RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE POPULAIRE D'ALGÉRIE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET SCIENTIFIQUE

RECHERCHE

UNIVERSITÉ YAHIA FARES MEDEA



Faculté de Technologie

Département de génie électrique

Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energie Renouvelable en Électrotechnique

Thème :

Etude et simulation d'une éolienne MADA avec un convertisseur BACK TO BACK connecté au réseau électrique

Presentées par:

- BELARBI Kaouther
- AZIRA Intissar

Proposer et Diriger par :

- Dr. MORSLI Abdelkader
- Mr. HADJ MIHOUB SIDI MOUSSA Fayçal

Promotion 2023-2024

Remerciements

Tous d'abord, nous remercions ALLAH notre créateur de nous avoir donné la force volonté et courage pour accomplir cet humble travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon séjour d'études et qui m'ont aidé lors de la rédaction de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Dr. Morsli, notre estimé professeur, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils avisés qui ont contribué à stimuler ma réflexion.

J'ai toujours voulu exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, M. HaDj mihoube Sidi Moussa Faisal, pour ses conseils et sa patience continus et merveilleux tout au long du long travail de cette thèse. Ces commentaires et suggestions enrichiront grandement ce travail.

C'est un grand plaisir pour nos amis et nos familles qui ont contribué à notre bonheur et à notre confort tout au long de notre parcours académique.

Finalement, j'ai commencé à apprécier toutes les personnes qui, par la suite ou chez elles, ont contribué à créer ce souvenir.

Kaouther & intissar

ملخص: التكنولوجيا المطورة في هذا الموضوع هي توربين رياح بسرعة متغيرة ،يعتمد على آلة غير متزامنة ذات

تغذية مزدوجة مجهزة بمحولي تيار متردد/تيار مستمر وتيار مستمر/تيار متردد من نوع ظهر-لظهر.يعمل هذا المحول العكسي كواجهة بين الدوار والجزء الأساسي من المحول ،في حين أن اللفات الثابتة متصلة مباشرة بالمحول .يتم التحكم في كلا المحولين بشكل مستقل عن بعضهما البعض ترتبط تكوينات هذا التوربين الريحي ذو السرعة المتغيرة بالشبكة .تم تصميم أوامر التحكم لتثبيت النظام ،وتصحيح التوافقيات ،وتقليل الفاقد. تتميز هذه التكنولوجيا بالعديد من المزايا مثل تحسين الإنتاج بفضل نطاق واسع من تغير سرعة الدوران ،وفصل الشبكة عن المولد ،وتحسين إنتاج الطاقة ،وتقديم مرونة كبيرة للتكيف مع الظروف الفنية للربط ، وإدارة الطاقة التفاعلية بفضل واجهتها الإلكترونية القوية.

الهدف هو محاكاة هذه الطوبولوجيا باستخدام برنامج (MATLAB/Simulink)، مما يسمح للمحول باستخراج حوالي

30 % من قدرة آلة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة.

الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح , الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية ,الطاقات المتجددة

Résumé : La technologie développée dans ce sujet est une éolienne à vitesse variable, basée sur la machine asynchrone à double alimentation équipée de deux convertisseurs (AC/DC et DC/AC) de type dos-à-dos. Ce convertisseur en opposition est l'interface entre le rotor et le primaire du transformateur, cependant les enroulements statoriques sont directement connectés à un transformateur. Les deux convertisseurs AC/DC et DC/AC sont commandés indépendamment l'un de l'autre. Un condensateur est placé entre les deux convertisseurs pour stabiliser la tension continue ,la configuration de cette turbine éolienne à vitesse variable est connectée au réseau. Les commandes sont conçues pour stabiliser le système, corriger les harmoniques et minimiser les pertes. Cette technologie présente de nombreux avantages comme l'optimisation de la production grâce à une grande plage de la variation de la vitesse de rotation, le découplage entre le réseau et la génératrice, d'avoir une meilleure optimisation de la production d'énergie et offre une grande souplesse d'adaptation aux conditions techniques de raccordement et la gestion de la réactive grâce à son interface d'électronique de puissance.

L'objectif visé est de simuler sur le logiciel MATLAB/Simulink cette topologie, qui permet au convertisseur d'extraire environ 30% de la puissance de MADA.

Mots clés : éolienne , MADA(machine asynchrone a double alimentation),énergie renouvelable

Abstract:

The technology developed in this topic is a variable-speed wind turbine, based on the doubly-fed induction generator equipped with two back-to-back converters (AC/DC and DC/AC). The back-to-back converter serves as the interface between the rotor and the primary side of the transformer, while the stator wingdings are directly connected to a transformer. The two AC/DC and DC/AC converters are controlled independently of each other. A capacitor is placed between the two converters to stabilize the DC voltage. This variable-speed wind turbine configuration is connected to the grid, the control systems are designed to stabilize the system, correct harmonics, and minimize losses.

