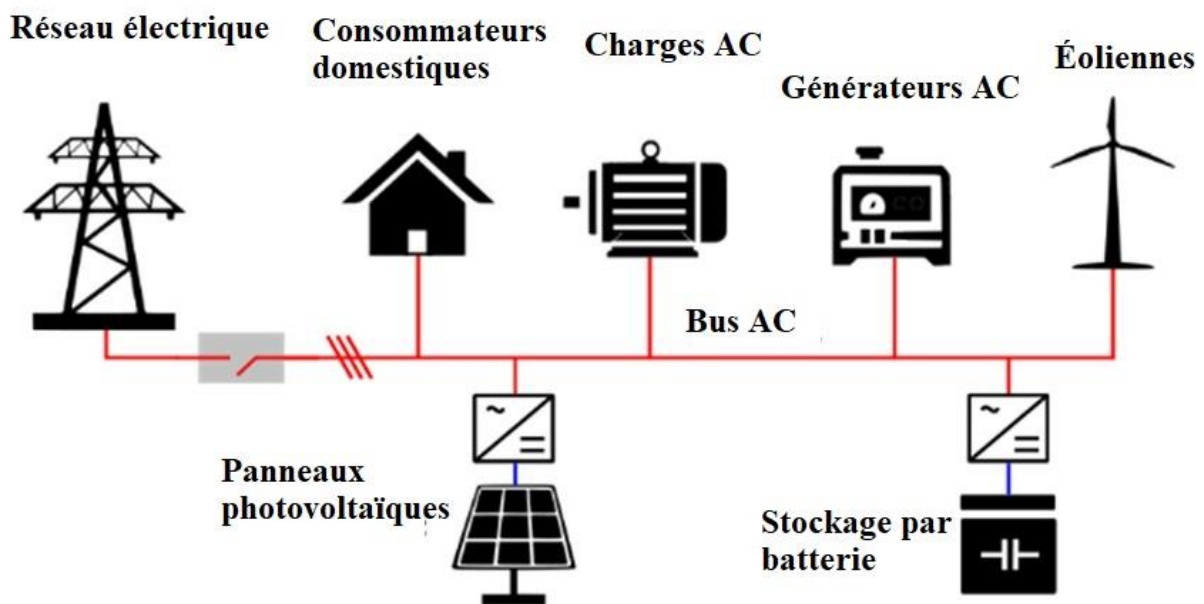


Figure I.1 : Structure typique d'un micro-réseau à courant alternatif

I.3. Topologies des systèmes GADA

Il existe quatre topologies GADA de base utilisées dans les systèmes de génération, comme le montre la Fig.I.2. Dans cette sous-section, ces topologies de système seront brièvement présentées.

De nos jours, l'application la plus populaire de GADA est une éolienne connectée au réseau, mais les générateurs diesel autonomes sont une solution prometteuse pour les systèmes électriques dans les zones reculées telles que les navires, les îles, les petits villages dans les zones rurales. Les parcs éoliens de grande puissance (5-300 MW) sont connectés au réseau électrique haute tension à l'aide de transformateurs élévateurs [15]. Dans les réseaux électriques à forte pénétration des énergies renouvelables, le comportement des parcs éoliens

en cas de défaillance du réseau est l'une des plus grandes préoccupations, car la stabilité du réseau électrique ne peut être garantie sans la participation des parcs éoliens à la production d'énergie réactive. Par conséquent, des codes de réseau spéciaux ont été introduits afin de réguler le comportement des générateurs connectés au réseau (une brève introduction aux codes de réseau peut être trouvée dans [16]). Les codes de réseau font en sorte que les éoliennes restent connectées au réseau en cas de défaillance du réseau, fournissant de l'énergie réactive pour aider à la récupération de la tension. L'un des objectifs de commande dans le GADA connecté au réseau est généralement la maximisation de l'énergie extraite de la source d'énergie. Cependant, l'objectif principal des deux régulateurs à des vitesses de vent très faibles ou très élevées est de stabiliser la vitesse de la turbine à la valeur maximale/minimale autorisée afin de ne pas dépasser la zone de fonctionnement sûr du CCR. Les méthodes MPPT sont activées lorsque la vitesse du rotor est dans les limites et, associées au commande du tangage-décrochage, elles maximisent la puissance de la turbine disponible à ce moment-là.

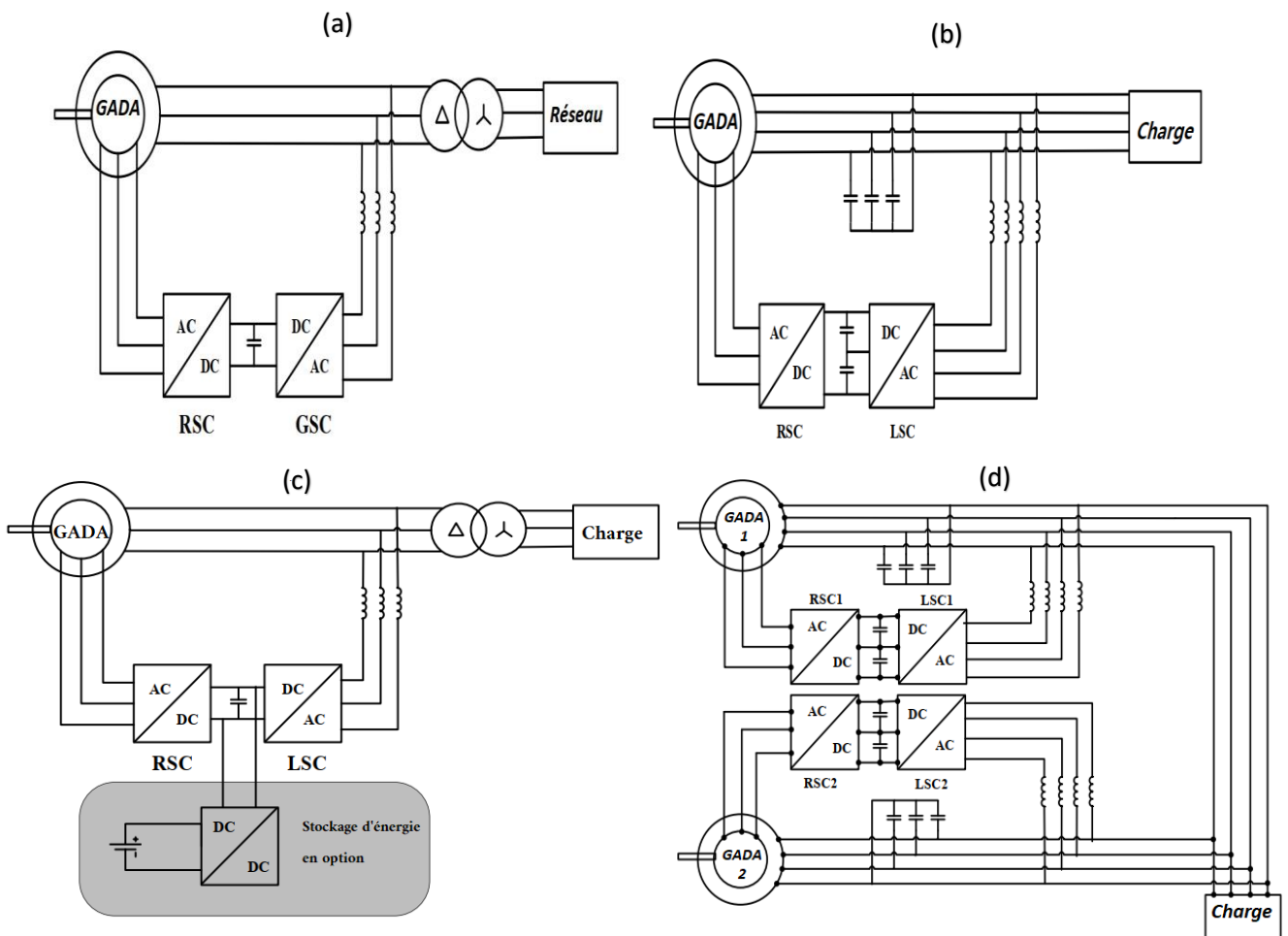


Figure 1.2: Topologies GADA de base : a) GADA connecté au réseau, b) GADA autonome à 4 fils, c) 3-GADA autonome avec un transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle un micro-réseau.

Actuellement, les principaux sujets de recherche dans le domaine du GADA connecté au réseau sont [17]:

- Fonctionnement dans des conditions de tension de réseau déséquilibrées (différentes cibles de commande : réduction des ondulations de couple, courants rotor/stator sinusoïdaux, annulation des ondulations de puissance, symétrisation du micro-réseau à haute impédance).
- Maintenir des défauts de réseau symétriques ou asymétriques (propriété appelée Low-Voltage Ride-Through) à l'aide d'une protection contre le pied-de-biche et d'un amortissement actif du flux lorsque la tension induite est dans les limites de commande.

Actuellement, il existe peu de GADA autonomes utilisés commercialement, tandis qu'il existe de nombreuses applications éoliennes des GADA connectés au réseau. En fonctionnement autonome, l'objectif principal de commande est la stabilisation de la tension du micro-réseau. Le GADA autonome doit fournir une tension sinusoïdale à amplitude constante et à fréquence constante sous des charges non linéaires et déséquilibrées. Par conséquent, il doit avoir la capacité de réduire les harmoniques élevées de la tension du stator et de rendre symétrique la tension sous une grande part de charges non linéaires et déséquilibrées dans le micro-réseau autonome [18]. D'autre part, la génération d'harmoniques élevées du courant du stator provoque des ondulations de couple, qui affectent négativement les éléments mécaniques du générateur et du moteur principal. Les harmoniques et la séquence négative du courant de charge doivent être compensées autant que possible par le convertisseur côté charge (CCC). La fonction du CCC est de stabiliser la tension de la liaison DC et, éventuellement, de réduire le contenu des harmoniques élevés du courant de charge [19], qui provoqueraient des ondulations de couple électromagnétiques si elles étaient transférées à travers le générateur. Cependant, la quantité totale d'harmoniques élevées et de séquence négative ne peut pas toujours être compensée par CCC en raison de ses limites de courant. Le CCR doit garantir la tension sinusoïdale du stator, tandis que le CCC doit compenser les harmoniques élevées et la séquence négative du courant de charge dans la mesure où ses limites de courant le permettent. Dans les micro-réseaux, le fil neutre est généralement présent afin de connecter les charges 1 phase au réseau. Dans le cas de générateurs autonomes de haute puissance, un transformateur est souvent présent entre les générateurs et la charge afin de faire correspondre les paramètres de tension du générateur de haute puissance et de la charge. Lorsqu'un générateur basse

tension est utilisé, il est possible d'éliminer le transformateur correspondant et d'utiliser un CCC triphasé à 4 fils.

Les principaux sujets concernant l'exploitation autonome de GADA sont les suivants :

- Stabilisation de la tension en cas de changements de charge rapides,
- Fournir une tension sinusoïdale symétrique sous des charges non linéaires et déséquilibrées,
- Limitations de courant de convertisseur et partage de courant de charge entre convertisseurs,
- Détection de défauts et leur isolement (fourniture du courant de court-circuit pour les dispositifs de protection contre les surintensités afin de leur permettre de rompre la boucle de court-circuit).

Le fonctionnement en parallèle (également appelé partage de charge) des GADA peut être utilisé dans les micro-réseaux où il y a plusieurs générateurs, qui fournissent de l'énergie pour la charge. Une stratégie populaire de partage de charge entre les générateurs est la configuration maître-esclave, dans laquelle un générateur fonctionne comme une source de tension (il stabilise la tension du réseau), tandis que les autres fonctionnent comme des sources de courant. Le principal problème de la topologie maître-esclave est sa vulnérabilité aux pannes du générateur maître, ce qui conduit à un effondrement de l'ensemble du système d'alimentation. De plus, cette topologie nécessite des interconnexions de signaux entre les générateurs, ce qui réduit sa robustesse et augmente le coût du système (dans de nombreux cas, la construction de l'infrastructure d'information peut être tout simplement irréalisable en raison, par exemple, des grandes distances entre les générateurs).

I.4. Évaluation des méthodes de lutte pour les GADA

Presque toutes les méthodes de commande avancées qui ont été développées pour l'étude des moteurs asynchrone en 1974 peuvent être appliquées à la GADA [20]. Cependant, le commande du GADA est plus compliqué que le commande d'un moteur asynchrone standard. Nous montrerons dans le chapitre suivant que toute grandeur triphasée, qu'il s'agisse d'une liaison de tension, de courant ou de flux, peut être exprimée comme un seul vecteur tournant [21]. Par conséquent, deux méthodes principales, à savoir le scalaire et le VC, peuvent être développées pour commande l'IM. La commande scalaire, où le commande V/f est basé sur le système de commande en boucle ouverte et fermée de la vitesse IM. La commande V/f est appliquée pour commande l'amplitude de la tension

d'alimentation des IM. C'est l'un des meilleurs choix pour les applications à vitesse variable et à fréquence. La lutte antivectorielle agit pour commande ces vecteurs spatiaux en amplitude et en phase [22, 23]. De nombreuses combinaisons différentes peuvent fonctionner et elles ont chacune des avantages et des inconvénients [24, 25]. Fig. I.3 montre la classification des stratégies de commande sur le marché GADA. Le commande par l'orientation [26], la commande directe du couple (DTC) [27] et la commande directe de la puissance [28] sont des stratégies de commande pratiques qui ont été bien développées pour les systèmes de production d'énergie éolienne basés sur GADA depuis 1996. La sous-section suivante traite plus en détail de l'évolution de ces méthodes de commande.

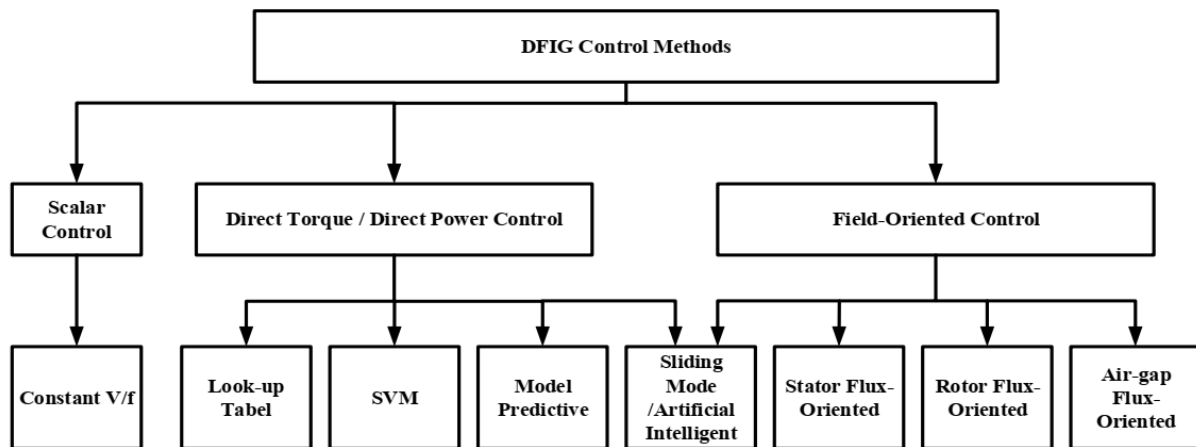


Figure I.3: Classification des méthodes de commande des GADA

I.4.1. Commande vectorielle à flux orienter pour les GADA connectés au réseau

Le commande par l'orientation le commande par l'orientation a été inventé dans les années 1970 sur la base de la méthode de commande de la machine à courant continu à excitation séparée. Dans une machine à courant continu, le flux de champ est produit par l'enroulement de champ qui est perpendiculaire au champ d'induit qui est fourni par les enroulements du stator. En raison de la relation de décapage entre le stator et les vecteurs d'espace de flux de champ, lorsque le couple est contrôlé, la variation du flux de champ n'est pas affectée par le flux d'induit. Le même concept est étendu pour les machines asynchrone [29] utilisant la transformation triphasée (abc) à biphasée (dq-frame) où les variables sinusoïdales sont projetées en quantités DC en rotation sur l'axe direct (d) et l'axe en quadrature (q). La méthode de lutte antivectorielle qui s'appliquait au moteur asynchrone à cage d'écureuil [13] peut être étendue à GADA [8, 14]. Dans la machine à cage d'écureuil, le convertisseur électronique de puissance est connecté aux enroulements du stator pour commande les courants d'entrée dans le cadre dq alignés avec le flux du rotor

[13]. De même, comme le montre la figure I.4, dans les GADA, le convertisseur côté rotor se connecte aux enroulements du rotor ; Par conséquent, des stratégies de commande sont appliquées sur les courants du rotor à l'aide d'un cadre rotatif aligné sur le flux du stator, connu sous le nom d'orientation stator-flux [8], ou avec orientation air-gap-flux [30]. Le courant de référence du rotor est calculé sur la base des références de puissance active P_s^* et de puissance réactive Q_s^* . Les courants du rotor peuvent alors être séparés en deux composantes, l'une alignée avec le flux du stator, i_{rd} (axe direct), qui est responsable d'y contribuer, et l'autre, i_{rq} (axe de quadrature), qui est orthogonale. La puissance peut être contrôlée en faisant varier l'amplitude de i_{rq} tout en maintenant i_{rd} et le flux de champ constant. Pour ce faire, l'amplitude et l'angle de phase par rapport au vecteur de flux du stator doivent être contrôlés. De cette façon, il existe une relation linéaire entre la puissance et la variable de commande. Il peut être montré que i_{rq} peut être lié à la puissance réelle P_s^* et i_{rd} à la puissance réactive Q_s^* , permettant une commande découplée de ces variables importantes [8]. La difficulté de l'estimation du flux dans la méthode d'orientation stator-flux conduit les chercheurs à développer une orientation basée sur les informations de tension du réseau [30]. Pour l'orientation de la tension du réseau, toutes les variables doivent être transférées de l'ABC triphasé au cadre de référence synchrone dq 2 phases. Pour la transformation, l'angle de rotation de l'arbre θ_r et la tension de phase θ_s du stator sont requis, qui peuvent être obtenus par codeur et boucle de verrouillage de phase, respectivement.

Étant donné que le FOC est basé sur la commande vectoriel du courant de rotor qui se trouve dans la tension du stator ou le référentiel de flux, il nécessite la transformation des tensions du stator, des courants et des variables de sortie de commande entre les référentiels stationnaires et synchrones. De plus, la FOC nécessite des informations précises sur les paramètres GADA tels que le stator, la résistance et l'inductance du rotor, et l'inductance mutuelle. Ainsi, les performances de commande peuvent être dégradées lorsque la valeur réelle des paramètres diffère de ces valeurs utilisées dans le système de commande FOC. De plus, les régulateurs de courant du rotor doivent être réglés avec soin pour avoir une bonne réponse dynamique [20].

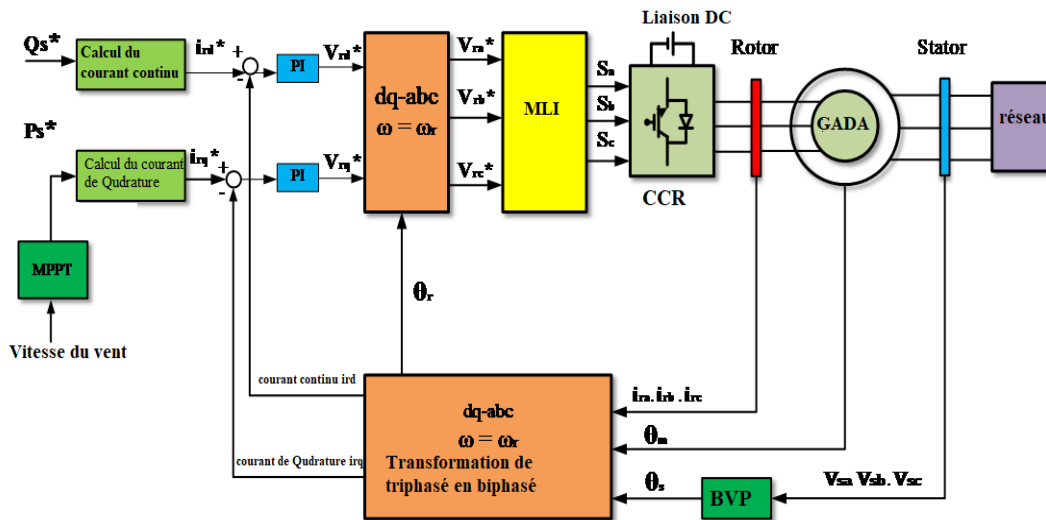


Figure I.4: Schéma de commande avec orienté de flux. [21]

Ces inconvénients de la FOC ont motivé les chercheurs à développer une nouvelle méthode de commande qui dépendait moins des paramètres de la machine et qui offrait moins d'efforts de réglage du compensateur. Cette nouvelle méthode de commande était connue sous le nom de commande direct du couple [23].