This technology offers numerous advantages, such as optimizing production through a wide range of rotational speed variation, decoupling between the grid and the generator, achieving better energy production optimization, and providing great flexibility in adapting to technical connection conditions and reactive power management thanks to its power electronics interface.

The goal is to simulate this topology in MATLAB/Simulink software, which allows the converter to extract approximately 30% of the DFIM's power.

key words : wind turbine, DFIM(double-fed asynchronous machine), renewable energy

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre 1 Généralités sur l'éolien .....

1.1 Introduction 3

1.2 Définition 3

1.3 Principe de fonctionnement 3

1.4 Historique 4

1.5 Energie éolienne dans le monde 4

1.6 Energie éolienne dans le L'Algérie 5

1.7 Les type de l'éolienne 6

1.7.1 Les éoliennes à l'axe vertical 6

1.7.2 Les éoliennes de l'axe horizontal 6

1.8 Avantages de l'énergie éolienne 7

1.9 Les inconvenient 7

1.10 Les topologies et développements des générateurs des turbines éoliennes 8

1.10.1 les dofférentes topologie des générateures 8

1.10.2 Développement des générateurs pour les turbines éoliennes 9

1.11 Comparaison entre les génératrices 9

1.11.1 Génératrices asynchrones (ou à induction) 9

1.11.2 Génératrices synchrones à aimants permanents 9

1.11.3 Génératrices synchrones à induction double alimentation (DFIM) 10

1.11.4 Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (DFIM) 10

1.12 Conclusion 10

Chapitre 2 Modélisation et controle de l'éolienne MADA .....

2.1 Introduction 11

2.2 Commande de la turbine 11

2.3 Description de la machine asynchrone 11

2.4 description d'une éolienne à base de MADA 12

2.5 Modèle mathématique et contrôle de MADA 13

2.5.1 Modéle électrique 13

2.5.2 Modéle dynamique 16

2.6 contrôle de MADA 20

2.7 Résultats de simulation de la vitesse du rotor de la MADA 22

2.8 Problématique d'intégration de l'éolien au réseau électrique 26

2.8.1 Normes internationeles et europèenes *27*
2.8.2 Les effets des défauts sur le réseau électrique *27*

2.9 Objectifs de l'étude ***28***

2.10 Conclusion ***28***

Chapitre 3 Convertisseur back to back connecté au reseaux

3.1 Introduction ***29***

3.2 Définition ***29***

3.3 Modélisation mathématique ***30***
3.3.1 Modélisation du convertisseaur coté réseux *30*
3.3.2 Modélisation du convertisseaur coté rotor *31*
3.3.3 Modélisation du Bus DC *32*
3.3.4 Modèle Global du convertisseur back to back *32*

3.4 Structure du convertisseurs back to back ***32***

3.5 Controle du convertisseur back to back ***33***
3.5.1 Controle du coté redresseur *33*
3.5.2 Controle du coté onduleur *34*

3.6 Applications ***36***
3.6.1 Interconnexion de réseaux électrique *36*
3.6.2 Systèmes de traction électrique *36*
3.6.3 Energies Renouvelable *36*

3.7 Avantages ***35***

3.8 Inconvénients ***36***

3.9 Applications Spécifiques et Cas pratique ***36***
3.9.1 Interconnexion de réseaux électrique *36*
3.9.2 Systémes de traction électrique *37*

3.10 Avantages Techniques ***37***

3.11 Défis et Solutions ***38***

3.12 Les résultats des simulations ***38***

3.13 fonctionnement sous tension de réseaux déséquilibre ***43***

3.14 Résultat de THD ***48***

3.15 Conclusion ***50***

Conclusion générale ***51***

Bibliographie ***53***

Listes des acronymes et abréviations

MADA : machine asynchrone a double alimentation .

DFIM : doubly fed asynchronous machine.

PWM : pulse with modulation .

$\boldsymbol{v_s}$ **:** Tension du stator fournie

$\boldsymbol{v'_r}$ **:** Tension du rotor fournie

$\boldsymbol{I_s}$ **:** Courant du stator

$\boldsymbol{I'_r}$ **:** Courant du rotor

$\boldsymbol{E_s}$ **:** FEM induite dans le stator

$\boldsymbol{E'_{rs}}$ **:** FEM induite dans le rotor

$\boldsymbol{R_s}$ **:** Résistance du stator (Ω)

$\boldsymbol{R'_r}$**:** Résistance du rotor (Ω)

$\boldsymbol{L_m}$ **:** Inductance mutuelle (H)

$\boldsymbol{L_{\sigma s}}$: Inductance de fuite de stator (H)

$\boldsymbol{L'_{\sigma s}}$: Inductance de fuite du rotor (H)

$\boldsymbol{N_s}$**,**$\boldsymbol{N_r}$ **:** Enroulements du stator, du rotor, nombre de spires par phase

RSC : Rotor Side Converter

$\boldsymbol{C_{dc}}$ est la capacité du bus DC

$\boldsymbol{I_{grid}}$ est le courant fourni par le convertisseur côté réseau,

$\boldsymbol{I_{load}}$ est le courant consommé par le convertisseur côté rotor.