I.4.2. Méthodes de commande de synchronisation du réseau GADA

La plupart des méthodes de commande GADA ne tiennent pas compte de la synchronisation du réseau. Il s'agit d'une question importante qui se pose en même temps que la protection [6], [7]. La méthode établie pour la synchronisation du réseau à l'aide de la commande orienté champ [6] utilise une boucle de tension externe et une boucle de courant du rotor intérieur pour réaliser la synchronisation de la fréquence, de la phase et de l'amplitude entre le GADA et le réseau. Fig. I.4 montre le bloc de diagramme de la méthode FOC pour le processus de synchronisation. Le disjoncteur est fermé lorsque la tension et la fréquence du stator et du réseau sont égales ($v_s = v_g$ et $f_s = f_g$). Le système de boucle de verrouillage de phase peut calculer l'amplitude et la phase de tension côté stator et réseau utilisées pour commander le courant du rotor à axe continu i_{rd}^* . L'axe en quadrature du courant du rotor i_{rq}^* est maintenu à zéro pendant le processus de synchronisation car aucun flux d'énergie ne circule entre le stator et le côté réseau.

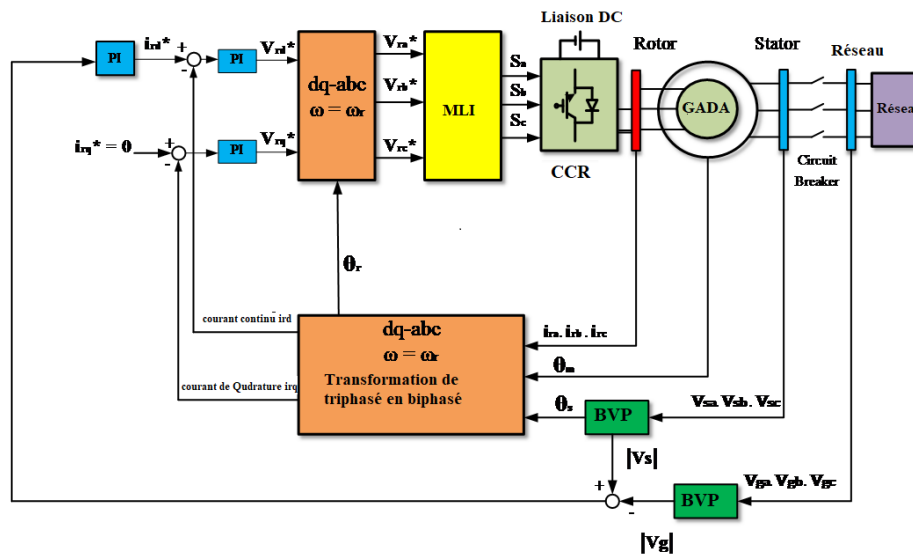


Figure 1.5: Bloc de diagramme pour le processus de synchronisation basé sur FOC. [21]

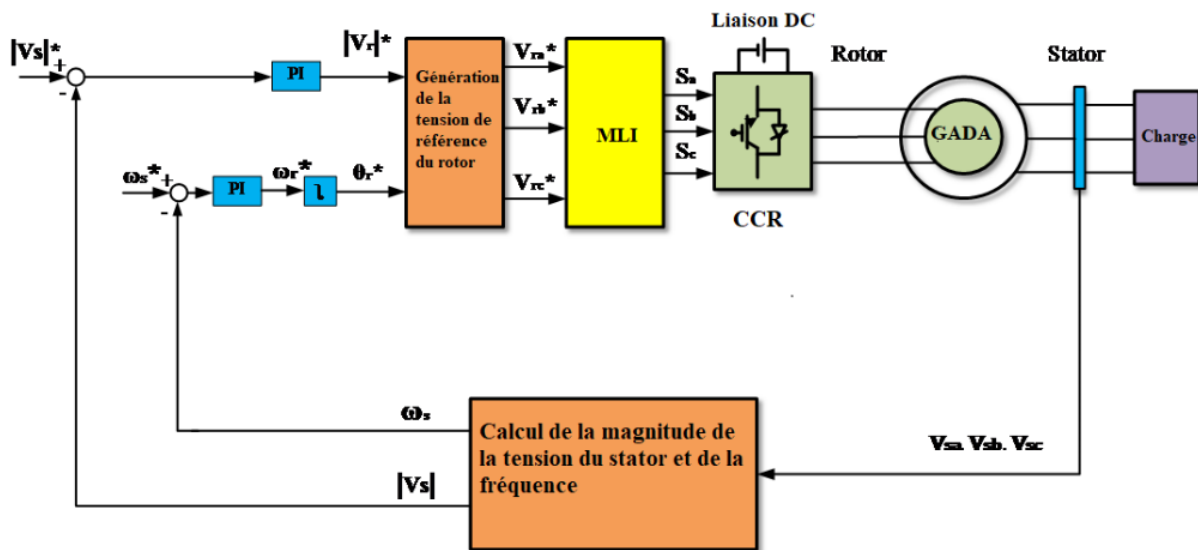
Ces méthodes héritent toutes des inconvénients de la FOC et nécessitent des mesures des tensions du réseau et du stator, des courants de rotor et de la position, ce qui entraîne des algorithmes de commande complexes. Un schéma de commande de tension directe utilisant une commande de structure variable intégrale sans boucle de commande de courant a été présenté dans [10]. Cependant, il nécessite toujours la mesure des tensions du réseau et du stator. De plus, en raison de sa complexité, la réponse transitoire est compromise.

I.4.3. Méthodes de commande des GADA autonomes

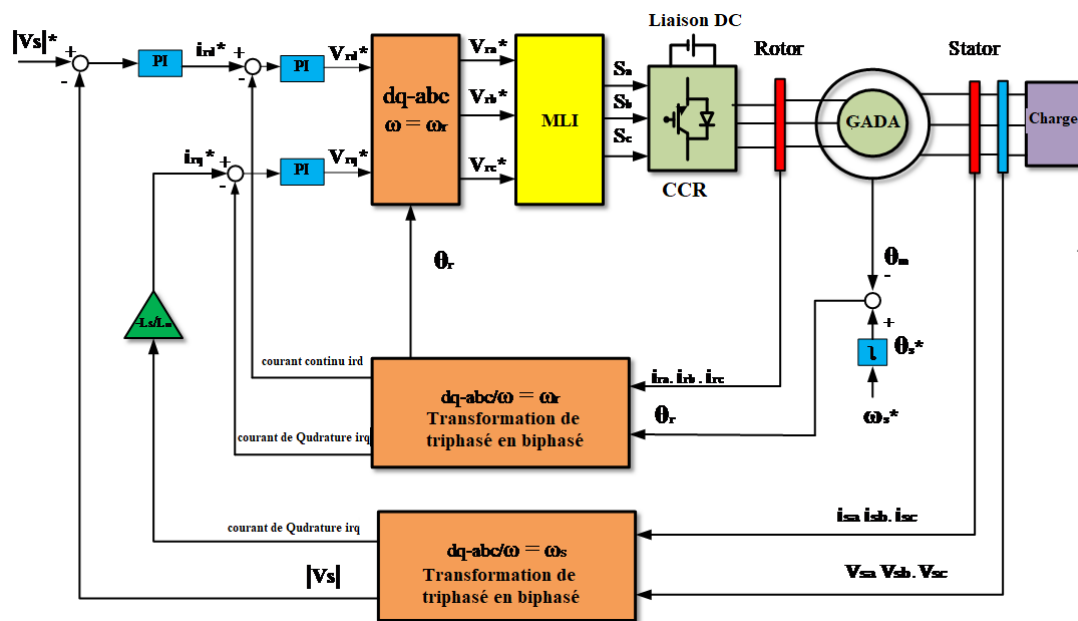
Comme mentionné dans la littérature sur le mode connecté au réseau de GADA, le stator se connecte à la tension de réseau rigide, qui fournit les vecteurs de puissance utilisés dans la rétroaction supérieure. Cependant, en cas d'absence de tension du réseau en cas de défaillance du réseau ou d'électrification d'une zone éloignée sans réseau, les stratégies de commande connectées au réseau ne sont plus valables. Il s'agit d'un mode autonome connu de GADA où la tension du réseau n'est pas connectée au stator. Un système de production autonome devrait fournir une tension et une fréquence régulées aux charges [20]. Il existe deux méthodes de commande différentes pour les systèmes autonomes, connues sous le nom d'orientation indirecte du flux du stator [12] et de méthode de commande scalaire basée sur le commande de tension continue [8].

La commande directe de la tension est une méthode alternative qui permet de commander directement la tension et la fréquence du côté stator d'un GADA, comme le montre la Fig.1.6(a). En commande de tension continue, le vecteur spatial du stator de référence est représenté dans un référentiel polaire rotatif avec la vitesse souhaitée.

L'amplitude et la fréquence du courant du rotor sont calculées directement à partir du régulateur de tension du stator. Le principal avantage de cette méthode est qu'il n'est pas requis de mesurer la vitesse de l'arbre. La vitesse de l'arbre est de mesurer la vitesse de l'arbre. La vitesse de l'arbre est obtenue à partir de la sortie du compensateur d'erreur de fréquence du stator [14]. Dans le GADA contrôlé par d'orientation indirecte du flux du stator, les valeurs de tension et de courant sont renvoyées à un référentiel aligné sur le flux du stator. L'axe d du courant du rotor est obtenu à partir du courant de magnétisation à l'aide d'un régulateur PI, comme le montre la Fig.I.6 (b).



a) Commande directe de tension



b) Orientation vers le flux indirect du stator

Figure I.6: Bloc de schéma des systèmes de commande autonomes. [21]

Le principal inconvénient de la commande d'orientation indirecte du flux du stator est l'absence de couple électrique direct ou de commande de puissance active de la GADA. En effet, sous le commande d'orientation indirecte du flux du stator, la composante en quadrature du courant du stator (i_{sq}) est définie par la charge, et afin de maintenir l'orientation du champ du GADA, la composante q du courant du rotor (i_{rq}) doit être maintenue proportionnelle à i_{sq} . Par conséquent, i_{sq} ne peut pas être utilisé pour commande T_e ou P_s . De plus, l'utilisation d'encodeurs peu coûteux et de faible précision entraîne souvent de moins bonnes performances du système que la position et la vitesse du rotor sous-estimées. Au lieu d'utiliser des capteurs de position, la position et la vitesse du rotor peuvent être estimées à l'aide de signaux électriques et d'une technique de commande appelée Model Reference Adaptive System. Cette méthode d'estimation a d'abord été développée pour la machine asynchrone en cage d'écureuil dans [13], puis améliorée dans de nombreux autres articles, par exemple [14]. Il a été appliqué pour la première fois dans GADA en [6]. L'observateur Model Reference Adaptive System nécessite deux modèles de machine asynchrone ; un dont les paramètres ne contiennent pas le signal estimé et un autre qui utilise ce signal inconnu. En comparant les états de ces deux modèles et en introduisant une commande de rétroaction adéquat, il est souvent possible de reconstruire le signal inconnu dans une topologie d'observateur en boucle fermée. Les observateurs Model Reference Adaptive System de la position et de la vitesse du rotor intègrent principalement la boucle à verrouillage de phase, qui synchronise deux vecteurs générés par le modèle de référence et le modèle adaptatif.

I.5. Méthodologie de la thèse

Le concept de base de la méthode de commande conventionnelle pour les GADA autonomes est réalisé par simulation avec MATLAB-SIMULINK. La partie commande de la simulation dans MATLAB reçoit et envoie les données aux blocs système SimPower pour commande le GADA. Le nombre élevé de capteurs est considéré comme le principal inconvénient de la commande conventionnel. Pour surmonter ces problèmes et avec la compréhension et la connaissance des DRFVC conventionnels, de nouveaux régulateur de couple et de flux de rotor sont proposés. Sur la base du régulateur proposé pour le mode connecté au réseau, un régulateur est développé pour le mode autonome. Les régulateurs proposés sont ensuite simulés pour étudier leur efficacité.

I.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté une revue approfondie des aspects fondamentaux liés aux Générateurs Asynchrones à Double Alimentation (GADA), en mettant l'accent sur leurs topologies, les différentes méthodes de commande ainsi que la méthodologie de recherche adoptée. Dans un premier temps, les principales topologies des systèmes GADA ont été analysées, mettant en lumière leur structure, leur fonctionnement et leur adaptation aux environnements de production d'énergie renouvelable. Ensuite, les différentes approches de commande ont été évaluées selon trois axes : le commande par l'orientation pour les GADA connectés au réseau, les méthodes de synchronisation réseau, et les stratégies de commande pour les GADA en mode autonome. Cette analyse critique a permis de dégager les avantages, les inconvénients et les conditions d'application de chaque méthode. Enfin, la méthodologie de recherche exposée à la fin du chapitre établit le cadre théorique et expérimental qui guidera les travaux développés dans les chapitres suivants. Cette base constitue un socle essentiel pour la conception et l'implémentation de solutions de commande robustes, efficaces et adaptées aux exigences actuelles des systèmes énergétiques.

Chapitre II

**Structure et modélisation de la
génératrice asynchrone double
alimentation**

II.1. Introduction

La génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) occupe une place centrale dans les systèmes de production d'énergie éolienne et, plus largement, dans les applications nécessitant une variation de vitesse tout en maintenant une qualité de puissance optimale. Grâce à sa capacité à fonctionner au-dessus et en dessous de la vitesse synchrone, tout en permettant un échange bidirectionnel de puissance entre le rotor et le réseau via des convertisseurs de faible puissance relative, la GADA présente des avantages considérables en termes d'efficacité, de coût et de flexibilité opérationnelle.

Dans ce contexte, il devient essentiel de bien comprendre la structure interne de cette machine ainsi que les principes physiques qui régissent son fonctionnement. De plus, l'élaboration d'un modèle mathématique précis constitue une étape fondamentale pour le développement et la mise en œuvre de stratégies de commande avancées, capables d'optimiser ses performances dans des environnements dynamiques et perturbés.

Ce chapitre propose ainsi une description détaillée de la structure de la génératrice asynchrone double alimentation, suivie d'une modélisation mathématique orientée vers les applications de commande et de simulation.

II.2. Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [13].

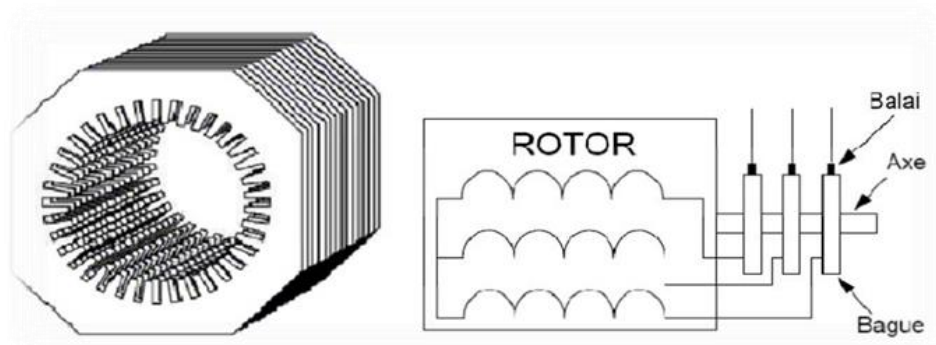


Figure II.1: Principe du rotor bobiné [11]

II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire $\omega_s = 2.\pi.f_s$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (\text{II.1})$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement. Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r [15], définie à partir de $\omega_s = 2.\pi.f_s$; c'est-à-dire :

$$f_r = f_s \cdot g \quad (\text{II.2})$$

II.4. Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau : c'est la cascade hypo synchrone.
- En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique.
- En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique
- En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau [15].

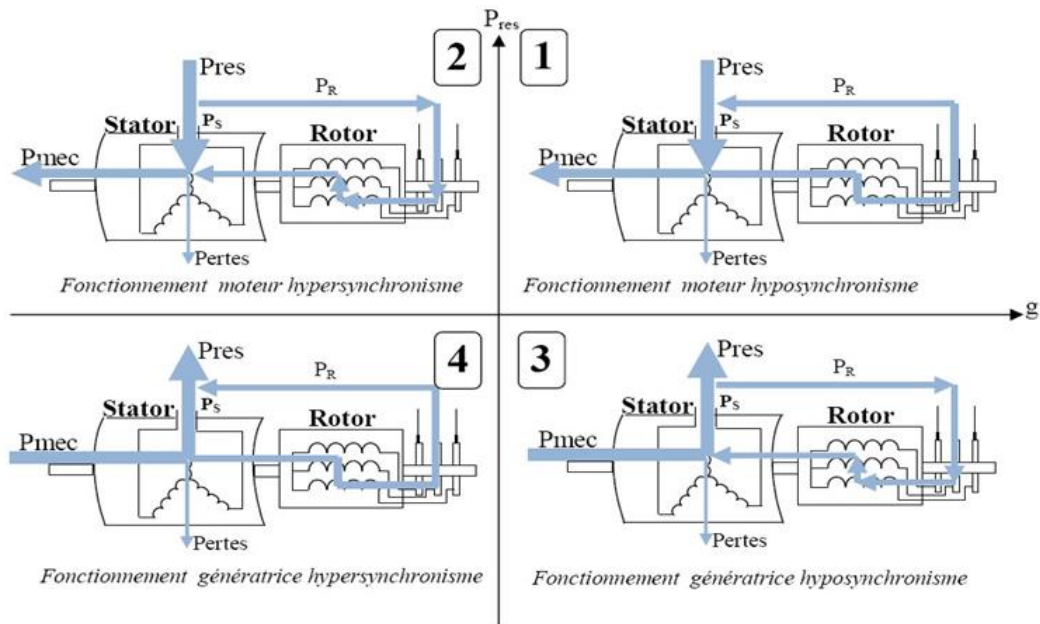


Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation.

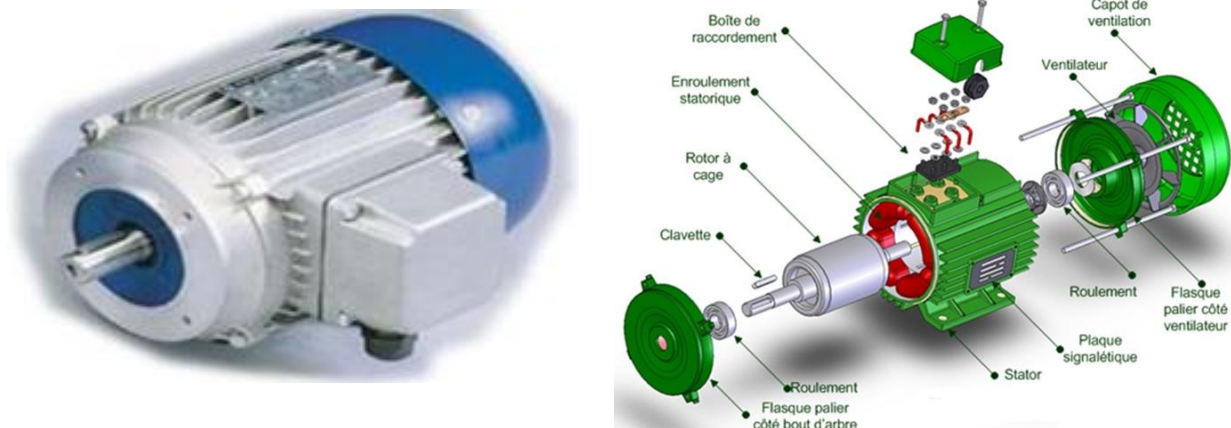


Figure II.3: Schéma représente la MADA

II.5. Les avantages et les inconvénients

II.5.1. Les avantage

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme
- A configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique [28].
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :

- Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- Régulation découplée des puissances active et réactive [17].

II.5.2. Les inconvénient

- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique [7].
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance [1].