$\boldsymbol{V_{r\alpha}}$, $\boldsymbol{V_{r\beta}}$ sont les tensions du rotor dans le référentiel α−β,

$\boldsymbol{i_{r\alpha}}$, $\boldsymbol{i_{r\beta}}$ sont les courants du rotor,

$\boldsymbol{R_r}$ est la résistance du rotor,

$\boldsymbol{L_r}$ est l'inductance du rotor,

$\boldsymbol{e_{r\alpha}}$, $\boldsymbol{e_{r\beta}}$ sont les forces électromotrices induites.

Liste des figures

Figure (01.01) Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique 4

Figure (01.02) :Capacité cumulée installée d'énergie éolienne, y compris les sources éoliennes terrestres et offshore, mesurée en gigawatts (GW). 5

Figure(01.03):carte du potentiel éolien en Algérie. 6

Figure(01.04) : éoliennes à axe vertical. 7

Figure(01.05) : éoliennes à axe horizontal. 7

Figure (02.01): Modèle MADA 14

Figure (02.02) : Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA .. 15

Figure (02.03) : Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA avec paramètre du rotor, courant et tension réduits au stator 16

Figure (02.04) : Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA référence au stator 17

Figure (02.05) : Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanente du MADA référencé au stator 18

Figure (02.06) : Différents référents pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA..... 20

Figure (02.07) : Modèle du MADA dans le référentiel dq 21

Figure (02.08): graphe de courant de rotor Ir (iabc r) (A) 22

Figure (02.09): graphe de courant de stator Is (A) 23

Figure (02.10): graphe de couple electromagnetic 23

Figure (02.11): graphe de tension Vd reference (V) 23

Figure(02.12): graphe de tension stator Vs (V) 24

Figure(02.13): graphe de courant de reference coté rotor Iqr (A) 24

Figure(02.14): graphe de vitesse de rotor et vitesse reference 24

Figure (02.15): graphe de tension Vq reference (V) 24

Figure (02.16): graphe de courant de reference coté rotor Idr (A) 25

Figure (03.01) : Configuration du système de l'éolienne basée sur MADA avec le convertisseur back to back
……..……..30

Figure (03.02): Structure Back to Back des convertisseurs de puissance…….....33

Figure (03.03): graphe de tension de bus cc reference au stator Vbus et Vbus ref 39
Figure (03.04): graphe de courant coté réseaux Ig (A) 39
Figure (03.05): graphe de courant Iqg (A) 40
Figure (03.06): graphe de puissance réactive (VAR) 40
Figure (03.07): graphe de tension du réseau Vs (v) 40
Figure (03.08): graphe de courant Idg (A) 41
Figure (03.09): graphe de tension de reference coté réseaux Vqg (v) 41
Figure (03.10): graphe de tension de reference coté réseaux Vdg (v) 41
Figure (03.11): Contrôle double vecteur pour un MADA 45
Figure (03.12) : schém de block simulink 46
Figure (03.13) : schéma de block controle (rotor side) 47
Figure (03.14): schéma de block controle 1 (grid side) 47
Figure (03.15): schéma de block turbine 47
Figure (03.16): THD de courant statorique Is 48
Figure (03.17): THD de courant rotorique Ir avant le convertisseur back to back 48
Figure (03.18): THD courant rotorique Ig après le convertisseur back to back 49

Introduction générale

L'énergie éolienne est devenue une composante essentielle de la production d'énergie renouvelable dans le monde entier. La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diversifier les sources d'énergie a conduit à une adoption croissante des technologies éoliennes. Parmi les différentes configurations de générateurs éoliens, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) s'est distinguée par ses nombreux avantages, notamment sa capacité à fonctionner sur une large plage de vitesses de vent et à fournir de l'énergie réactive au réseau. Pour optimiser les performances des éoliennes MADA, l'utilisation de convertisseurs de puissance back to back s'est avérée cruciale.

La MADA, en raison de sa structure et de son fonctionnement, nécessite un système de conversion de puissance complexe pour contrôler à la fois le rotor et le réseau. Le convertisseur back to back , qui comprend un redresseur côté rotor et un onduleur côté réseau, joue un rôle central dans la gestion de l'énergie et dans la garantie de la stabilité du système électrique. L'efficacité de ce système de conversion de puissance est essentielle pour maximiser la production d'énergie éolienne et pour minimiser les pertes.

Cependant, la modélisation et le contrôle des éoliennes MADA avec des convertisseurs back to back posent des défis significatifs en termes de complexité de la commande, de stabilité du système et de qualité de l'énergie injectée dans le réseau. Une compréhension approfondie de ces systèmes est nécessaire pour développer des stratégies de contrôle robustes et efficaces.

Le présent mémoire vise à étudier et à simuler une éolienne équipée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée au réseau via un convertisseur back to back. Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

Le chapitre 1 présenter les généralités sur les éoliennes fournira un aperçu des différents types d'éoliennes, de leur fonctionnement, et de leur rôle dans le contexte énergétique actuel.