II.6. Modélisation de la GADA

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Dans cette partie sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone génératrice à double alimentation dans le référentielle au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté de GADA et commander par l'utilisation de la puissance active et réactive mesurer au niveau du rotor de la GADA [20].

II.6.1. Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition Sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.6.2. Modélisation de générateurs asynchrone à double alimentation

Le GADA symétrique triphasé illustré à la Fig. II.4 peut être décrit comme suit :

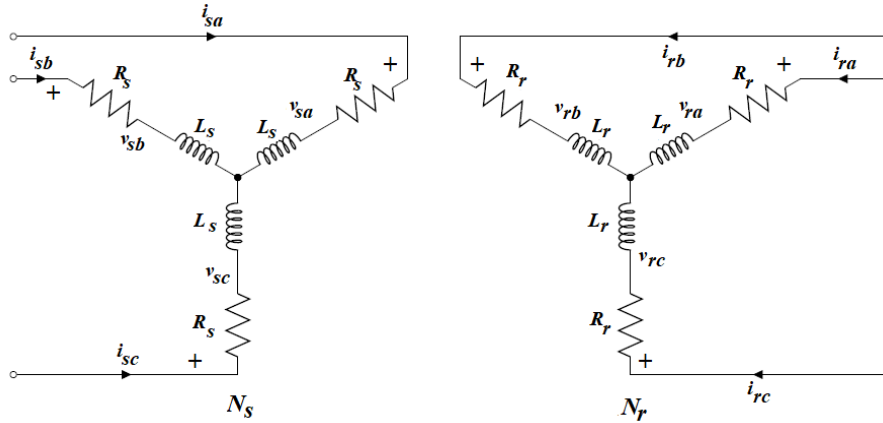


Figure II.4 : Circuit triphasé stator et rotor de GADA.

Les relations de tension sur les côtés du rotor et du stator sont obtenues par la loi de Kirchhoff et de Faraday :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les indices r et s désignent respectivement les grandeurs du rotor et du stator. Les indices a, b et c sont utilisés pour les quantités des phases a, b et c , respectivement. Les symboles v et i représentent les tensions et les courants et ψ représentent les liaisons de flux. Les résistances de l'enroulement du stator et du rotor sont R_s et R_r .

Les liaisons de flux sont couplées aux courants par les inductances :

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L_M \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + L_M^T \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Les matrices d'inductance sont définies par :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$L_M = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les indices L_l et L_m se rapportent respectivement aux inductances de fuite et de magnétisation. L'amplitude maximale de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est de L_m . Le déplacement angulaire électrique du rotor par rapport au stator est défini à partir de ω_r . La vitesse électrique du rotor est calculée comme suit.

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(0) \quad (\text{II.10})$$

Où $\theta_r(0)$ est la position initiale du rotor à $t=0$. La matrice d'inductance mutuelle L_m dépend du temps. Afin d'éliminer la dépendance temporelle, la transformation dq sera utilisée à la place de abc. La modélisation GADA dans le cadre de référence (d-q).

La dynamique électrique des GADA a été développée dans le référentiel du stator. Le modèle mécanique dynamique GADA est donné par.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (\text{II.11})$$

Où J est l'inertie de la machine, T_m est le couple mécanique et T_e est le couple électromagnétique.

II.6.3. Représentation vectorielle de l'espace d'état des systèmes triphasés

La représentation vectorielle de l'espace d'état rend un circuit AC simple à représenter et facile à comprendre et à analyser. Comme mentionné précédemment, cette étude considère un IM à rotor enroulé triphasé, appelé générateur asynchrone à double alimentation GADA. Le GADA est alimenté par une source AC triphasée. Il est bien connu que les trois phases (a - b - c) sont situées à 120° de distance dans l'espace, comme le montre la Fig.II.5. Ils sont linéairement dépendants les uns des autres, ce qui complique le modèle du système. Pour simplifier la notation des variables électriques triphasées, telles que la tension, le courant et le flux, les variables peuvent être modélisées de manière adéquate à l'aide d'un cadre de référence à deux axes. La représentation à deux axes du système triphasé est appelée «représentation vectorielle de l'espace d'état». Ce repère de référence à deux axes peut être stationnaire dans le rotor (α - β) ou synchrone (d - q), comme le montre la Fig.II.4. Pour la représentation vectorielle de l'espace d'état, les composantes d'une variable particulière le long des coordonnées a - b - c sont projetées sur les coordonnées α - β ou d - q . Les deux coordonnées de chaque repère sont mutuellement perpendiculaires l'une à l'autre et linéairement indépendantes. Cette indépendance permet de commander à la fois le flux et le couple d'une machine à courant alternatif de manière indépendante, de la même manière qu'une machine à courant continu à excitation séparée.

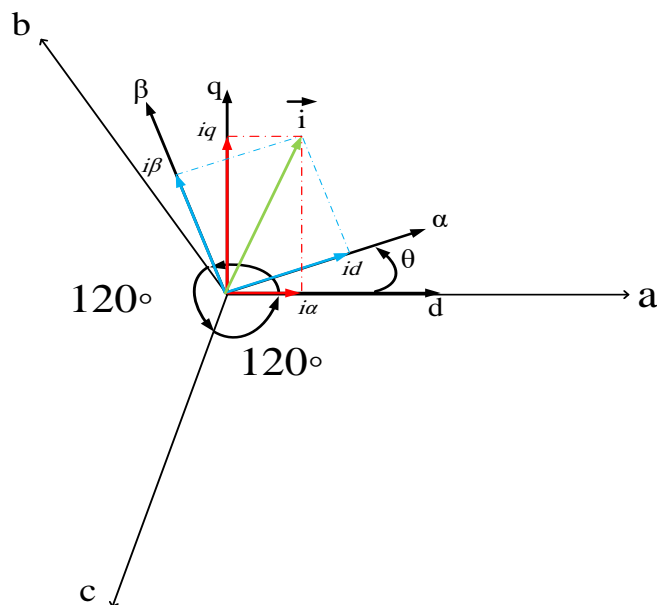


Figure II.5 : Représentation biaxiale dans l'espace d'état de systèmes triphasés (a - b - c) montrant la relation entre les cadres de référence du rotor (α - β) et synchrones (d - q).

Si l'on prend l'exemple du courant, la transformation du repère a - b - c en repère α - β , connue sous le nom de transformation de Clarke, est exprimée sous forme matricielle par

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Parfois, il est requis de transformer le cadre $\alpha\text{-}\beta$ en un cadre $d\text{-}q$, en particulier dans la conception de commande vectoriel pour les entraînements moteurs. La transformation s'appelle Park

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Où θ_r est l'angle entre les repères de référence $\alpha\text{-}\beta$ et $d\text{-}q$, comme le montre la Fig.II.4. La transformation directe du repère $a\text{-}b\text{-}c$ au repère $d\text{-}q$ (ou vice versa) est également utilisée pour la modélisation dynamique d'un système triphasé [17]. Les composantes de courant de i_α et i_β sont sinusoïdales, car le vecteur de courant tourne à une vitesse constante par rapport au cadre $\alpha\text{-}\beta$ du rotor. En revanche, les composantes i_d et i_q sont normalement constantes ou constantes par morceaux, et sont donc linéarisées. Les deux transformations susmentionnées sont également applicables pour la tension et le flux, et les transformations sont réversibles, ce qui signifie également pratique pour pouvoir transformer des courants, des tensions ou des liaisons de flux du référentiel $\alpha\text{-}\beta$ (rotor) en repère de référence $d\text{-}q$ (synchrone) et vice-versa. La transformation du repère de référence $d\text{-}q$ en repère de référence $\alpha\text{-}\beta$ du rotor est généralement appelée transformation de Park inverse et est donnée par

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La représentation vectorielle de l'espace d'état des variables IM dans les cadres de référence $\alpha\text{-}\beta$ et $d\text{-}q$ est

$$\text{Tension du stator : } \vec{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}, \vec{v}_s = v_{sd} + jv_{sq} ;$$

$$\text{Tension du rotor : } \vec{v}_r = v_{r\alpha} + jv_{r\beta}, \vec{v}_r = v_{rd} + jv_{rq} ;$$

$$\text{Courant du stator : } \vec{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}, \vec{i}_s = i_{sd} + ji_{sq} ;$$

$$\text{Courant du rotor : } \vec{i}_r = i_{r\alpha} + ji_{r\beta}, \vec{i}_r = i_{rd} + ji_{rq} ;$$

$$\text{Flux du stator : } \vec{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta}, \vec{\psi}_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq};$$

$$\text{Flux du rotor : } \vec{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}, \vec{\psi}_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}.$$

II.6.4. Modèle vectoriel de l'espace d'état du GADA

Il existe trois référentiels différents utilisés dans les calculs des axes d et q pour la simulation de machines asynchrone. La figure II.4 montre les vecteurs spatiaux dans les trois repères de référence, ces repères peuvent être classés selon la vitesse de rotation des axes d et q [12] :

- Référentiel stationnaire (appelé référentiel stator) : la vitesse de rotation est nulle.
- Repère de référence synchrone dq : les axes d et q tournent à la vitesse de rotation ω_s du flux du stator ou de la tension du stator.
- Référentiel de rotor $\alpha\beta$: les axes α et β tournent à la vitesse du rotor ω_m .

Le modèle d'espace d'état de GADA dans le référentiel rotor α - β peut être décrit par des équations. (II.15) – (II.19):

$$\text{Équation de tension statorique} \quad : \quad \vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s + j \cdot \omega_m \cdot \vec{\psi}_s \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Équation de tension rotorique} \quad : \quad \vec{v}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Équation de flux statorique} \quad : \quad \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Équation de flux rotorique} \quad : \quad \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m \cdot \vec{i}_s \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Équation du couple électromagnétique} \quad : \quad T_e = \frac{3}{2} p \Im m (\vec{\psi}_r \cdot \vec{i}_r) \quad (\text{II.19})$$

De plus, le modèle d'espace d'état d'un IM de rotor bobiné dans le référentiel d - q du rotor peut être décrit par des équations. (II.20) – (II.24) :

$$\text{Équation de tension statorique} \quad : \quad \vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s + j \cdot \omega_s \cdot \vec{\psi}_s \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Équation de tension rotorique} \quad : \quad \vec{v}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r + j \cdot \omega_r \cdot \vec{\psi}_r \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Équation de flux statorique} \quad : \quad \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Équation de flux rotorique} \quad : \quad \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m \cdot \vec{i}_s \quad (\text{II.23})$$

Où \vec{v}_s est le vecteur de tension du stator, \vec{i}_s est le vecteur de courant du stator, \vec{i}_r est le vecteur de courant du rotor, $\vec{\psi}_s$ est le vecteur de flux du stator, $\vec{\psi}_r$ est le vecteur de flux du rotor, R_s et R_r sont les résistances par phase dans le stator et le rotor, respectivement. L_s , L_r sont les inductances par phase dans le stator et le rotor, respectivement. L_m est l'inductance mutuelle, respectivement, et ω_m est la vitesse électrique. L_{ls} et L_{lr} sont respectivement les inductances de fuite du stator et des enroulements du rotor. T_e est le couple électromagnétique. La fréquence angulaire du rotor ω_m est directement liée à la vitesse angulaire du rotor Ω_m par le nombre de paires de pôles p comme

$$\omega_m = p \cdot \Omega_m \quad (\text{II.24})$$

Où ω_s et Ω_m sont respectivement la vitesse de rotation du repère synchrone et du repère de référence du rotor, qui sont liés par la relation suivante: $\omega_r = \omega_s - \omega_m$, ω_r désigne la fréquence angulaire relative entre le repère de référence synchrone et le repère de référence du rotor en rotation.

II.6.5. Configuration du système

La structure globale d'une éolienne autonome a été illustrée à la Fig.II.6. Un convertisseur dos à dos comprenant deux convertisseurs alimentés en tension avec commutateurs IGBT a été utilisé dans cette structure, connue sous le nom de convertisseur côté charge et convertisseur côté rotor. Cette étude ne concerne que le convertisseur côté rotor. On suppose que la tension de la liaison DC est déjà fournie pour le système. Par conséquent, seuls les modèles GADA et CCR sont donnés dans cette section.

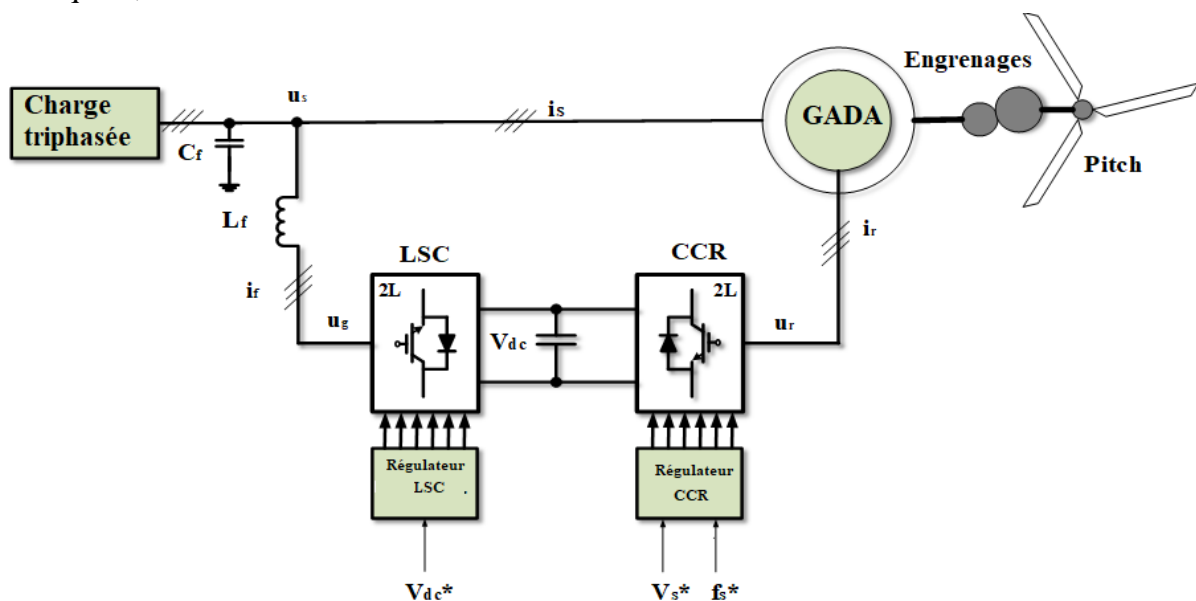


Figure II.6: Schéma de base des WPGS autonomes basés sur GADA. [7]

II.6.6. Circuit équivalent GADA autonome

Le circuit dynamique équivalent GADA autonome dans le cadre de référence synchrone dq est illustré à la Fig. II.7.

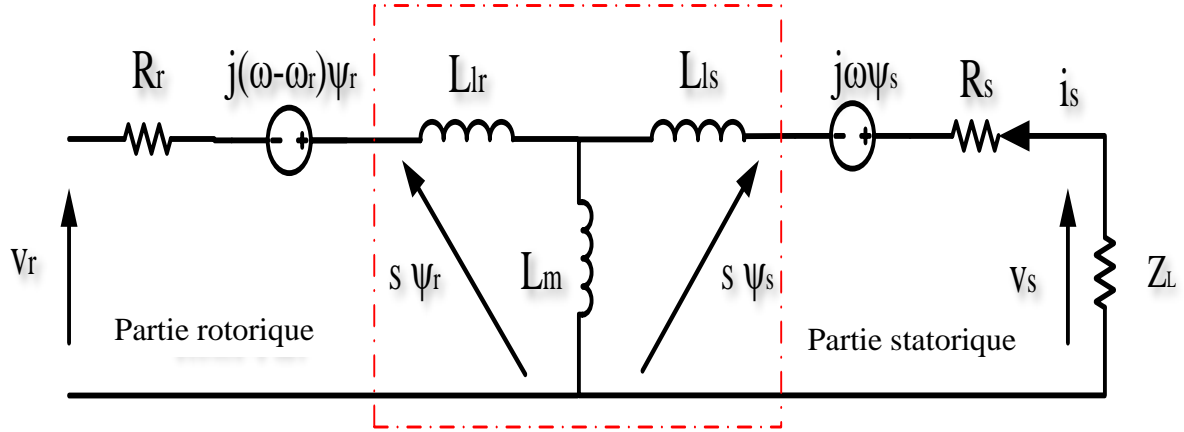


Figure II.7 : Circuit équivalent de GADA dans un référentiel arbitraire par une vitesse de rotation de ω .

Où

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (\text{II.25})$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (\text{II.26})$$

L_{ls} et L_{lr} sont respectivement les inductances de fuite du stator et du rotor. ω_r est la vitesse électrique du rotor en rad/s. ω est la vitesse de rotation du repère de référence arbitraire en rad/s. ω peut prendre une valeur arbitraire qui entraîne la conversion du repère de référence : repère stationnaire du stator ($\omega=0$), repère de référence stationnaire du rotor ($\omega=\omega_r$), repère de référence en rotation synchrone ($\omega = \omega_s$), où ω_s est la vitesse synchrone en rad/sec. Le modèle donné dans (II.20) – (II.24) : est valable pour les conditions stationnaires et transitoires.

La relation entre les flux du stator et du rotor peut être obtenue par la manipulation de (II.22)-(II.23) comme

$$\psi_s = \frac{L_s}{L_m} \cdot (\psi_r - \sigma \cdot L_r \cdot i_r) \quad (\text{II.27})$$

$$\psi_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_r + \sigma \cdot L_s \cdot i_s \quad (\text{II.28})$$

II.6.7. Modèle mathématique CCR

Dans ce travail, le CCR est un commutateur à deux niveaux (VSC) qui dispose de six commutateurs de puissance IGBT qu'il destinait à l'application de la méthode FS-PCC. La structure du CCR et de tous les vecteurs de tension du rotor est représentée à la Fig. II.7 Les séquences de commutation S peuvent être composées comme suit :

$$S = \frac{2}{3} \cdot (S_a + a \cdot S_b + a^2 \cdot S_c) \quad (\text{II.29})$$

Où $a = e^{-j2\pi/3}$, $S_i=1$ signifie S_i allumé, \bar{S}_i signifie éteint, et $i=a,b,c$. tous les vecteurs de tension du rotor v sont liés à l'état de commutation S par

$$v = v_{dc} \cdot S \quad (\text{II.30})$$

Où v_{dc} est la tension d'entrée de la liaison DC qui alimente le CCR.

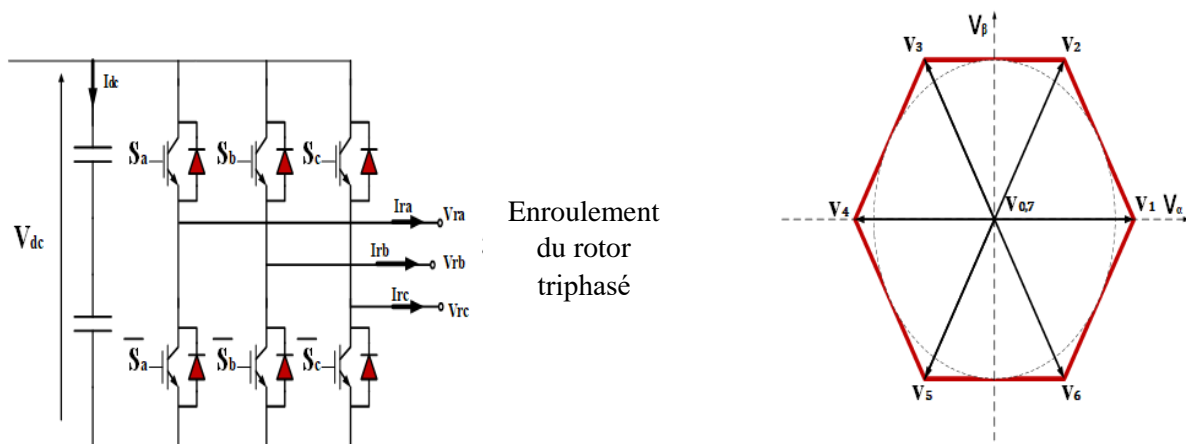


Figure II.8 : À gauche : onduleur de source de tension à deux niveaux ; À droite : Vecteurs de tension. [15]

Si l'on considère les huit vecteurs de tension v_i (v_0-v_7) possibles, on obtient les états de commutation S (S_0-S_7), comme le montre le tableau II.1.