Le chapitre 2 modélisation et contrôle de l'éolienne avec MADA se concentrera sur la modélisation mathématique de la MADA, ainsi que sur les techniques de contrôle utilisées pour optimiser ses performances. La dynamique du système, les régulations de flux et de couple.

Le chapitre 3 presenter l'analyse du convertisseur back to back connecté au réseau , examinera en détail le fonctionnement du convertisseur back to back, incluant la régulation de la tension du bus DC, la réduction des harmoniques et la génération de

formes d'onde sinusoïdales pour l'injection de courant dans le réseau. Des simulations seront effectuées pour évaluer les performances du système sous différentes conditions de fonctionnement.

Cette étude est d'une importance capitale pour le développement de technologies éoliennes plus efficaces et fiables. Une meilleure compréhension des systèmes MADA et de leurs convertisseurs de puissance permettra d'améliorer les performances des éoliennes, d'augmenter leur contribution à la production d'énergie renouvelable et de renforcer la stabilité des réseaux électriques.

Cette introduction générale présente le contexte, les objectifs, la méthodologie et l'importance de l'étude, posant ainsi les bases pour les chapitres détaillés qui suivent.

Chapitre 1 Généralités sur l'éolien

1.1 Introduction

L'énergie éolienne est une forme énergie renouvelable produite par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique , puis en énergie électrique utilisable .

Cette forme énergie est utilisée depuis des siècle pour diverses applications , mais son utilisation a grande échelle pour la production électricité a emerge au cours des dernières décennies , en raison de son potentiel a contribuer a la transition vers des sources énergie plus durables.

Ce chapitre était consacre aux concepts généraux sur l'énergie éolienne sous sa forme complètement descriptive .

Puis nous explorerons les bases fondamentales de l'énergie éolienne , depuis ses origines historique jusqu'à sa manifestation moderne . et nous examinerons ses principes de fonctionnement , ses avantages et les inconvénients .

Enfin , nous tournons vers le développement des générateurs et des turbines éolienne , les elements clés d'un éolien . et nous examinons les différents topologies de générateurs utilisées . parallèlement , nous explorons l'évolution des turbines éoliennes

1.2 Définition

L'énergie éolienne est l'énergie dérivée du vent par un dispositif éolien tel qu'une turbine. Cette énergie est « renouvelable» non dégradée. De plus, il s'agit d'une énergie verte car elle ne produit aucune émission atmosphérique ni déchet radioactif.

Un aérogénérateur, communément appelée éolienne, est un système qui récupère énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie mécanique pour produire de électricité par intermédiaire d'une génératrice.

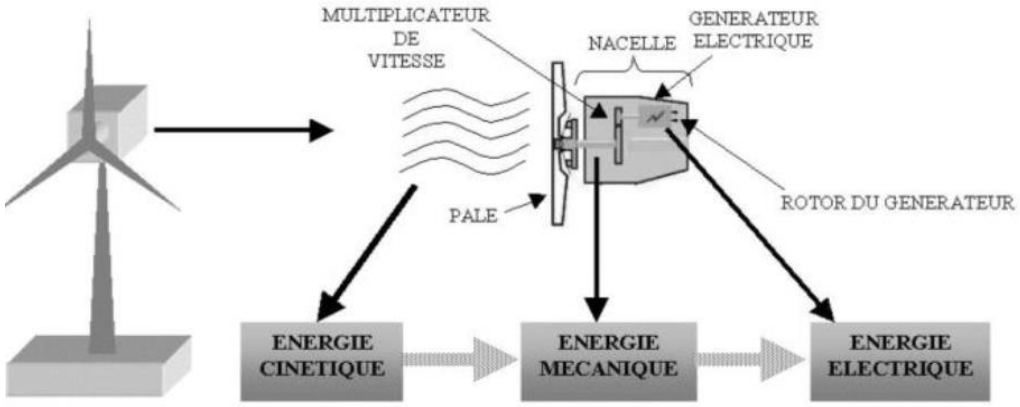


Figure (01.01) Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

1.3 Principe de fonctionnement

l'Énergie éolienne fonctionne grâce a un processus simple : lorsque le vent souffle , il fait tourner les pales d'une éolienne , ce qui entraîne la rotation d'un rotor et d'un générateur .

Ce générateur convertit ensuite énergie mécanique du vent en énergie électrique. Cette électricité produite et ensuit convertie en courant alternatif et peut être injectée directement dans le réseau électrique ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

Les éoliennes sont équipées de systèmes de contrôle sophistiques pour optimiser leur performance en fonction des conditions de vent variables, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable fiable et adaptable.

1.4 Historique

L'évolution de l'utilisation de l'énergie éolienne à travers l'histoire est marquée par plusieurs étapes significatives :

Origines anciennes : l'humanité a exploite le pouvoir du vent dès l'Antiquité, comme en témoignent les premiers projets d'irrigation en Mésopotamie conçus par Hammourabi il y a environ 2000 ans avant J -C.