Les états de commutation du CCR sont commandés par les impulsions de commutation S_a, S_b, S_c comme suit :

Tableau II.1: Paramètres du générateur synchrone triphasé

Commutation d'états	Vecteurs Tension	Vecteurs
$S = [S_a \quad S_b \quad S_c]$	$v_i = [v_{i\alpha} \quad v_{i\beta}]$	Nombre
$S_0 = [0 \quad 0 \quad 0]$	$v_0 = [0, 0]$	0
$S_1 = [1 \quad 0 \quad 0]$	$v_1 = [2V_{dc}/3, 0]$	1
$S_2 = [1 \quad 1 \quad 0]$	$v_2 = [V_{dc}/3, \sqrt{3}V_{dc}/3]$	2
$S_3 = [0 \quad 1 \quad 0]$	$v_3 = [-V_{dc}/3, \sqrt{3}V_{dc}/3]$	3
$S_4 = [0 \quad 1 \quad 1]$	$v_4 = [-2V_{dc}/3, 0]$	4
$S_5 = [0 \quad 0 \quad 1]$	$v_5 = [-V_{dc}/3, -\sqrt{3}V_{dc}/3]$	5
$S_6 = [1 \quad 0 \quad 1]$	$v_6 = [V_{dc}/3, -\sqrt{3}V_{dc}/3]$	6
$S_7 = [1 \quad 1 \quad 1]$	$v_7 = [0, 0]$	7

II.7. Conclusion

La génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est un système complexe et efficace qui joue un rôle crucial dans la production d'énergie, notamment dans les applications éoliennes. Sa capacité à fonctionner avec une commande flexible de la vitesse et de la puissance en fait une solution adaptée à une large gamme d'applications industrielles. Le commande de l'alimentation à travers des convertisseurs permet d'améliorer les performances, en particulier dans des environnements où la variation de la vitesse du vent ou de la charge est fréquente. Cependant, la modélisation et le commande de ce type de génératrice nécessitent une compréhension approfondie des dynamiques de l'électricité et des systèmes de régulation. Le défi consiste à optimiser ces systèmes pour réduire les pertes et maximiser l'efficacité énergétique, tout en garantissant une fiabilité et une stabilité accrues.

CHAPITRE III

**Commande vectorielle de la
génératrice asynchrone double
alimentation autonome**

III.1. Introduction

Pour une meilleure compréhension des performances du GADA ainsi que pour étudier tous les comportements transitoires possibles de celui-ci, ce chapitre introduit le modèle de la machine. Tout d'abord, le modèle dans le référentiel triphasé est présenté. Ensuite, en utilisant des transformations de coordonnées, le modèle dynamique dans le cadre de référence rotatif dq est présenté. Ce modèle est utile pour l'étude de tous les effets dynamiques importants qui se produisent pendant l'état stable et les opérations transitoires. Ainsi, il devrait être valide pour toute variation dans le temps des tensions ou des courants générés par l'onduleur qui alimente le générateur.

Ce chapitre est organisé comme suit. La section 2.2 donne la représentation en espace d'état d'un système triphasé. La section 2.3 présente le modèle mathématique du GADA. Les modèles de convertisseur CCR sont décrits dans la section 2.4. Enfin, la section 2.5 détaille la conception de commande de base du GADA autonome.

III.2. Stratégie de systèmes GADA autonomes

Les problèmes des systèmes d'énergie éolienne autonomes concernent le maintien de l'amplitude de tension du point de couplage commun (amplitude de tension du stator) et la fréquence constante, puisque ces systèmes sont directement connectés à la charge. De plus, la qualité de l'énergie dans le système GADA autonome est un enjeu significatif. L'objectif de la stratégie de commande est de maintenir l'amplitude de tension et la fréquence constantes avec une haute qualité de l'énergie, quelle que soit la charge connectée au mode autonome.

Afin d'atteindre une meilleure performance du système GADA autonome, une structure en cascade avec la théorie SFOC est utilisée pour l'algorithme de commande. Les diagrammes vectoriels SVOC et SFOC sont représentés dans la Figure III.1.

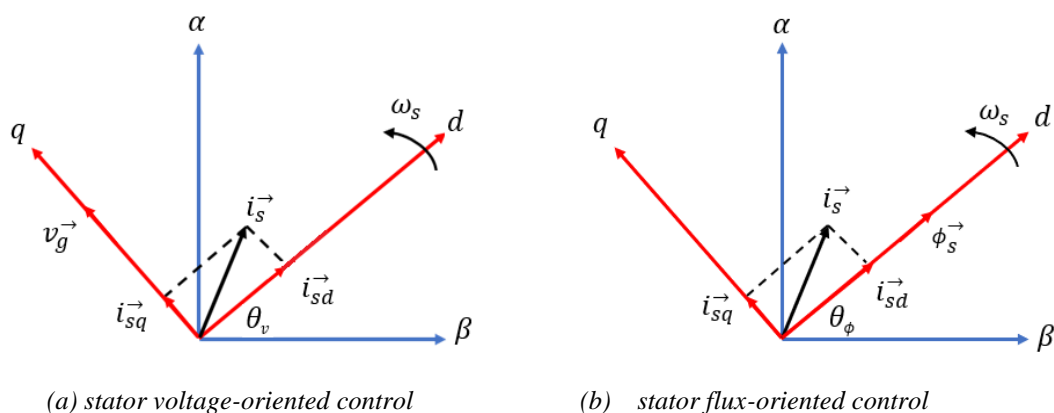


Figure III.1: Schéma vectoriel du système de commande GADA.

III.2.1. Commande de l'orientation du champ statorique

Le schéma SFOC commande indépendamment les courants du rotor à deux axes (I_{dr}^* et I_{qr}^*) dans un référentiel en rotation synchronisée dq aligné avec la position du vecteur de liaison de flux du stator, comme illustré dans le diagramme de phasor à la Fig III.2. Le schéma SFOC dépend de l'estimation correcte de la position du vecteur de liaison de flux du stator. Une approche courante pour estimer la position de la liaison de flux repose sur la négligence de la chute de tension résistive du stator et donc sur l'alignement du vecteur d'espace de liaison de flux avec la position qui retarde le vecteur d'espace de tension du stator de 90° [16].

Avec l'approche SFOC, le vecteur de liaison de flux est traditionnellement aligné avec l'axe d du cadre de référence tournant synchroniquement. De plus, son angle θ_s par rapport au cadre de référence du stator (α_s, β_s) peut être simplement obtenu à partir des mesures de tension triphasée du stator en utilisant le BVP [17].

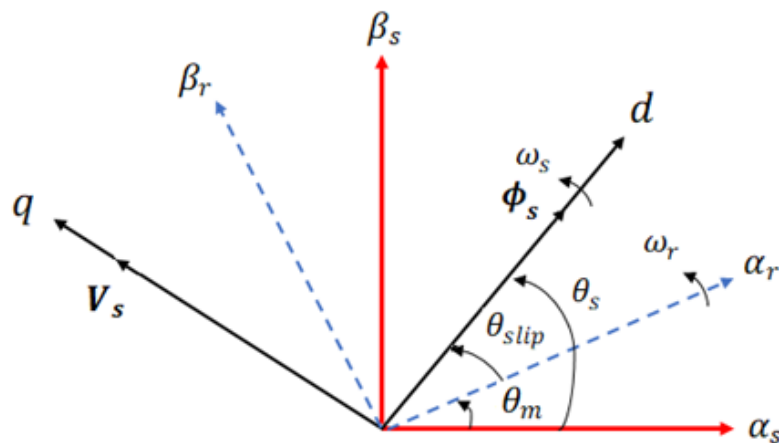


Figure III.2: Diagramme de phase.

La position du cadre de référence du rotor (α_r, β_r) par rapport au cadre de référence stationnaire est calculée à partir des signaux de sortie de l'encodeur. En combinaison avec θ_s , la position du cadre de référence du rotor est utilisée pour déterminer la valeur en temps réel de l'angle de glissement du rotor, θ_{slip} , dans DSPACE. La valeur de l'angle de glissement en temps réel est utilisée pour la transformation de toutes les variables pertinentes du rotor vers le cadre de référence tournant de manière synchrone, aligné avec le vecteur de liaison du flux requis pour les algorithmes SFOC en temps réel. Dans le SFOC, le flux statorique est aligné avec l'axe d et maintenu constant.

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_s \\ \psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

En considérant le découplage, le système d'équations (II.20) des tensions du stator et du rotor est simplifié comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_r \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_r \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

En négligeant la résistance du stator et en reportant le GADA au cadre de référence choisi, les équations de tension, de flux et de couple à l'état stationnaire du stator peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} \cong 0 \\ v_{qs} = \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Les équations reliant les courants du stator aux courants du rotor sont déduites comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\psi_{ds}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{\psi_{qs}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les équations de flux sont :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r \sigma I_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r \sigma I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Où : } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Ainsi, les équations de tension du rotor sont définies comme suit :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r L_r \sigma i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r L_r \sigma i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les équations reliant les courants du stator aux courants du rotor sont déduites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(v_{dr} - R_r i_{dr} + \omega_r L_r \sigma i_{qr} - \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(v_{qr} - R_r i_{qr} - \omega_r L_r \sigma i_{dr} - \omega_r \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \right) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

L'équation du couple s'exprime comme suit :

$$T_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{qr} \quad (\text{III.9})$$

Les puissances active et réactive du côté du stator du GADA sont :

$$\begin{cases} P_s = -v_{qs} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = v_{qs} \frac{\psi_{ds}}{L_s} - v_{qs} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

La Fig.III.3 présente l'algorithme de commande SFOC classique du système GADA autonome. D'après la Fig.III.3, la tension et le courant statoriques triphasés ainsi que le courant rotorique triphasé sont mesurés. À la place, la fréquence angulaire synchrone de référence ω_s est définie par l'utilisateur en fonction de la fréquence de fonctionnement. Ensuite, l'angle angulaire statorique du flux θ_s est déduit de l'intégrale de la valeur fixée de la fréquence angulaire synchrone. De plus, un encodeur est utilisé pour mesurer l'angle mécanique du rotor converti en son équivalent électrique en utilisant le nombre de paires de pôles. Les paramètres triphasés mesurés sont ensuite transformés en un cadre de référence dq synchrone. Il convient de noter que le courant rotorique triphasé est transformé en un cadre de référence dq synchrone en utilisant la phase angulaire de glissement $\theta_r = \theta_s - \theta_m$.

La valeur réglée de la magnitude de la tension du stator $|V_s^*|$ est comparée à la magnitude de la tension du stator mesurée $|V_s|$ obtenue par $\sqrt{(v_{ds}^2 + v_{qs}^2)}$

L'erreur dans l'amplitude de la tension du stator est l'entrée du régulateur PI externe. La sortie du régulateur PI externe est la référence de courant du rotor en axe d . La référence de courant du rotor en axe d est ensuite comparée au courant du rotor en axe d en utilisant le régulateur PI interne. La référence de tension du rotor en axe d est obtenue par la soustraction de la sortie du régulateur PI par les termes de compensation, comme montré dans la Fig.III.3. D'autre part, la référence de courant en axe q est choisie pour forcer le lien du flux en axe d à s'aligner le long de l'axe d du cadre de référence synchrone dq . La référence

Où $\tau_r = \frac{\delta L_r}{R_r}$ sont les constantes de temps électriques le long des axes d et q , respectivement, et s est la variable de Laplace. Les systèmes en boucle fermée du commande de courant le long des axes d et q sont montrés dans la Fig.III.5. Le CCR est généralement inclus dans la procédure de conception de ces systèmes en boucle fermée comme un retard égal à [16].

$$T_d = \frac{T_s}{2} \tag{III.13}$$

Où T_s est le temps d'échantillonnage. Dans le plan s , le retard introduit par le CCR peut être approximé par un système de retard d'ordre un comme [16].

$$v_{dq}(s) = e^{-sT_s} v_{dq}^*(s) \approx \frac{1}{(1 + sT_d)} v_{dq}^*(s) \tag{III.14}$$

Également à partir de la Fig. III.4, le commande de forme d'onde est appliqué pour le GADA autonome afin d'atteindre la commande de découplage du courant. Le vecteur de flux statorique est orienté le long de l'axe d , tandis que le vecteur de tension statorique doit s'aligner le long de l'axe q pour atteindre la commande de découplage de la tension [18]. En forçant le flux statorique ψ_{sq} et la tension statorique v_{sd} à être nuls, l'orientation est atteinte. Cela conduit à une fonction de transfert dynamique de premier ordre avec un temps dérivé égal à τ_s comme ci-dessous :

$$\psi_{sd} = |\psi_s| = \frac{L_m}{\tau_s \cdot s + 1} \cdot i_{rd} \tag{III.15}$$

Où la constante de temps du stator $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$, et en posant $v_{sq} = \omega_s \psi_{sd}$, les systèmes en boucle fermée du commande de la tension du stator le long de l'axe d sont illustrés à la Fig.III.5.

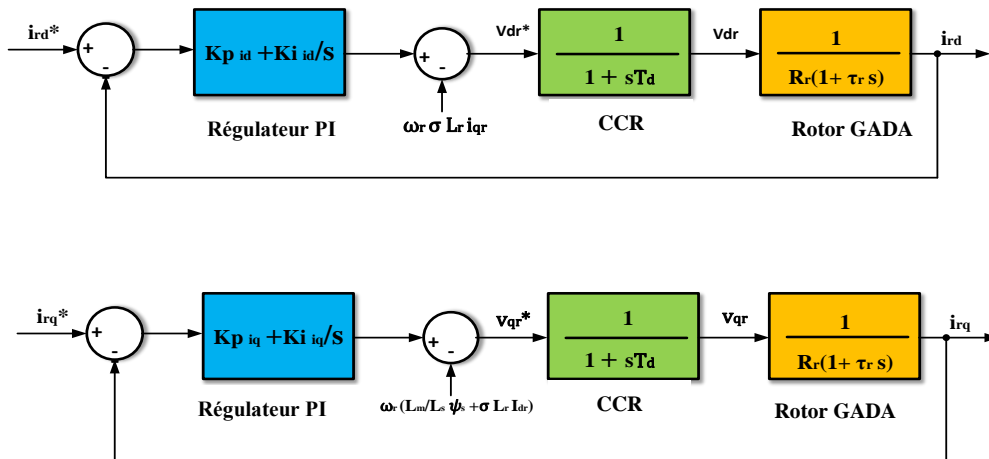


Figure III.4: Système à boucle fermée de commande du courant de l'axe d-q [16].

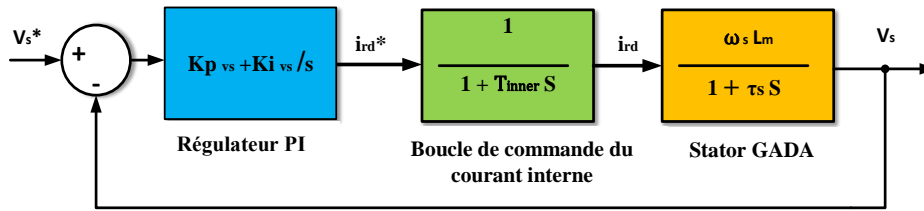


Figure III.5: Système à boucle fermée de commande de l'amplitude de la tension du stator [16].

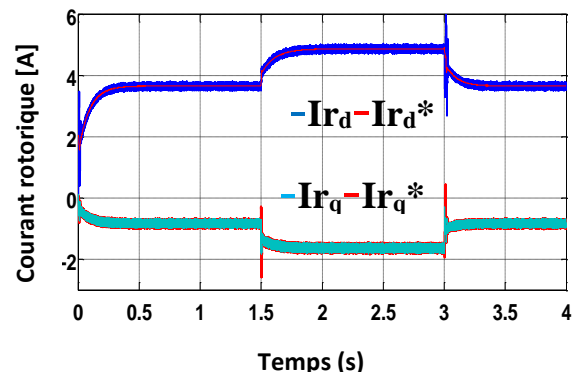
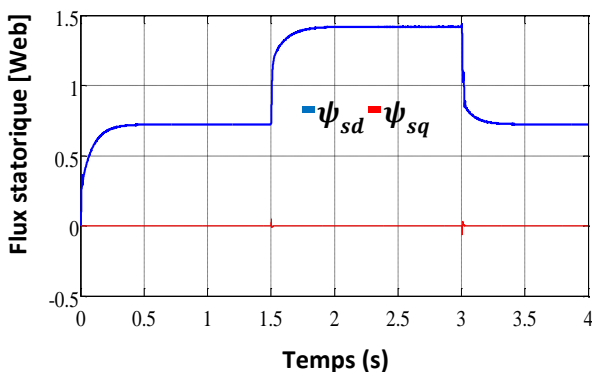
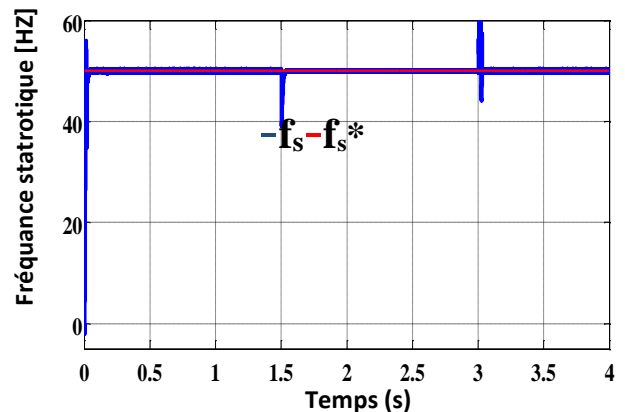
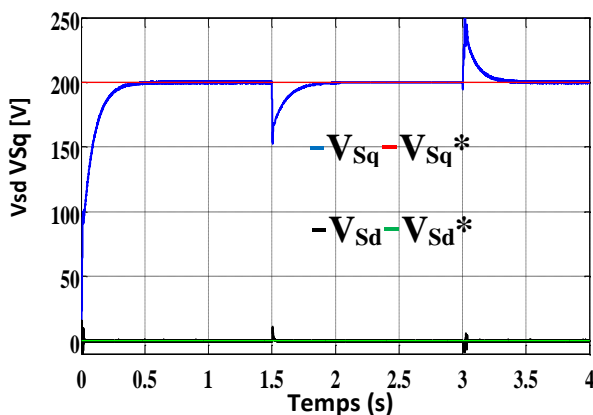
La conception des paramètres des régulateur PI du courant et de la tension statorique peut généralement être effectuée en utilisant la méthode de l'amplitude optimale ou la méthode de placement des pôles. Les stratégies de commande pour le générateur GADA autonome basé sur le SFOC peuvent être divisées en deux catégories principales : le commande par l'orientation direct et le commande par l'orientation indirect. Dans les chapitres suivants, ces catégories de stratégies de commande seront améliorées et leur coût réduit.

III.3. Résultats obtenus

Pour déterminer la performance des méthodes de commande proposées, le comportement du système contrôlé est évalué pendant les conditions de fonctionnement suivantes :

- a) Variation de l'amplitude de la tension statorique en régime permanent.
- b) Changement de charge.
- c) Variation de la vitesse de rotation.