Expansion géographique : l'Inde ancienne et l'Europe médiévale ont également été des pionnières dans l'utilisation des moulins à vent, initialement pour moudre le grain et plus tard pour d'autres usages comme le pompage et de l'eau et assèchement des terrains inondés.

Transition technologique : l'avènement de la machine à vapeur a marqué le décline progressif de l'utilisation des moulins à vent pour la production énergie.

Renaissance énergétique : l'association entre turbines éoliennes et générateur d'électrique, initiée par Poule la Cour en 1891, a permis une redécouverte de énergie éolienne et son utilisation à grande échelle pour la production électricité.

Expansion moderne : au XXe siècle, les aérogénérateurs ont connu un essor massif, surtout aux États-Unis, où ils ont fourni une source d'électricité vitale pour les régions rurales isolées.

Relance écologique : la crise pétrolière de 1973 a ravive l'intérêt pour les énergies renouvelable, stimulant la recherche et le développement des éoliennes comme alternative énergétique durable [1] .

1.5 Energie éolienne dans le monde

Énergie éolienne est devenue un pilier majeur de la transition énergétique mondiale, offrant une alternative propre et durable aux sources d'énergie traditionnelles. A l'échelle mondiale, la capacité installée d'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle, stimulée par les progrès technologique , la baisse des coûts et les politiques de soutien gouvernementales . Des pays comme la Chine , les États-Unis , l'Allemagne et l'Inde ont emerge comme des leaders dans ce domaine , investissant massivement dans le déploiement éoliennes terrestres et offshore . En plus de sa contribution a la production électricité , l'énergie éolienne offre des avantages environnementaux significatifs en réduisant les emission de gaz a effet de serre et en diminuant la aux combustibles fossiles . las avancées technologiques continuent de propulser l'industrie éolienne vers l'avant , avec des turbines de plus en plus grandes et efficaces ainsi que des solutions de stockage d'énergie pour gérer l'intermittence du vent . Selon le Global Wind Report 2023 du GWEC, 2022 a été la troisième meilleure année jamais enregistrée en matière de nouvelle capacité, avec 78 GW ajoutés dans le monde. La capacité mondiale totale installée est passée à 906 GW. Cela représente une croissance annuelle de 9 %. 2023 devrait être la toute première année à dépasser les 100 GW de nouvelle capacité ajoutée à l'échelle mondiale. De la même manière, GWEC Market Intelligence prévoit une croissance d'une année sur l'autre de 15 % [4].

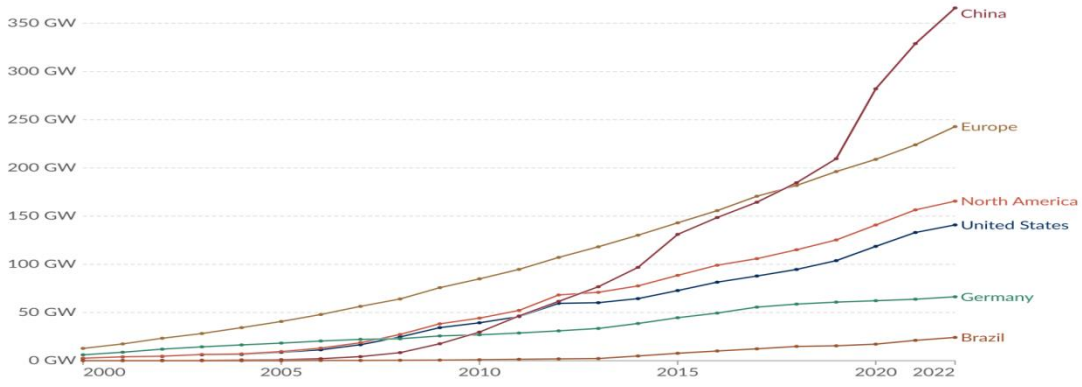
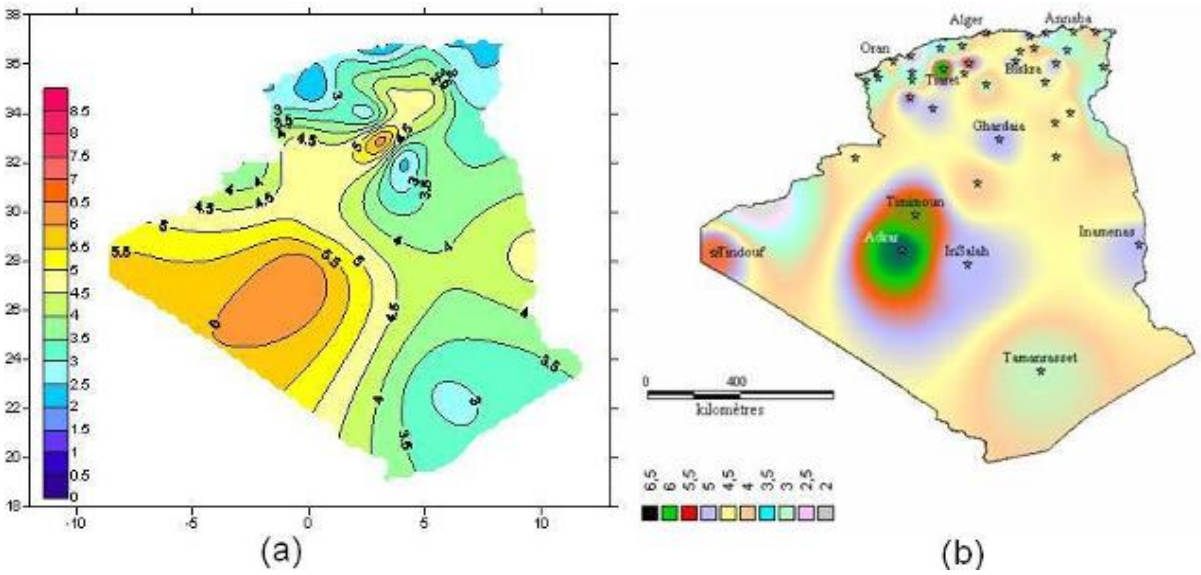