III.3.1 Variation de charge



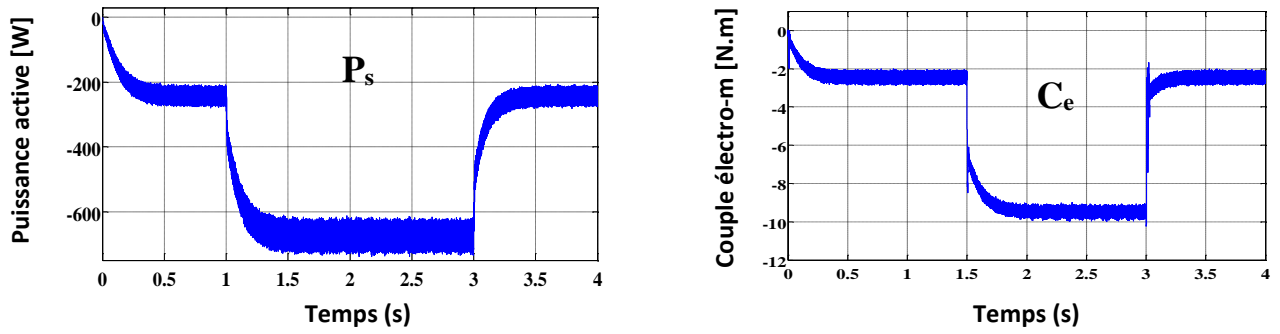


Figure III.6: Reselta Variation de charge

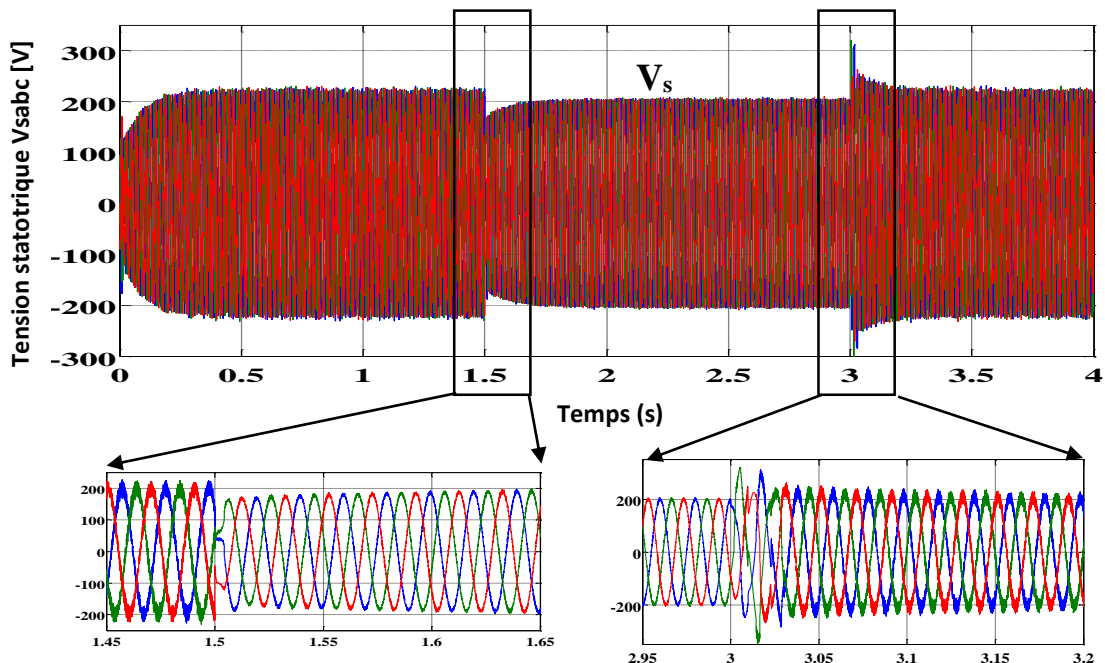
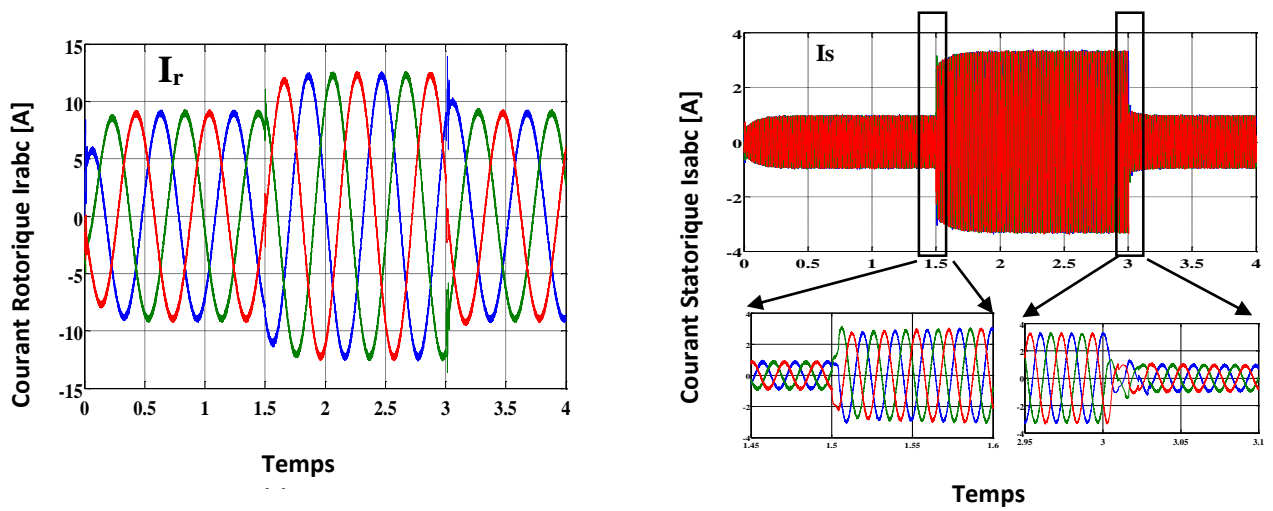
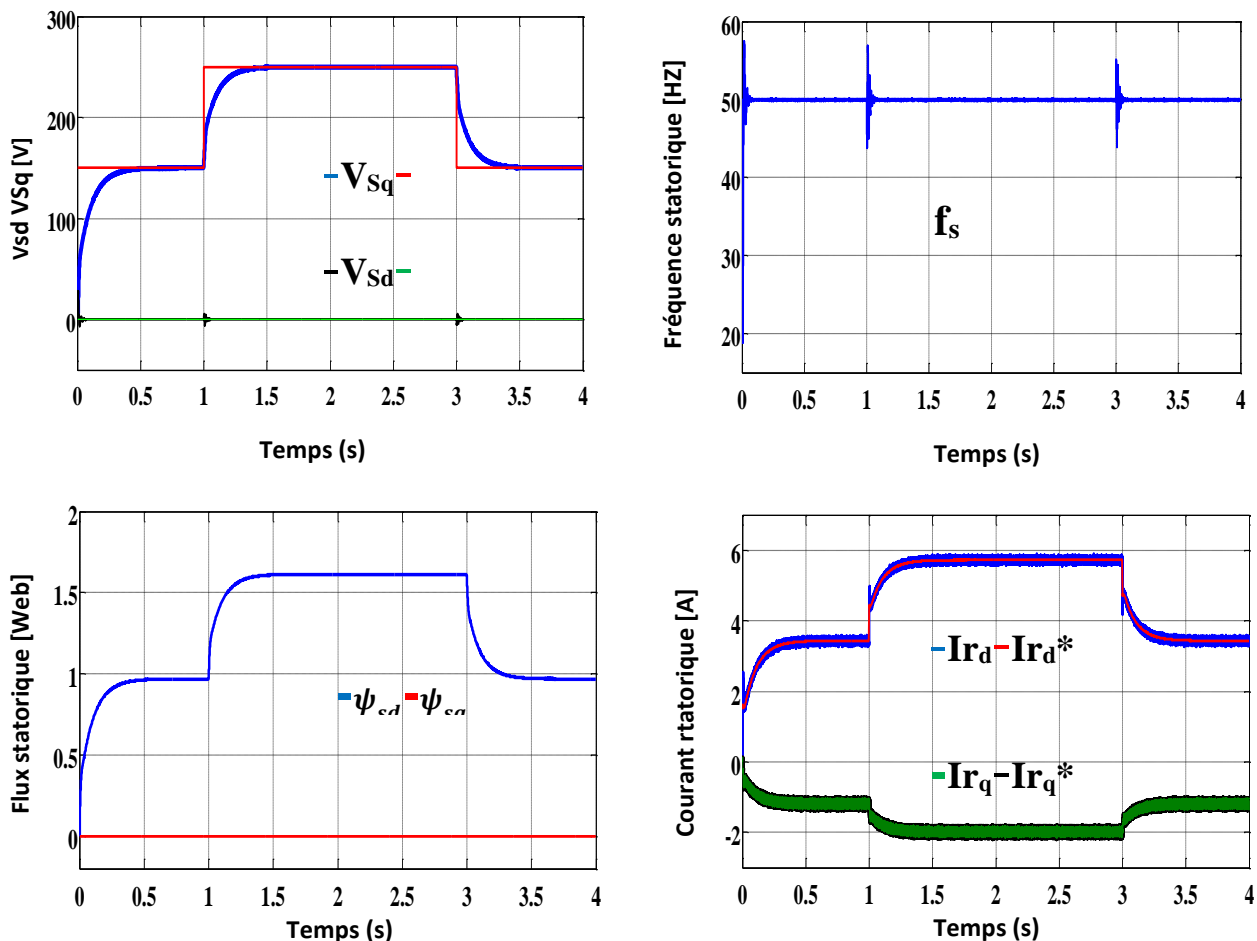


Figure III.7: Résultats Variation de charge

Pour analyser l'effet de la fluctuation de la charge, reliée au stator du GADA, la charge passe de 2 kW à 4 kW à 1,7 s avant de diminuer de 4 kW à 2 kW à 3,7 s. Ceci se produit alors que le GADA opère à une vitesse constante du rotor fixée à 1450 tr/min. Les figures présentent les résultats de simulation variés obtenus en utilisant la stratégie de commande suggérée, montrant l'étendue de la tension statorique de référence et mesurée, le courant statorique et le courant rotorique, en fonction du changement de valeur de la charge. Il est évident que l'amplitude de la tension statorique a été affectée par l'application de la charge, en montrant un sous-dépassement, puis l'amplitude a été récupérée rapidement en raison de la boucle de régulation. Ainsi, la hausse et la baisse du courant du stator et du rotor sont attribuées à l'accroissement et à la réduction de la valeur de la charge. Les observations présidentielles indiquent que la tension du stator demeure constante à la valeur désirée de 250 V, indépendamment des fluctuations de la charge. L'observation des résultats président indique une fluctuation notable de la puissance active du stator et du couple du générateur électromagnétique, due à l'oscillation de la charge. L'indication négative signale que la quantité fournie s'approche de la charge.

III.3.2. Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :



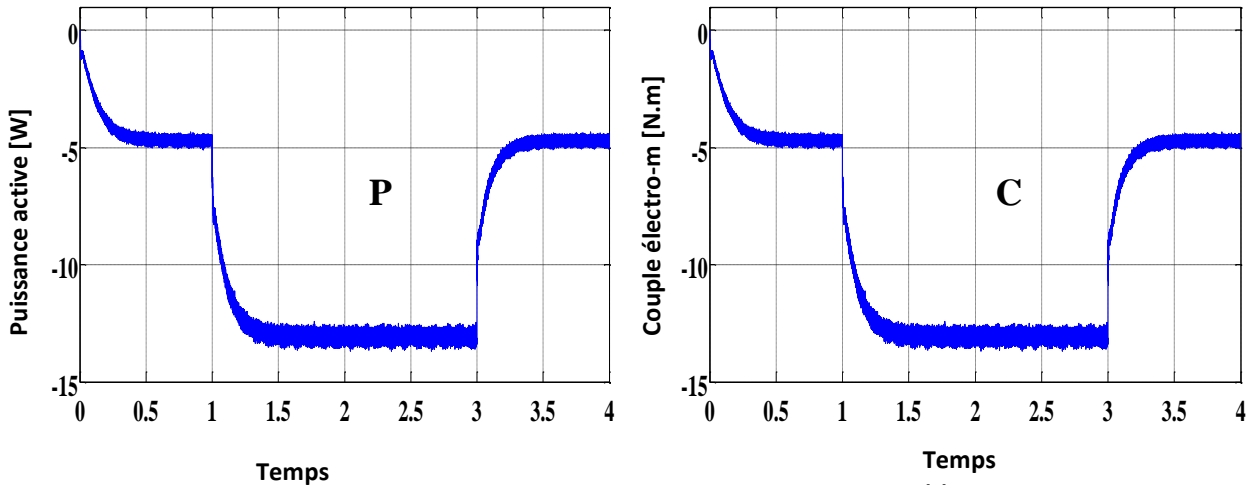


Figure III.8: Résultats Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique

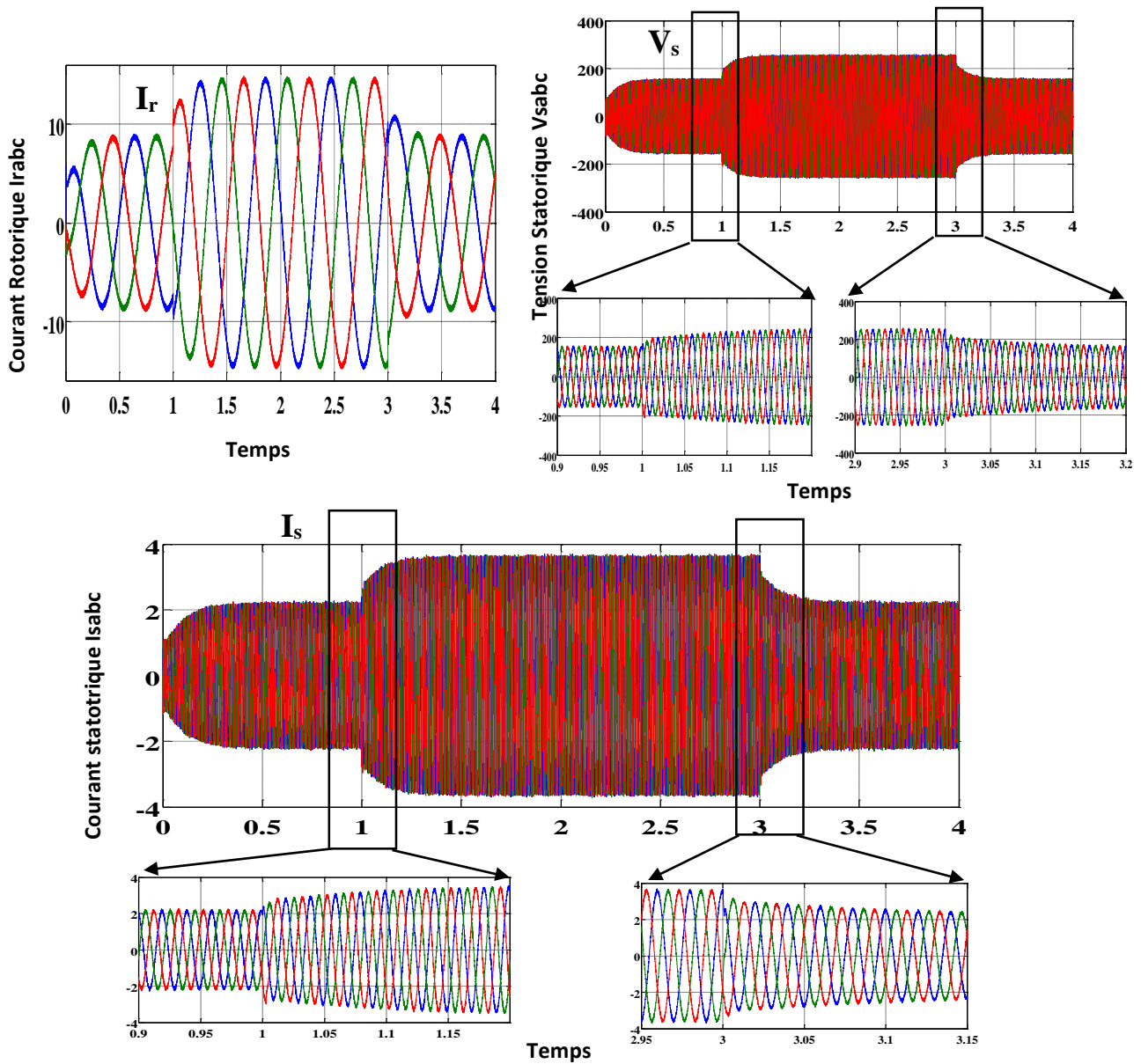


Figure III.9: Résultats Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique.

Initialement, le GADA fonctionne à une vitesse stable de 1 450 tours par minute et alimente une charge résistive constante de 2 kW. Pour démontrer la performance dynamique de la méthode suggérée, une modification du niveau de référence de la tension de sortie a été mise en œuvre. Le seuil de l'amplitude de la tension du stator a été ajusté, passant de 150 V à 250 V à 1 seconde, puis de 250 V à 150 V à 3 secondes. Les diverses issues de la simulation sont illustrées dans les figures en tête. Les diagrammes président montrent l'étendue de la tension statorique de référence et effective, la tension de phase du stator ainsi que le courant de phase du rotor. La simulation indique que grâce à l'usage de la commande vectorielle, la tension du stator et le courant du rotor présentent une forme d'onde sinusoïdale de qualité. De même, les diagrammes illustrent la fluctuation de la tension statorique et du courant de rotor. Ils démontrent également la fluctuation de la puissance active du stator et du couple électromagnétique du générateur, avec des ondulations minimales lorsque l'amplitude de la tension statorique est ajustée en augmentant puis en diminuant cette même amplitude.

III.3.3. L'influence de défaut capteur de vitesse sur la commande vectorielle

Comme un autre avantage, étant donné que la méthode proposée ne nécessite pas de capteur de vitesse de rotor, sa réponse n'est pas affectée par les erreurs/bruits de ce type de capteur. Pour étudier l'effet des erreurs de capteur, une erreur de -5% est ajoutée au capteur de vitesse de la méthode FOC bien connue, et les résultats sont montrés dans la Fig.III.10. Comme on peut le voir dans cette figure, la fréquence de la tension statorique a une erreur d'état stationnaire de -5% qui est égale à l'erreur du capteur de vitesse. Cela est dû au fait que le commande de fréquence dans les méthodes basées sur FOC n'est pas en boucle fermée et que les erreurs de capteur de vitesse affectent directement le régulateur de fréquence.

III.4. Conclusion

Ce chapitre présente les stratégies de modélisation et de pilotage du GADA en mode autonome basées sur FOC. Dans le cadre du modèle de commande, la fonction de régulation est généralement effectuée à l'aide de régulateur PI. Un des enjeux est d'ajuster les paramètres des boucles de commande PI pour garantir une performance optimale du système. Plusieurs recherches ont déterminé les paramètres du régulateur PI en utilisant des méthodes traditionnelles, et il est ardu d'identifier les paramètres optimaux du régulateur en se basant sur ces techniques. Ainsi, le chapitre suivant mettra l'accent sur les algorithmes de commande avancés pour déterminer le meilleur régulateur pour le CCR du GADA autonome.

Chapitre IV

**Commande direct de tension d'une
génératrice asynchrone double
alimentation autonome**

IV.1. Introduction

La plupart des stratégies qui ont été utilisées pour commande le GADA sont basées sur le FOC ; ce schéma de commande nécessite des tâches computationnelles complexes et des valeurs très précises pour les paramètres de la machine. De plus, les courants statoriques et les capteurs de vitesse du rotor doivent être mis en œuvre ; ces exigences peuvent entraîner une inexactitude lors du fonctionnement en cas de pannes de capteurs. Les techniques de commande direct, comme la commande directe du flux du rotor (DRFVC), peuvent surmonter ces inconvénients grâce à la réduction des calculs et à l'algorithme de commande simplifié, qui est sans capteur et ne nécessite pas un grand nombre de transformations de coordonnées. Le plan DRFVC n'oblige pas de changement d'axes comme toutes les méthodes de commande conventionnelles, car elles sont effectuées dans un cadre de référence stationnaire. Par conséquent, ce schéma ne subit pas les effets néfastes des changements de paramètres de la manière dont les différentes méthodes de commande le font. De même, il n'y a pas de boucle de commande en retour du courant, ce qui fait que les activités de commande n'éprouvent pas les retards inhérents aux régulateurs actuels, pas de MLI, pas de régulateurs PI et pas de capteurs de courant ou de vitesse du stator. Par conséquent, c'est une méthode de régulation sans capteur, qui fonctionne avec le GADA sans imposer un arbre appuyé sur un détecteur mécanique. Ici, des régulateurs de magnitude et de fréquence de la tension du stator en ligne sont utilisés pour la fermeture de boucle.

Dans ce chapitre, les DRFVC sont proposés pour des GADA autonomes qui sont présentés en détail. De plus, plusieurs simulations et expériences sont montrées afin de démontrer les performances et la faisabilité de ces algorithmes.

IV.2. Commande amélioré CCR basé sur la commande vectorielle du flux du rotor direct et la modulation par vecteur spatial (DRFVC-SVM)

IV.2.1. Description du schéma de commande

La structure générale de l'approche DRFVC-SVM est donnée par le diagramme en blocs de la Fig.VI.1. L'idée de base de cette stratégie est le découplage entre l'amplitude et l'argument du vecteur de flux du rotor. En effet, l'amplitude de référence du vecteur de flux du rotor sera imposée par la boucle de commande de la magnitude de la tension du stator, tandis que l'argument de référence sera calculé selon la boucle de commande de régulation de fréquence. Le DRFVC est principalement basé sur un régulateur de flux du rotor prédictif interne qui choisit la référence de tension du rotor assurant la fourniture du vecteur de flux du

rotor désiré. Enfin, la référence de tension du rotor sera modulée par une technique de modulation SVM, garantissant une fréquence de commutation constante.

L'algorithme de commande DRFVC-SVM peut être résumé en les étapes suivantes :

- Estimation de l'amplitude et de la fréquence de la tension du stator.
- Évaluation de l'amplitude du vecteur de flux du rotor de référence à travers la boucle de commande de l'amplitude de la tension du stator.
- Évaluation de l'angle du vecteur de flux du rotor de référence à travers la boucle de commande de la fréquence.
- Estimation et élaboration du flux du rotor en utilisant la boucle de commande prédictive intérieure.
- Sélection de la référence de tension du rotor dans le cadre de référence $\alpha\beta$ du rotor.
- Génération de pulses après modulation de la référence de tension du rotor utilisant la technique SVM.

Dans les sections suivantes, chaque étape correspondant à cet algorithme est expliquée.

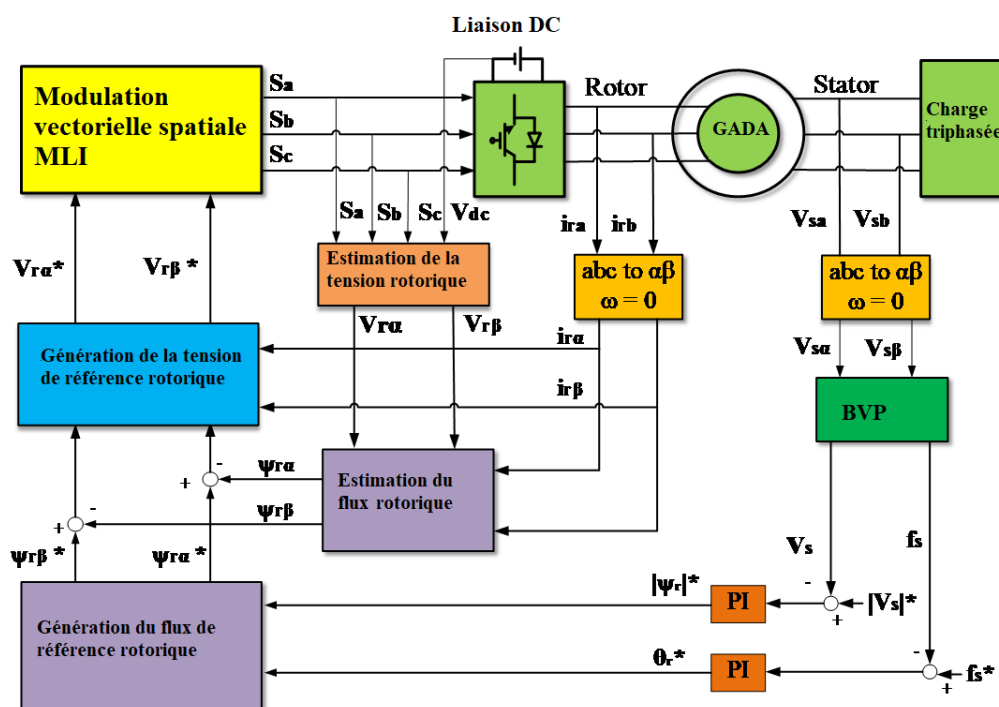


Figure IV.1 : Schéma du bloc du DRFVC proposé.

IV.2.2. Boucle de commande de la magnitude de la tension de stator

Dans la méthode DRFVC proposée, l'amplitude de la tension du stator est régulée en ajustant l'amplitude du flux du rotor, comme indiqué dans la boucle de commande supérieure de la Fig.IV.1. L'objectif de cette sous-section est d'illustrer la relation entre l'amplitude de la

tension du stator et l'amplitude du flux du rotor. Initialement, la tension du stator $\vec{\psi}_s$ est calculée par rapport au flux du stator $\vec{\psi}_s$. Le circuit équivalent de la Fig. IV.1 est transféré au référentiel de flux du stator, en choisissant $\omega = \omega_s$, donc en régime permanent, le flux du stator devient constant (valeur DC), ce qui signifie que[18]

$$\frac{d}{dt} \vec{\psi}_s = 0 \quad (\text{IV.1})$$

D'autre part, en tenant compte de la charge Z_L , et en supposant que le GADA autonome est connecté à un micro-réseau à facteur de puissance unitaire (PF=1), on peut dire que le GADA alimentera seulement la partie réelle de l'impédance de charge $Z_L = R_L + jL_L\omega_s$. Ainsi, le courant statorique \vec{i}_s peut être obtenu par rapport à la tension statorique \vec{v}_s comme suit [18]:

$$\vec{i}_s = -\frac{\vec{v}_s}{R_L} \quad (\text{IV.2})$$

En substituant (IV.2) dans (II.15), \vec{v}_s peut être exprimé par rapport au flux du rotor $\vec{\psi}_r$ comme suit[18] :

$$\vec{v}_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{j\omega_s R_L}{(R_l + R_s) + j\omega_s \delta L_s} \vec{\psi}_r \quad (\text{IV.3})$$

Donc,

$$|\vec{v}_s| = \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{\omega_s R_L}{\sqrt{(R_l + R_s)^2 + (\omega_s \delta L_s)^2}} |\vec{\psi}_r| \quad (\text{IV.4})$$

L'équation (IV.4) montre que l'amplitude de la tension statorique $|\vec{v}_s|$ a une relation directe avec la magnitude du flux rotorique $|\vec{\psi}_r|$, par conséquent, un régulateur PI peut être utilisé pour réguler $|\vec{v}_s|$ en contrôlant $|\vec{\psi}_r|$.

IV.2.3. Boucle de commande de la fréquence de tension du stator

Dans la méthode proposée, la fréquence de la tension statorique ω_s est régulée par l'angle de flux du rotor. Cette fréquence est la somme de la vitesse mécanique du rotor ω_m et de la fréquence de glissement ω_r [21]

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad (\text{IV.5})$$

Selon (IV.1), pour maintenir ω_s constant, les variations de ω_m doivent être compensées en contrôlant ω_r . Comme ω_s a une relation directe avec ω_r , un régulateur PI peut être utilisé pour réguler la fréquence de la tension statorique, où sa sortie est la référence de la fréquence

de glissement ω_r^* . Comme le montre la Fig. IV.1, en intégrant ω_r^* , la référence de l'angle de flux du rotor θ_r est obtenue. [10]

$$\theta_r^* = \int \omega_r^* dt \quad (IV.6)$$

IV.2.4. Calcul de vecteurs de flux rotor référencés

L'amplitude du flux du rotor $|\psi_r|^*$ et la référence angulaire de glissement θ_r^* , qui sont les sorties du régulateur PI de l'amplitude de la tension statorique et de sa fréquence respectivement, seront utilisées pour calculer les composants de la référence du flux du rotor. Dans le référentiel du rotor (α, β), les coordonnées du flux de rotor de référence $\psi_{r\alpha}^*$ et $\psi_{r\beta}^*$ sont calculées à partir des coordonnées polaires selon les expressions suivantes [10]:

$$\psi_{r\alpha}^* = |\vec{\psi}_r|^* \cos(\theta_r^*) \quad (IV.7)$$

$$\psi_{r\beta}^* = |\vec{\psi}_r|^* \sin(\theta_r^*) \quad (IV.8)$$

IV.2.5. Calcul de vecteurs de tension de rotor référencés

Les coordonnées des références des vecteurs de tension de rotor $v_{r\alpha}^*$ et $v_{r\beta}^*$ dans le cadre de référence de rotor (α, β) sont déterminées par les équations suivantes[11] :

$$v_{r\alpha}^* = \frac{\psi_{r\alpha}^* - \psi_{r\alpha}}{T_s} - R_r i_{r\alpha} \quad (IV.9)$$

$$v_{r\beta}^* = \frac{\psi_{r\beta}^* - \psi_{r\beta}}{T_s} - R_r i_{r\beta} \quad (IV.10)$$

Enfin, ils sont introduits au bloc SVM, qui les utilise pour commande les interrupteurs de l'onduleur (S_a, S_b, S_c).

IV.2.6. Algorithme de modulation par vecteur spatial

La technique SVM fait référence à un schéma de commutation spécial des six transistors de puissance d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) triphasé. En fait, la technique SVM utilise huit sortes de modes de commutation différents de l'onduleur pour commande le flux du rotor afin d'avancer le cercle de flux de référence. Huit types de modes de commutation correspondent à huit vecteurs de tension spatiaux qui contiennent six vecteurs de tension actifs et deux vecteurs de tension nulle comme montré dans la Fig IV.2 (a).

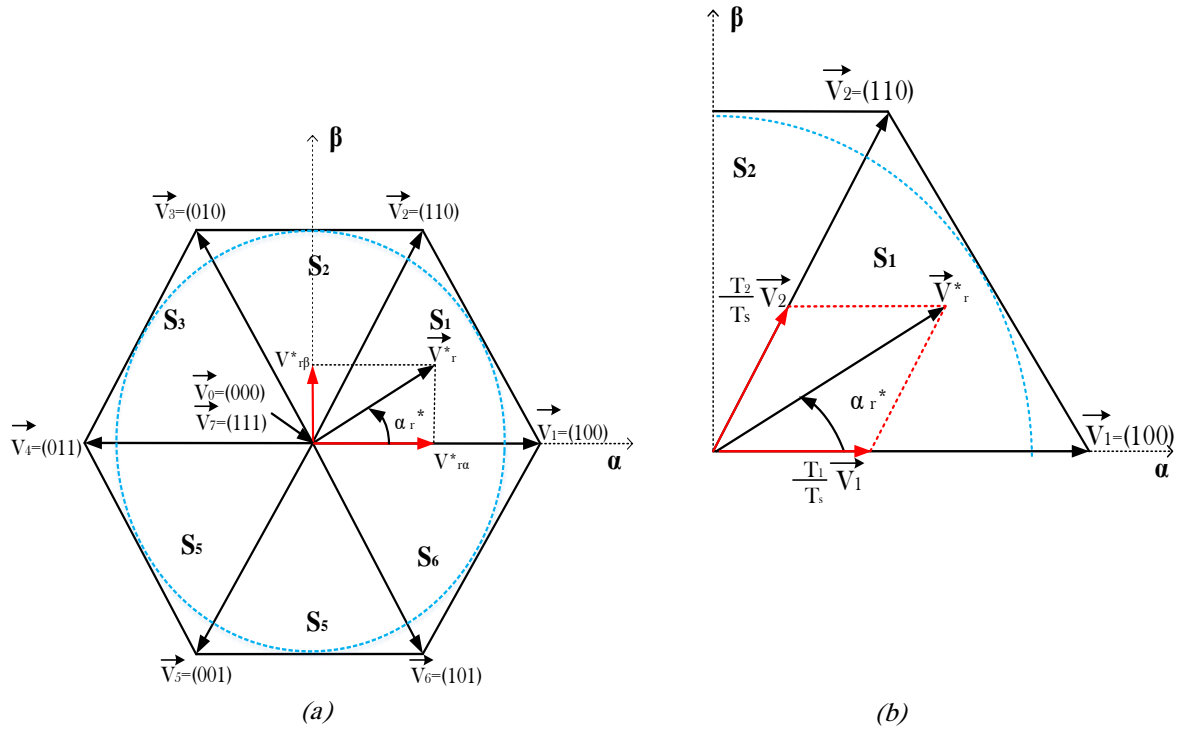


Figure IV.2: (a) Vecteurs de commutation de base et secteurs. (b) Projection du vecteur de tension de référence sur deux vecteurs adjacents.

Le vecteur de tension de référence \vec{v}_r , défini par les composants de tension de référence (v_α^* , v_β^*) calculés par le commande vectoriel, peut être synthétisé à travers une relation moyenne entre deux vecteurs actifs voisins. Des vecteurs nuls sont utilisés pour combler l'écart jusqu'à un intervalle d'échantillonnage constant.

Prenant comme exemple un vecteur de référence dans le secteur 1, comme montré dans la Fig IV.2 (b). Ce vecteur peut être représenté par la sommation de deux vecteurs non nuls v_1 et v_2 pendant des périodes de temps appropriées, ce qui donnera une direction, avec l'ajout de vecteurs nuls pour échelonner le vecteur. L'algorithme de modulation est composé de trois étapes sur la période de commutation T_s comme montré dans la Fig IV.3. La première étape applique le vecteur non nul v_1 pendant une période T_1 . La deuxième étape applique un vecteur non nul v_2 pendant une période T_2 , jusqu'à ce que la tension ait la même phase que \vec{v}_r^* . Le vecteur résultant jusqu'à présent sera identique au vecteur de référence \vec{v}_r^* . La dernière étape applique un vecteur nul pendant le temps $T_0 = (T_s - T_1 - T_2)$ jusqu'à ce que le temps T_s soit atteint.

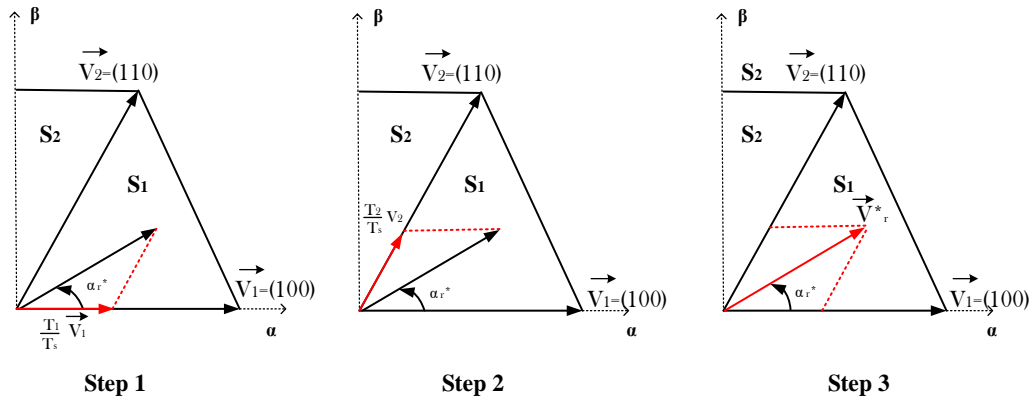


Figure IV.3 : Étapes de l'algorithme de modulation.

Cet algorithme de modulation en trois étapes peut être représenté par l'expression mathématique [25]:

$$\int_0^{T_s} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \vec{V}_{0,7} dt \quad (IV.11)$$

Cela peut être exprimé comme

$$\vec{V}_{ref} = \frac{T_1}{T_s} \vec{V}_1 + \frac{T_2}{T_s} \vec{V}_2 + \frac{T_0}{T_s} \vec{V}_{0,7} \quad (IV.12)$$

Puisque le vecteur de référence \vec{v}_r^* est supposé exister dans le secteur I ($0 \leq \alpha_r^* \leq 60^\circ$), comme illustré à la Fig IV.2, (3.2) peut être représenté par[25]

$$|\vec{v}_r^*| \cos \alpha_r^* = \frac{T_1}{T_s} |\vec{V}_1| + \frac{T_2}{T_s} |\vec{V}_2| \cos \frac{\pi}{3} \quad (IV.13)$$

$$|\vec{v}_r^*| \sin \alpha_r^* = \frac{T_2}{T_s} |\vec{V}_2| \sin \frac{\pi}{3} \quad (IV.14)$$

Ainsi

$$|\vec{v}_r^*| \cos \alpha_r^* = \frac{T_1}{T_s} \left(\frac{2}{3} V_{dc} \right) + \frac{T_2}{T_s} |\vec{V}_2| \cos \frac{\pi}{3} \quad (IV.15)$$

$$|\vec{v}_r^*| \sin \alpha_r^* = \frac{T_2}{T_s} \left(\frac{2}{3} V_{dc} \right) \sin \frac{\pi}{3} \quad (IV.16)$$

Où V_{dc} est la tension continue d'entrée (la tension du rail DC), $|\vec{v}_r^*|$ est la magnitude du vecteur de référence \vec{v}_r^* , et α_r^* est la phase du vecteur de référence. Les périodes de temps T_1 , T_2 et T_0 peuvent être calculées à l'aide de (3.3) de sorte que[25]

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} |\vec{v}_r^*|}{V_{dc}} T_s \sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha_r^* \right) \quad (IV.17)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} |\vec{v}_r^*|}{V_{dc}} T_s \sin(\alpha_r^*) \quad (\text{IV.18})$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (\text{IV.19})$$

Les équations précédentes sont également valides pour les secteurs restants en sachant dans quel secteur se trouve le vecteur de référence et en faisant correspondre α_r^* à l'angle entre le vecteur de base immédiatement précédent et le vecteur de référence. D'après l'analyse ci-dessus, on constate que tant le module que l'angle du vecteur de liaison de flux du rotor peuvent être contrôlés directement par un vecteur de tension d'espace approprié avec SVM. Plusieurs schémas de commutation peuvent être générés en fonction du choix des vecteurs nuls et de la séquence dans laquelle les vecteurs sont appliqués au sein du cycle de commutation. Les plus couramment utilisés sont basés sur une distribution symétrique des vecteurs de commutation de base car ils génèrent moins de distorsion harmonique. Un schéma de commutation peut être considéré où chaque période de MLI commence et se termine par des vecteurs nuls et la quantité de \vec{v}_0 insérée est la même que celle de \vec{v}_7 . Dans ce cas, il y aura deux vecteurs zéro par T_s de sorte que l'intervalle zéro est divisé en deux moitiés égales de longueur $T_0/2$. Ces demi-intervalles sont placés au début et à la fin de chaque intervalle d'échantillonnage. Si la moitié au début est réalisée sous la forme de \vec{v}_0 , celle à la fin est réalisée sous la forme de \vec{v}_7 , et vice versa. Selon cela, la séquence des vecteurs de tension SVM et les plans de synchronisation peuvent être définis, comme indiqué dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Séquence des vecteurs de tension SVM et plan de chronométrage.

Secteur	Séquence de vecteur de tension	Voltage Vector Timing
1	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_7 \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0/2$
2	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_3 \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_7 \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_3 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0/2$
3	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_3 \rightarrow \vec{v}_4 \rightarrow \vec{v}_7 \rightarrow \vec{v}_4 \rightarrow \vec{v}_3 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0/2$
4	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_5 \rightarrow \vec{v}_4 \rightarrow \vec{v}_7 \rightarrow \vec{v}_4 \rightarrow \vec{v}_5 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0/2$
5	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_5 \rightarrow \vec{v}_6 \rightarrow \vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_6 \rightarrow \vec{v}_5 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0/2$
6	$\vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}_6 \rightarrow \vec{v}_0 \rightarrow \vec{v}_6 \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}_0$	$T_0/2 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_0/2$

La construction de ce motif de pulse symétrique est réalisée sur deux intervalles consécutifs T_s , la fréquence de commutation du porteuse MLI étant définie comme $f_c = f_s/2$. Enfin, il convient de noter que durant l'intervalle d'échantillonnage, le vecteur de référence souhaité est approximé dans un sens moyen. Cependant, instantanément, les vecteurs réels produits par l'onduleur sont différents du vecteur de référence, ce qui signifie que des harmoniques de courant sont toujours présentes.

IV.3. Résultats de simulation obtenus

Pour évaluer la performance des deux stratégies de commande proposées, une étude de simulation est d'abord réalisée en utilisant un modèle de simulation du système GADA en cours d'analyse, puis des tests expérimentaux sont effectués afin de fournir une analyse comparative des résultats de simulation et expérimentaux. Elle est complétée sans courant de stator et avec un capteur de vitesse de rotor afin que le GADA autonome soit contrôlé de manière optimale. Le commande de l'amplitude de tension de stator et de la fréquence du GADA autonome, qui a été discuté précédemment, a été implémenté en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. En tant que signaux de rétroaction des capteurs, le système de commande nécessite les trois courants de phase du rotor et les trois tensions de phase du stator, ainsi que la tension du bus DC afin de générer correctement les six signaux de commande des portes pour chaque IGBT de l'onduleur. De plus, le logiciel Control Desk est utilisé pour la gestion en temps réel et la visualisation graphique des données du processus.