Figure (01.02) :Capacité cumulée installée d'énergie éolienne, y compris les sources éoliennes terrestres et offshore, mesurée en gigawatts (GW).

1.6 l'Énergie éolienne dans l'Algerie :

L'énergie éolienne en Algérie représente un domaine prometteur pour la transition énergétique du pays. Avec ses vastes étendues de terres côtières et montagneuses, l'Algérie possède un potentiel éolien significatif. Bien que des initiatives aient été lancées pour exploiter ce potentiel, telles que le parc éolien de Adrar, le développement de l'énergie éolienne reste à un stade précoce. L'étude préliminaire portant sur l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie a permis d'identifier les zones les plus propices à l'exploitation de l'énergie éolienne. À travers une cartographie détaillée, deux objectifs ont été visés : tout d'abord, repérer les vastes régions où le potentiel éolien est le plus prometteur, puis mettre en lumière les variations relatives de cette ressource à travers le pays. Les résultats dépeignent clairement un contraste entre le nord et le sud du pays : le sud, en particulier la région sud-ouest avec des vitesses dépassant souvent les 4 m/s et atteignant même plus de 6 m/s à Adrar, affiche une plus grande vélocité du vent. En revanche, le nord présente des vitesses plus modérées, avec toutefois des microclimats remarquables le long des côtes et sur les hauts plateaux. Il est essentiel de prendre en compte les variations saisonnières, soulignant notamment que les saisons d'automne et d'hiver sont généralement moins venteuses, bien que Tiaret soit une exception, avec des vitesses de vent plus faibles en été qu'en hiver. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour l'implantation et la planification de parcs éoliens en Algérie, en tenant compte des variations saisonnières et régionales de la vitesse du vent [6].



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali
(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk

*Figure**(01.03):**carte du potentiel éolien en Algérie.*

1.7 Les types de l'éoliennes

1.7.1 Les éoliennes à axe vertical

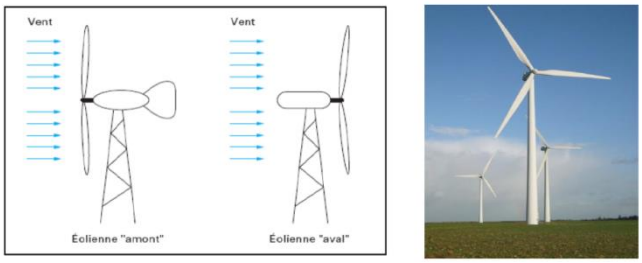


Figure(01.04) : *éoliennes à axe vertical.*

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal [5].

1.7.2 Les éoliennes à axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des dynamique ment à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien .Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. [3]



Figure(01.05) : *éoliennes à axe horizontal.*

1.8 Avantages de l'énergie éolienne :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables. Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles [2] .

1.9 Les inconvenient:

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie[2] .

1.10 Les Topologies et Développements des générateurs des turbines éoliennes :

Une turbine éolienne est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'électricité. Elle est constituée d'un certain nombre d'éléments essentiels, tels que les pales, le mât, le système de contrôle et le générateur. Les pales captent l'énergie cinétique du vent et la transmettent au générateur via une boîte de vitesses. Le générateur convertit ensuite cette énergie mécanique en électricité. Les turbines éoliennes peuvent être de différentes tailles et capacités, allant des petites éoliennes domestiques aux grandes éoliennes utilisées dans les parcs éoliens commerciaux[3] .