Pour montrer la performance des méthodes de commande proposées, le comportement du système contrôlé est évalué durant les conditions de fonctionnement suivantes :

- a) Variation de l'amplitude de tension de l'enroulement statorique.
- b) Changement de charge.
- c) Variation de la vitesse de rotation.

La performance en régime permanent du GADA autonome avec les deux stratégies de commande proposées est ici présentée. Plusieurs tests, effectués dans différentes conditions de fonctionnement, sont présentés et discutés. Les résultats de simulation et expérimentaux sont tracés côte à côte afin de mieux évaluer l'accord entre eux.

IV.3.1. DRFVC

Dans cette section, le résultat du test DRFVC pour le GADA autonome est donné. La valeur des gains proportionnels et intégral des régulateur PI de commande de l'amplitude de tension du stator et de fréquence utilisés dans l'étude de simulation, les paramètres des deux régulateur PI des stratégies DRFVC proposées sont donnés en Annexe dans le Tableau 4. De

plus, la période d'échantillonnage est fixée à $T_s = 10 \mu s$ pour la simulation. Pour tous les tests suivants, la référence de la fréquence de tension du stator est fixée à 50 Hz comme valeur souhaitée pour les équipements de charge qui sont principalement connectés au stator.

IV.3.1.1. Variation de l'amplitude de la tension du stator

L'efficacité de la stratégie DRFVC proposée pour le GADA autonome, en termes de réponse dynamique sous variation de l'amplitude de la tension statorique, est étudiée. Les Fig. IV.4 et Fig. IV.5 montrent la transition de la tension statorique de 150 V à 250 V à $t=1s$ et vice versa à $t=3s$, avec une charge constante et une vitesse de rotor appliquée au générateur.

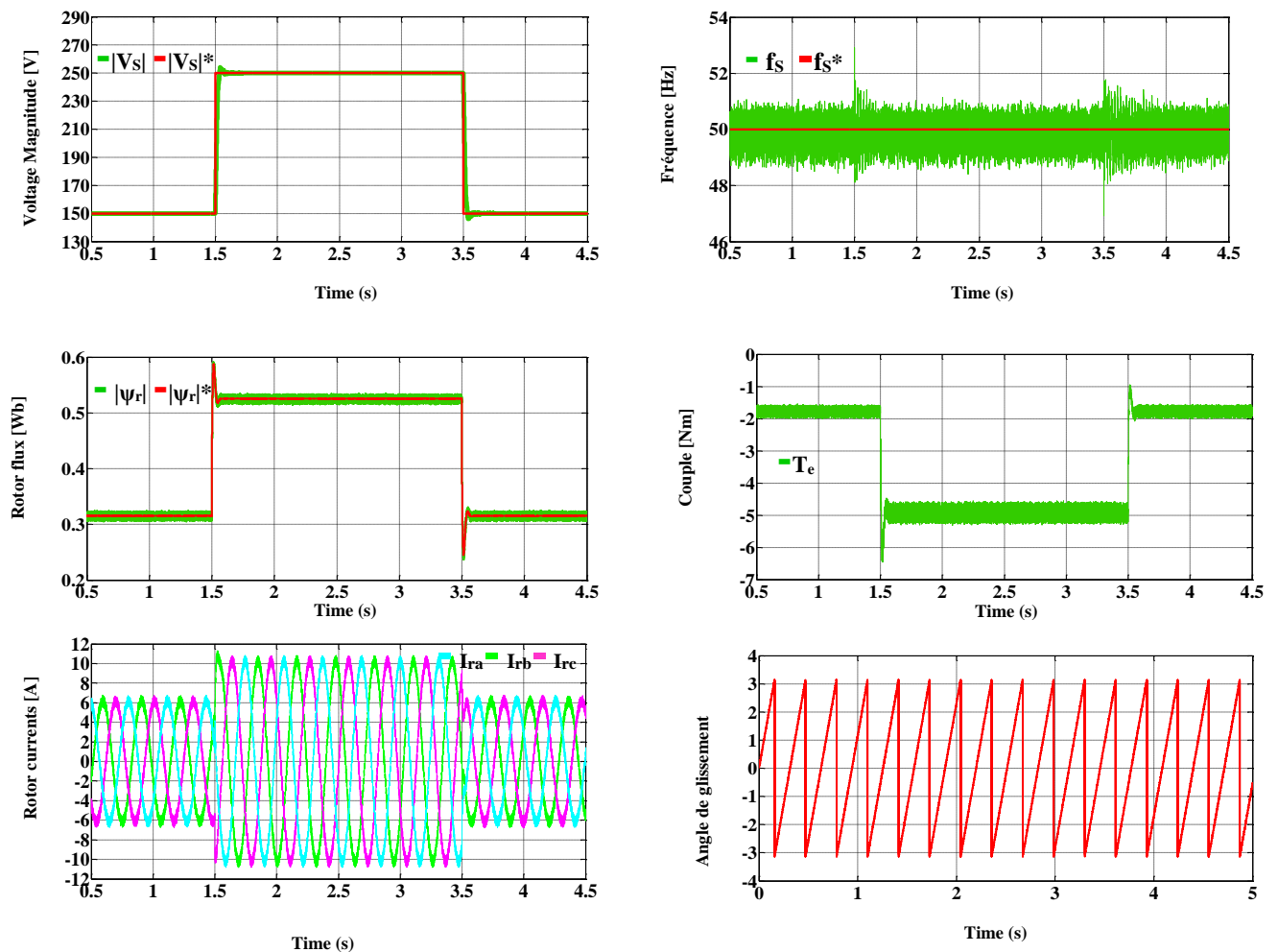


Figure IV.4: Test de changement de référence de tension avec le GADA autonome fonctionnant à charge fixe. De haut en bas : amplitude de la tension du stator, fréquence du stator, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant du rotor. (Gauche) Résultats de simulation. (Droit) Test expérimental.

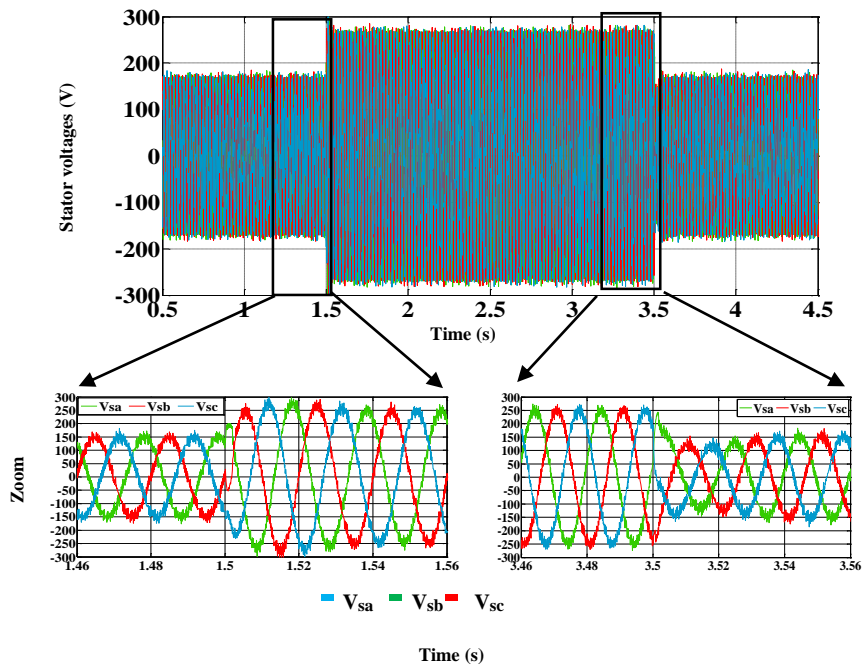


Figure IV.5 : Fonctions de tension du stator triphasé lors d'un changement de magnitude de tension. De haut en bas : magnitude de la tension du stator, fréquence du stator et forme d'onde de la tension du stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.

On peut constater que la tension du stator et la fréquence suivent leur valeur de référence avec précision sans dépassement significatif. De plus, le temps de montée de la tension du stator pour les stratégies de commande proposées est d'environ 0,2 s, ce qui permet une réponse dynamique rapide. Il convient de noter que le temps de réponse de la tension du stator et de la fréquence peut être amélioré de manière arbitraire en ajustant les gains des régulateur PI. Il est également possible d'observer que le flux du rotor et la tension du stator ont des profils similaires, ce qui est attendu puisque ceux-ci sont liés de manière linéaire lorsque la fréquence du stator est maintenue constante à la valeur désirée.

Pendant la période de variation progressive, le couple développé par le générateur est le couple nominal, après avoir atteint la tension et la fréquence de stator souhaitées ; il développe un couple de 6 N.m pour satisfaire le couple de charge requis. Dans les tests expérimentaux, lors de l'exploitation à une magnitude de tension de stator égale à 200V, le couple estimé présente une oscillation de 2 N.m, introduite par le convertisseur DC/DC abaisseur qui commande le moteur à courant continu (moteur principal). De plus, le courant du rotor montre également un comportement attendu puisqu'il change en fonction des conditions de fonctionnement du système GADA. Cela se produit parce que la magnitude du flux du rotor est calculée et mise à jour en temps réel par le régulateur PI et dépend de la

variation de la magnitude de la tension de stator, ainsi que de la magnitude du courant du rotor.

La Fig. 3.9 montre une version agrandie des formes d'onde des tensions de stator triphasées obtenues lors de ce test. On peut voir que les trois phases présentent des formes d'onde sinusoïdales équilibrées et ont une réponse rapide aux valeurs de référence de l'amplitude de tension et de fréquence. Ce test illustre l'efficacité de la méthode proposée pour commander l'amplitude de tension de stator et la fréquence avec précision et indépendamment.

IV.3.1.2. Variation de Charge

Pour évaluer davantage la performance des stratégies DRFVC proposées, un test de variation de charge a été réalisé. Dans ce test, le GADA est changé en mode de commande de couple en définissant une valeur constante de tension statorique et en réglant manuellement la valeur de la charge, tandis que le moteur principal contrôlé (moteur DC) agit pour maintenir la vitesse du rotor à 1400 tr/min. Un changement d'étape de la charge, passant de 15 % à 40 % (de la valeur nominale de 4 kW) en 1 seconde, est imposé au GADA alors qu'il fonctionne à 1400 tr/min et produit 200V de tension statorique. Ensuite, la charge est réduite de -25 % (de la valeur nominale de 4 kW) en 3 secondes. Les résultats obtenus pour le test de changement de charge sont montrés dans la Fig.IV.6 et la Fig. IV.7. Fig.IV.6. De haut en bas, les courbes représentent la référence et la magnitude de la tension statorique estimée, la fréquence, le flux du rotor, le couple estimé, l'angle de glissement et les courants du rotor mesurés.

Comme on peut le constater, l'amplitude de tension estimée et la fréquence suivent très bien leurs valeurs de référence avec un léger dépassement et une légère sous-performance, démontrant ainsi la haute performance du régulateur développé pour le système GADA. De plus, le flux du rotor suit sa valeur de référence, on peut remarquer que le flux du rotor est à peu près constant durant ce test en raison de la valeur fixe de la tension et de la fréquence du stator dans ce test, ce qui signifie que les stratégies de commande régulent très bien la tension et la fréquence du stator. En outre, les profils du couple estimé et de la valeur de charge sont identiques, ce qui est un comportement attendu. On peut voir que le contenu de la variation de couple diminue avec l'augmentation du couple de charge. De plus, durant ce test, il est possible d'observer un changement du courant du rotor, qui est dû au changement de valeur du couple.

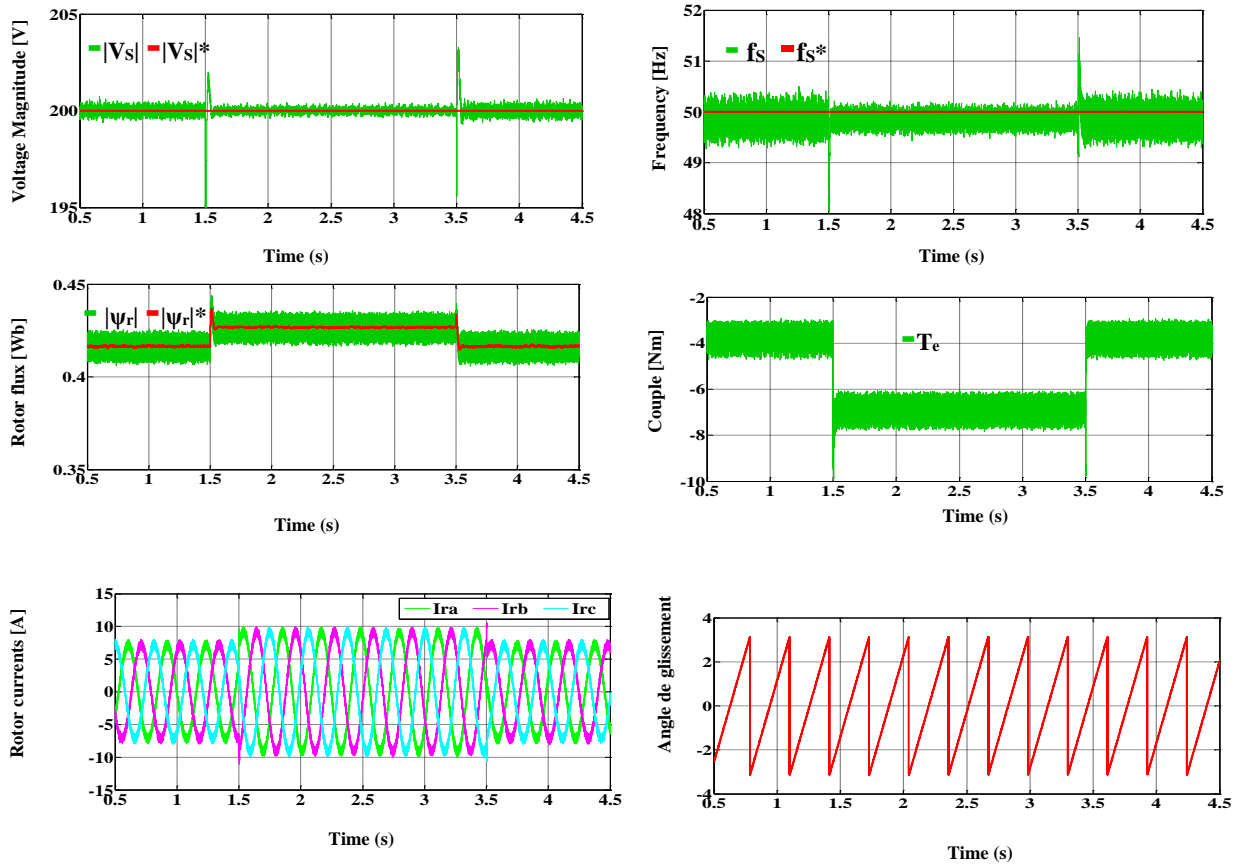


Figure IV.6 : Tester le changement de charge avec le GADA autonome fonctionnant à une référence de tension fixe. De haut en bas : amplitude de la tension statorique, fréquence statorique, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant du rotor. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.

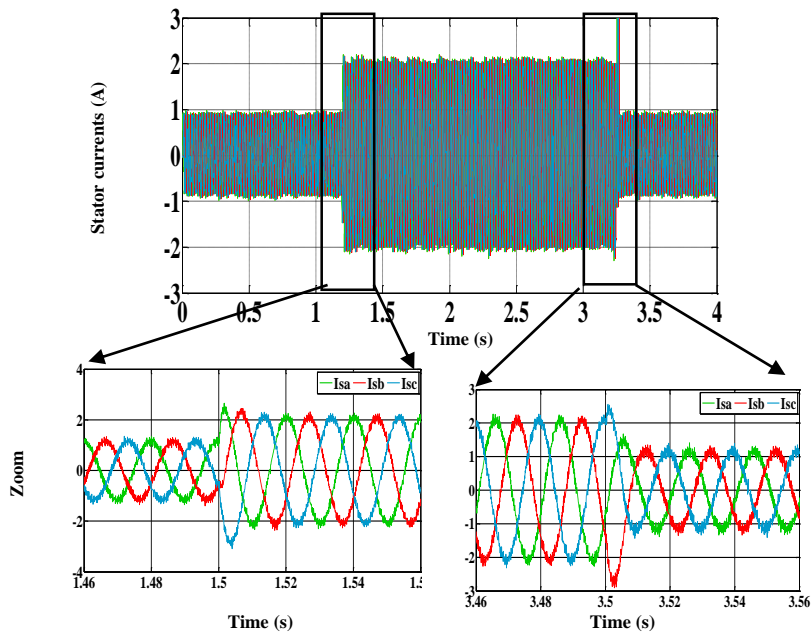


Figure IV.7 : Courants de stator triphasés - formes d'onde lors du changement de charge. De haut en bas : Amplitude de la tension de stator, fréquence de stator, forme d'onde de la tension de stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.

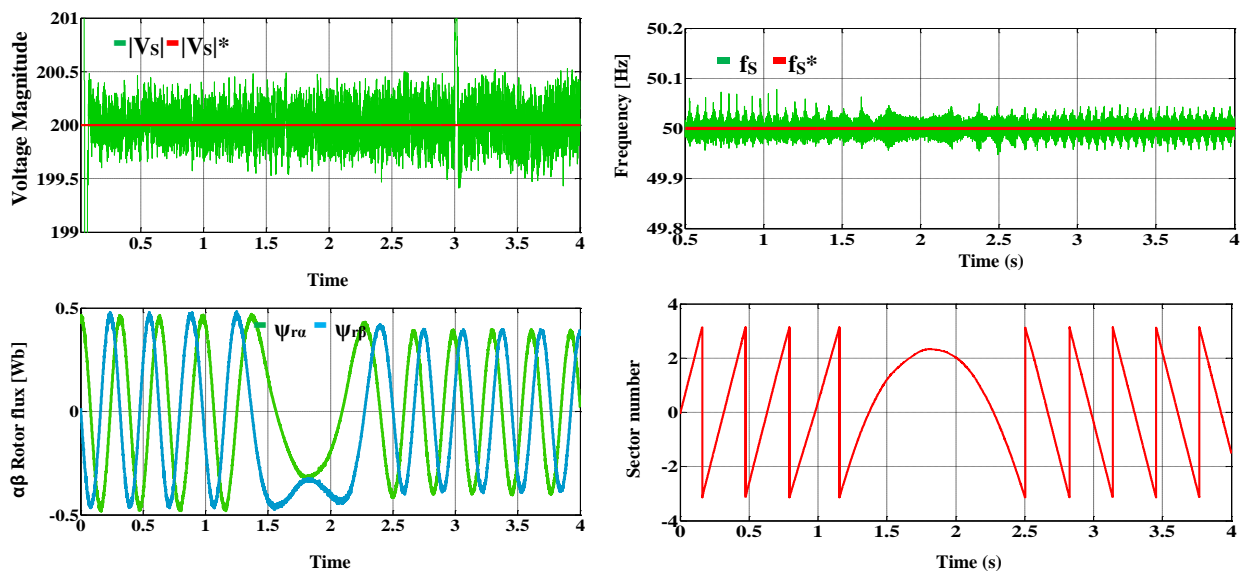
Les résultats présentés dans la Fig.IV.6 sont également soutenus par les résultats montrés dans la Fig.IV.7, qui sont une version zoomée du courant du rotor obtenu lors de ce test. Selon ces résultats, la variation de l'amplitude du courant du rotor est due à la variation de la charge, le courant du rotor étant observé comme étant sinusoïdal, ce qui peut être considéré comme d'une très bonne qualité.

Les résultats de ce test prouvent que les stratégies DRFVC sont capables de suivre la tension et la fréquence de référence désirées avec un débordement et un sous-débattement acceptables sur une large échelle de variation de charge.

IV.3.1.3. Variation de la vitesse du rotor autour de la vitesse synchrone

Pour observer la performance du GADA contrôlé par le régulateur proposé basé sur le DRFVC sur toute la plage de vitesses, un test de retournement de vitesse de glissement ω_r est effectué. Ce test a été réalisé avec le GADA fonctionnant initialement à 1400 tr/min à vitesse subsynchrone avec une tension de stator fixe et une charge, puis en imposant une vitesse de référence en rampe atteignant une vitesse suprasynchrone égale à 1600 tr/min à $t = 3s$.