1.10.1 Les différentes topologies des générateurs :

a Générateurs à aimants permanents

Les générateurs à aimants permanents sont souvent utilisés dans les turbines éoliennes en raison de leur rendement élevé et de leur compacité. Ils utilisent des aimants permanents pour produire un champ magnétique constant, ce qui élimine la nécessité d'un dispositif d'excitation externe. Cette topologie permet une conception plus légère et plus petite, ce qui facilite l'intégration des générateurs dans les turbines éoliennes. De plus, les générateurs à aimants permanents offrent une meilleure réponse aux variations de vitesse du vent, ce qui contribue à maximiser la production d'énergie.

b Générateurs asynchrones

Les générateurs asynchrones sont une autre topologie couramment utilisée dans les turbines éoliennes. Ils sont basés sur des moteurs asynchrones, qui sont des moteurs électriques sans balais et sans aimants permanents. Cette topologie présente l'avantage de fournir une grande robustesse et une meilleure tolérance aux variations de charge. De plus, les générateurs asynchrones peuvent être utilisés avec un convertisseur de fréquence variable pour permettre une production d'énergie plus efficace et une régulation de la vitesse de rotation de la turbine en fonction des conditions du vent.

c Générateurs synchrones à excitation séparée

Les générateurs synchrones à excitation séparée sont une topologie de générateur utilisée dans les turbines éoliennes de grande puissance. Ces générateurs comportent un rotor et un stator, avec une excitation séparée permettant de contrôler la production d'énergie. Cette topologie offre une grande flexibilité en permettant de régler facilement les paramètres du générateur pour une meilleure adaptation aux variations de charge et aux conditions du site. Les générateurs synchrones à excitation séparée sont souvent utilisés dans les parcs éoliens offshore, où une puissance élevée et une haute fiabilité sont essentielles.

1.10.2 Développement des générateurs pour les turbines éoliennes

Les développements récents dans le domaine des générateurs des turbines éoliennes ont été marqués par de nombreuses avancées technologiques. De nouvelles conceptions de turbines plus efficaces ont permis d'améliorer significativement le rendement énergétique de ces installations. En outre, des matériaux plus légers et résistants ont été utilisés pour les pales des éoliennes, ce qui les rend plus efficaces et permet de produire davantage d'énergie. De plus, l'utilisation de systèmes de contrôle et de régulation plus sophistiqués a également contribué à augmenter l'efficacité des turbines éoliennes. Ces développements récents ont permis de répondre aux besoins croissants en énergie tout en réduisant l'impact environnemental de ces installations.

1.11 Comparaison entre les génératrices

La comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes peut être

effectuée en examinant plusieurs aspects clés, notamment leur technologie, leur efficacité, leur coût, leur fiabilité et leur adaptabilité aux conditions environnementales. Voici un aperçu de certaines des principales génératrices utilisées dans les éoliennes :

1.11.1 Génératrices asynchrones (ou à induction)

Technologie : Les génératrices asynchrones utilisent le principe de l'induction électromagnétique pour générer de l'électricité.
Efficacité : Elles sont moins efficaces à des vitesses de vent variables par rapport à d'autres types de génératrices.
Coût : Elles sont souvent moins coûteuses à produire et à entretenir.
Fiabilité : Elles sont robustes et largement utilisées dans de nombreuses éoliennes terrestres.
Adaptabilité : Elles conviennent mieux aux éoliennes terrestres dans des zones de vent modéré à fort [5].

1.11.2 Génératrices synchrones à aimants permanents

Technologie : Ces génératrices utilisent des aimants permanents pour générer de l'électricité, offrant une efficacité supérieure.
Efficacité : Elles sont plus efficaces à des vitesses de vent variables et offrent un meilleur rendement global.
Coût : Elles peuvent être plus coûteuses à produire en raison de l'utilisation d'aimants permanents.
Fiabilité : Elles sont réputées pour leur fiabilité et sont largement utilisées dans les éoliennes offshore.
Adaptabilité : Elles conviennent aux éoliennes offshore et terrestres, offrant une bonne performance dans une gamme de conditions de vent [3] .

1.11.3 Génératrices synchrones à induction double alimentation (DFIM)

Technologie : Ces génératrices utilisent à la fois des aimants permanents et une bobine d'induction pour générer de l'électricité.
Efficacité : Elles offrent une efficacité élevée et une meilleure réponse aux variations de la vitesse du vent.
Coût : Elles peuvent être plus coûteuses à produire en raison de leur conception complexe.
Fiabilité : Elles sont bien adaptées aux éoliennes offshore et terrestres et offrent une bonne fiabilité.
Adaptabilité : Elles sont particulièrement adaptées aux éoliennes offshore en raison de leur capacité à gérer des variations de vitesse de vent élevées [3] .

1.11.4 Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

Technologie : Utilise à la fois une partie rotorique alimentée et une partie statorique connectée directement au réseau. Permet un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

Efficacité : Haute, capable de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent.

Coût : Modéré, les convertisseurs de puissance sont de taille et coût réduits.

Fiabilité : Bonne, largement utilisée dans les éoliennes modernes.

Adaptabilité : Très adaptable, particulièrement efficace pour les éoliennes offshore et terrestres[3].