Les résultats obtenus sont présentés à la Fig. IV.8. On peut voir que le générateur GADA fonctionne bien dans toute la plage de vitesses. Pendant la période transitoire (0,5→3s), la tension et la fréquence du stator sont maintenues à leur valeur désirée (200V-50Hz). À $t = 2s$, lors du passage à la vitesse synchrone, la direction de la rotation du flux du rotor est inversée, ce qui entraîne un changement de la polarité des courants du rotor, entraînant un décalage de phase de 180° . De plus, il est possible d'observer que le numéro de secteur, qui représente la position du flux du rotor à chaque instant, augmente en mode de fonctionnement sub-synchrone, tandis qu'il change pour descendre en mode de fonctionnement super-synchrone. Cela signifie que la direction du vecteur de flux du rotor est inversée lorsque la vitesse du rotor dépasse la vitesse synchrone.



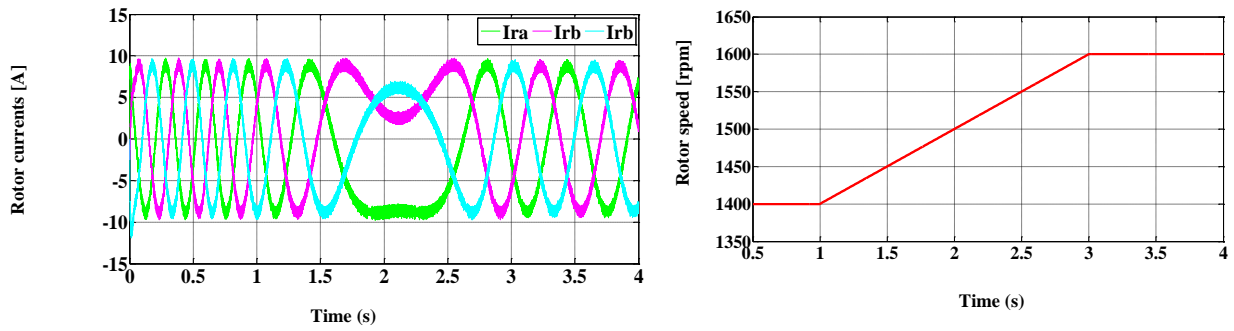


Figure IV.8 : Test de changement de vitesse du rotor avec le GADA autonome fonctionnant à une référence de tension fixe. De haut en bas : amplitude de la tension statorique, fréquence statorique, flux du rotor, couple électromagnétique, angle de glissement et forme d'onde du courant rotorique. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.

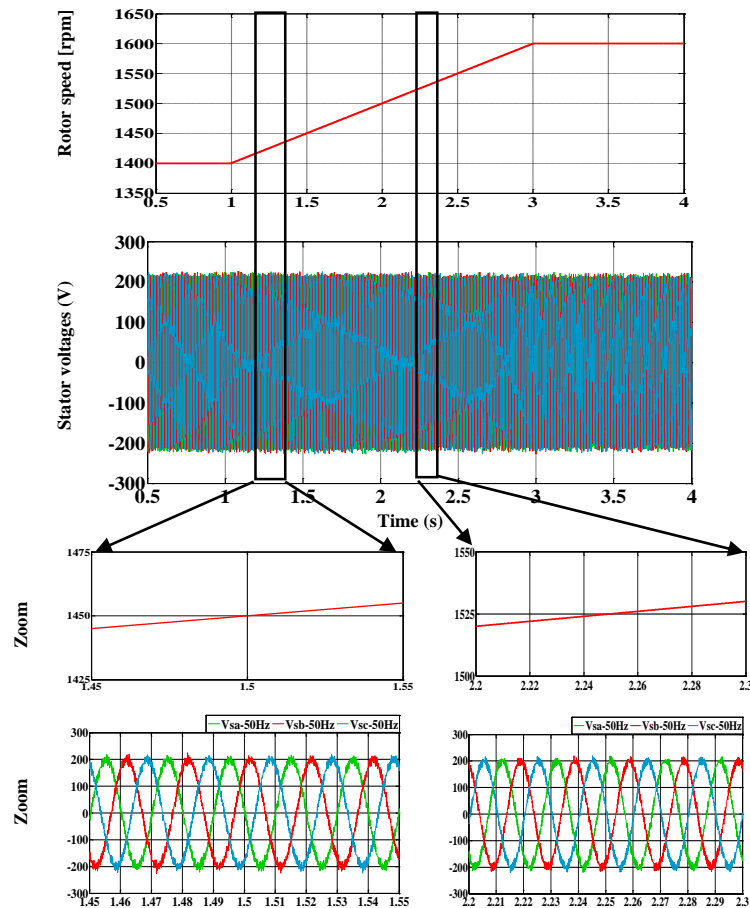


Figure IV.9: Fonctions de tension du stator triphasé lors du changement de vitesse du rotor. De haut en bas : Amplitude de la tension du stator, fréquence du stator, flux du rotor, forme d'onde du courant du stator. (Gauche) Résultats de simulation. (Droite) Test expérimental.

De plus, les résultats obtenus dans la Fig.IV.9 indiquent que les formes d'onde de tension du stator ont la même valeur contrôlée de magnitude et de fréquence (200V-50Hz) à des vitesses de rotor différentes de 1480 et 1550 tr/min. En même temps, elles sont équilibrées et exemptes de fréquences harmoniques, ce qui est un résultat attendu puisque le commande de la magnitude et de la fréquence de la tension du stator est l'objectif principal de l'approche de commande proposée. Ainsi, ces résultats de test démontrent la capacité du régulateur proposé à faire fonctionner le GADA avec une tension et une fréquence constantes du stator autour de la vitesse synchrone, tout en assurant la stabilité du générateur sur toute la plage de vitesses.

Enfin, en se basant sur ces résultats, on peut observer un très bon accord entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux. Dans toutes les conditions de fonctionnement, le flux du rotor du générateur suit de près sa référence désirée avec une ondulation acceptable.

Puisque la méthode proposée ne nécessite pas de capteur de vitesse de rotor, sa réponse n'est pas affectée par les erreurs/bruits de ce capteur. Pour examiner l'effet des erreurs du capteur, une erreur de -5 % est ajoutée au capteur de vitesse de la méthode bien connue basée sur la FOC, et les résultats sont présentés dans la Fig. IV.10. Comme on peut le voir dans cette figure, la fréquence de la tension statorique présente une erreur d'état stationnaire de -5 %, équivalente à l'erreur du capteur de vitesse. Cela est dû au fait que le commande de fréquence dans les méthodes basées sur la FOC n'est pas en boucle fermée et que les erreurs du capteur de vitesse affectent directement le régulateur de fréquence.

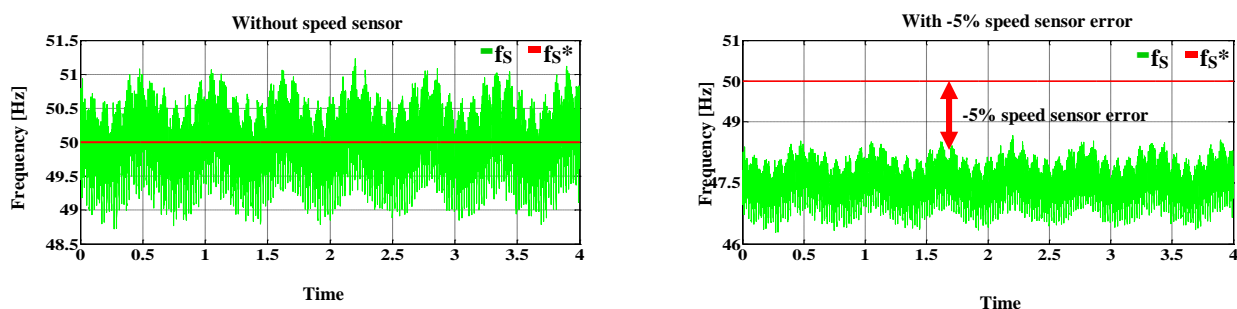


Figure IV.10: Fréquence de la tension du stator dans la méthode basée sur la FOC présentée dans sans erreur de capteur et avec une erreur de capteur de -5%.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre a incorporé l'explication des éléments subtils de la méthodologie traditionnelle DRFVC. Cette méthodologie de commande direct présente de nombreux avantages par rapport à la régulation basée sur le terrain, qui est également examinée dans cette partie et qui a quelques inconvénients tels que la génération de variations de couple et de flux et la fréquence de commutation variable. Les variations de couple et de flux sont dues au régulateur d'hystérésis, qui peut encore être réduit de manière significative en diminuant le temps d'échantillonnage. La fréquence de commutation variable est due à la variation du vecteur de flux du rotor. Cette méthode commande l'amplitude et la fréquence de la tension statorique en contrôlant respectivement la magnitude et l'angle du flux du rotor. Étant donné que la méthode proposée a été complètement réalisée dans le référentiel du rotor, ni capteur de position/vitesse du rotor ni transformation de référentiel n'est requis. La méthode proposée utilisait la même stratégie de commutation pour les modes de fonctionnement à vitesse sub et super synchrones, ce qui était une autre caractéristique exceptionnelle de la conception de ce régulateur.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, une commande de GADA autonome pour des systèmes autonomes basé sur le commande de la tension et de la fréquence du stator a été développé, analysé, conçu et mis en œuvre. Les résultats de simulation et expérimentaux montrent qu'une commande efficace du GADA autonome a été réalisé pour les modes de génération. Cette étude fournit une solution de commande haute performance pour un GADA autonome dans les applications à tension et fréquence fixes, contrairement au schéma de commande orienté flux statorique largement appliqué, qui est sensible à la variation des paramètres de la machine et nécessite un signal de capteur de vitesse précis pour l'orientation du flux et le découplage. En considérant cela, le schéma de commande direct humide est plus fiable et attractif sans impliquer de nombreux paramètres de machine et sans nécessiter de signal de capteur de vitesse pour le commande du couple et du flux du rotor.

En résumé, les contributions faites dans cette thèse sont :

- Revue et enquête sur les méthodes de commande classiques pour le FOC basé sur le GADA autonome.
- Amélioration des schémas de commande du courant de rotor basés sur la commande indirecte de l'amplitude et de la fréquence de la tension du stator (Approche-1), via FS-PCC pour le GADA autonome.
- Développer de nouvelles méthodes de commande sans capteur pour le GADA autonome basées sur la commande directe de l'amplitude et de la fréquence de la tension du stator (Approche-2), via DRFVC pour le GADA autonome.
- Simulation et vérification expérimentale de deux approches de commande proposées pour le CCR.

Dans cette thèse, une modélisation satisfaisante et des résultats expérimentaux indiquent la faisabilité du schéma de commande proposé pour le CCR. Le schéma de commande approche-1 proposé a une structure simple avec un seul régulateur PI, et élimine avec succès la boucle de courant PI et le modulateur MLI. Le régulateur offre de bonnes performances de commande de la tension et de la fréquence du stator. Le schéma de commande approche-2 du CCR utilise une structure de commande sans capteur et est mis en œuvre pour commande adéquatement l'amplitude de la tension et la fréquence. En contrôlant le vecteur de flux du rotor du GADA, le capteur de tension continue du bus est utilisé pour bien générer le vecteur de tension du rotor. Le tableau a.1 liste une comparaison générale des schémas de commande

pour le CCR discutés dans cette thèse en termes de capacité de commande, de structure, etc. Les parties ombragées indiquent les inconvénients des schémas.

Tableau 1 : Comparaison des différentes stratégies de commande pour le CCR.

	DRFVC	PI-MLI
Capteurs de tension statorique	requis	requis
Capteurs de courant du stator	pas requis	requis
Capteurs de courant de rotor	requis	requis
Capteur de tension de bus DC	requis	pas requis
Capteur de vitesse de rotor	pas requis	pas requis
Régulateur de courants de rotor PI	pas requis	pas requis
Modulateurs MLI ou SVM	requis	pas requis
Paramètres GADA impliqués	R_r	R_r, R_s, L_s, L_m, L_r
Algorithme d'orientation de flux	pas requis	requis
Estimation de flux	requis	pas requis
Commande de couple	indirectement	indirectement
Commande de flux	directement	indirectement
Fréquence de commutation	constant	constant
Complexité d'implémentation	le plus simple	Moyenne

On peut conclure que les schémas DRFVC peuvent commander efficacement le GADA autonome pour des applications avec une tension et une fréquence de stator fixes. En tenant compte de la dépendance des paramètres, de la complexité de la structure et du coût, il est clair que l'approche 2 est supérieure à la FOC.

Cette thèse couvre des sujets importants concernant les systèmes GADA autonomes. Néanmoins, il existe d'autres aspects qui peuvent être recommandés pour des recherches futures, listés comme suit :

- Utilisation d'autres topologies de convertisseur CCR comme le convertisseur à trois niveaux, le convertisseur matriciel...
- Utilisation d'un autre type de générateur à double alimentation tel que le GADA sans balais, le GADA à rotor à six phases, le GADA à double stator.
- Amélioration du DRFVC pour éliminer les oscillations de couple et de flux de rotor en utilisant DRFVC -SVM.
- Étude du DRFVC avec une fréquence de commutation constante par modification de l'algorithme de commande.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arezki Chibah Et Madjid Meziani, «Commande Directe Du Couple (Dtc) D'un Moteur Asynchrone A Double Alimentation.,» Université De Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, Algria, 2013.
- [2] A.Marie ARCKER «Commande direct du Couple électromagnétique de Machines Asynchrones de grande puissance » Thèse de doctorat, INP Toulouse.1999.
- [3] R. RIYADH, « Commande des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse doctorat, Université de Batna, 2016.
- [4] AKKARI Nadia, « contribution à „amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [5] Meriem ABDELLATIF, «Continuité de service des entraînements électriques pour une machine asynchrone alimentée par le stator et le rotor en présence de défauts capteurs», thèse Doctorat spécialité Génie Électrique, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, année 2010.
- [6] H. Reghioui, « Amélioration Des Performances De La Commande Directe De Couple (DTC) Appliquée à Une machine Asynchrone Triphasée », Mémoire de magister, Département génie électrique, Université de Biskra, Decembre 2016.
- [7] R. SADAoui, « Analyse et Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire présenté à l'Université du Québec à trois-rivières, Canada, 2017.
- [8] D. Youcef, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle.» , Thèse de doctorat en Electrotechnique, université djillali liabes de SIDI-BEL-ABBES ,Algérie, 2015.
- [9] K. Azzouz, S. Chemouri. "Contribution à l'étude du comportement de la machine asynchrone à double alimentation « MADA » commandée par un onduleur de tension MLI", Mémoire d'ingénieur de l'université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2004/2005.
- [10] H.Ziane, « Commande vectoriel des machines asynchrones à aimant permanents avec compensation de temps mort de l'onduleur, commande sans capteur mécanique », Thèse de magistère, Bejaia, 2001.

- [11] Z. Marcin, "Space Vector Modulated-Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter Fed Induction Motor," Institute of Electrical Engineering, Warsaw University., Warsaw, Poland, 2005.
- [12] A. Dendouga, « Commande des puissances actives et réactive de la machine asynchrone a double alimentation (DFIM) », Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [13] M. Dybkowski, T. Orłowska-Kowalska, Performance of the Speed Sensorless Induction Motor Drive for Traction Application with MRAS Type Speed and Flux 123 Estimator, Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM. (2012) 477–481.
- [14] Akter, Md. Parvez, Saad Mekhilef, Nadia Mei Lin Tan and Hirofumi Akagi. “Model predictive control of bidirectional AC-DC converter for the energy storage system.” Journal of Electrical Engineering Technology 10 (2015): 165-175.
- [15] C. Carlos. "Modélisation Commande vectoriel et DTC, Commande des Moteurs Asynchrones", Edition 1, Hermes Science Europe, 2000.
- [16] Y.Massinissa, B.Zidane « Commande direct du couple de la machine synchrone double étoile alimentée par deux types d’onduleurs» PFE, ENP Alger. 2007.
- [17] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum, « Artificial neural network based direct torque control of doubly fed induction generator », Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.14, No.2, pp.71-79, June 2014.
- [18] S. Arezki , « Contribution au commande direct du couple(DTC) d’une machine Asynchrone à cage Alimentée par un onduleur multiniveaux », Mémoire de magister, Département génie électrique, Université de Boumerdès, 2009.
- [19] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie eolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [20] Bekakra.Y, "Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation MADA par différentes techniques avancées," Mémoire de Magister Universitaire d’El-Oued, 2010.
- [21] KERRACHE Abdelaziz, KORICHI Ahmed, Commande DTC-SVM Prédictive D’un Moteur Asynchrone A Cage Sans Capteur Mécanique, mémoire de Magister de l’université de kasdi merbah ourgla, Algérie, 2013.

- [22] AMOUCHAS Nabil, BOUTALEB Amine, « commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée par régulateur PI», Mémoire de master, Université M'Hamed Bougera, Boumerdes, Algérie, 2015/2016 .
- [23] L. Benalia, « Commande En Tension Des Moteurs A Induction Double Aliments,» These De Doctorat En Science En Electrotechnique, Universite De Batna, , Algerie, 2010.
- [24] A. Kerrache & A.Korichi «Commande DTC-SVM Prédictive D'un Moteur asynchrone A Cage Sans Capteur Mécanique», Mémoire de Master en génie électrique, Université de Ouargla, juin 2013..
- [25] Y. Djeriri et Z. Boudjema, « Commande robuste par la logique floue et les réseaux de neurones artificiels de la GADA : étude comparative », Revue des Energies Renouvelables, 2017.
- [26] Wang Jialong; Hyun Seung Ho, "ANN based pitch angle controller for variable speed variable pitch wind turbine generation system," In Strategic Technology (IFOST), 2011 6th International Forum on , vol. 1, pp. 443-447, 22-24 Aug. 2011.
- [27] Said Azzouz, « Amelioration De La Commande D'un Systeme Eolien A Base D'une Machine Mada Utilisant Les Techniques Intelligentes,» These Doctorat Universite Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2019.
- [28] "Y. DJERIRI, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle" Thèse de Doctorat en Electro technique, Universite DjillaliLiabes de Sidi-Bel-Abbes, le 05 /11/2015 "
- [29] R. Toufouti , « Commande directe Du Couple De La Machine Asynchrone», Mémoire de Magister en electrotechnique, Université de Constantine, 2003.
- [30] K. Jash, P. K. Saha and G. K. Panda, "Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based On Sinusoidal Pulse Width Modulated Inverter With Proportional Integral Controller.," Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, no. 5, pp. 913-917, 2013..
- [31] R. Riyadh, «Controle Des Puissances Generees Par Un Systeme Eolien A Vitesse Variable Base Sur Une Machine Asynchrone Double Alimentee,» These Doctorat L'Universi T Ebatna 2, 2016.
- [32] M. Dybkowski, K. Szabat, Direct Torque Control of Induction Motor Drive System with Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Compensator, in: IEEE Int. Conf. Ind. Technol., 2015: pp. 714–719.

- [33] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, A. Tani, "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, Issue: 5, Sept. 2002, pp.779-787.
- [34] SADOUNI Radhwane, Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à Deux Onduleurs Multiniveaux en Cascade avec un Redresseur à MLI Piloté par DPC, Thèse de Doctorat de l'université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 2017.

Annexe

Annexe

Commande de GADA

Tableau 1. Principaux paramètres de GADA

Paramètres	valeur	unité
Puissance nominale	3	kW
Tension du stator	325.26	V
Fréquence du stator	50	Hz
Nombre de paires de pôles	2	
Vitesse nominale	1450	rpm
Résistance du stator	1.6000	Ω
Résistance du rotor	2.6200	Ω
Inductance du stator	0.1950	H
Inductance de rotor	0.1950	H
Inductance mutuelle	0.1770	H

Tableau 2. Paramètres du régulateur PI pour HCC.

K_p	K_i
0.07	1.4

Tableau 3. Paramètres du régulateur PI pour FS-PCC.

K_p	K_i
0.07	3.4

Tableau 4. Paramètres du régulateur PI pour la DRFVC.

	k_p	k_i
Régulateur de tension	0.2	3
Régulateur de fréquence	2	120