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble des éolienne et des différentes technologies de génératrices utilisées dans les turbines éolienne, en mettant un accent particulier sur la génératrices asynchrone á double alimentation .cette analyse met en évidence l'importance de choisir la technologie adaptée pour optimiser les performances des installations éoliennes

Alors que nous nous apprêtons á plonger dans Le chapitre suivant, qui se concentrera sur la modélisation et le contrôle spécifique de MADA, nous comprenons mieux l' importance de cette technologie pour l'avenir de l'énergie éolienne et de transition vers des sources d'énergie renouvelable plus durables .

Chapitre 2 Modélisation et contrôle de l'éolienne MADA

2.1 Introduction

L'éolienne avec machine asynchrone à double alimentation est un système innovant dans la production d'énergie éolienne. Cette étude vise à développer une modélisation et un contrôle efficaces de ce type d'éolienne afin d'optimiser son rendement énergétique. L'introduction présente les principaux objectifs de cette étude et le contexte dans lequel cette technologie s'inscrit.

2.2 Commande de la turbine

La turbine est l'origine de la génération et le premier étage de la conversion de l'énergie électrique .la modélisation de la turbine équipée de trois pales de la MADA est basée sur le même principe de fonctionnement de celle de PMSG. L'extraction de la puissance maximale dépend de l'angle de calage β et du coefficient λ. La variation de l'angle β entraine une extraction de la puissance maximale pour différentes valeurs de vent avec l'existence de C_{pmax} pour chaque β ce qui donne l'expression de la puissance [7] :

$$p = \frac{1}{2} p \pi R^2 V_w^3 C_P \qquad (02.01)$$

Le coefficient de la puissance Cp de de l'éolienne a été présenté de manière empirique suivante :

$C_p = f(\lambda, \beta)$ Avec $\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_w}$

2.3 Description de la machine asynchrone á double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA).Possède un stator similaire à celui des machines triphasées traditionnelles (comme les machines asynchrones á cage où synchrone). ce stator est généralement composé de tôles magnétiques empilées et munies, d'encoches où sont insérés des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Le rotor de la MADA comporte trois bobinages dont les extrémités sont connectés à des bagues conductrice , sur lesquels des balais viennent frottez lorsque la machine est en rotation[2].

Ce type de machine ne nécessite qu'une seule source d'alimentation , Capable d'alimenter les deux côtés de la machine, Ce qui constitue un avantage majeur, notamment dans les applications à vitesse variable. Le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé grâce à la l'utilisation de la convertisseur de puissance, soit coté stator , soit coté Rotor , Voir les deux simultanément. Le choix de la méthode dépend principalement des considérations Technico-économique de la construction [2].

2.4 Description d'une éolienne à base de MADA

La chaîne de conversion d'énergie éolienne est constituée de la turbine éolienne. Et de la machine asynchrone double alimentation associée à un onduleur de tension pour assurer son alimentation au rotor. Comme montrer sur la figure ci-dessus, nous avons introduit un deuxième convertisseur de puissance pour faire la liaison du rotor au réseau électrique, à travers un filtre passif R,L La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo synchrone est hyper synchrone. le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine si le glissement reste inférieur à +_ 30% autour de synchronisme.

Une description des différents éléments constituant de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation et représenté par la figure. Elle peut être divisée en deux parties principales. Nous avons la partie mécanique qui est composée de la turbine de multiplicateur et de l'arbre transmission. Cette partie a été abordée puis la partie électrique qui composait de la MADA dans la stator est connecté directement au réseau électrique ,tant que le rotor est relié au réseau à travers deux convertisseurs statiques bidirectionnels et un bus continue dans une configuration appelée back to back, ces convertisseurs pouvant fonctionner en redresseur ou en onduleurs selon le sens du transfert d'énergie.

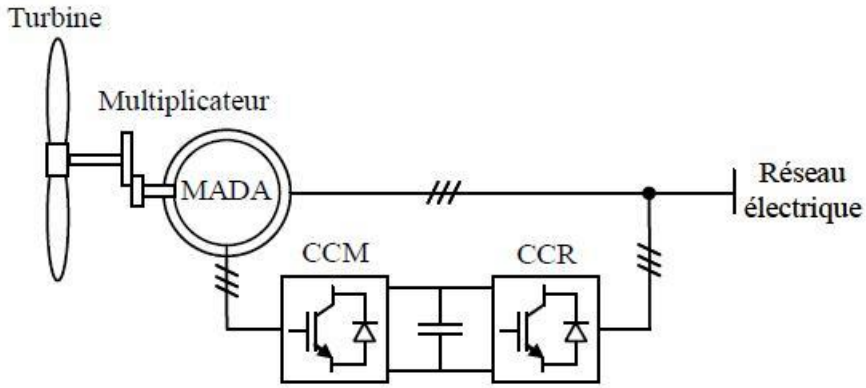


Figure (02.01): Modèle MADA

2.5 Modèle mathématique et contrôle de MADA

2.5.1 Modèle électrique

La relation entre les différentes fréquences de la machine sont des bases sui doivent être connues avant d'étudier les équations électriques de la machine à induction à double alimentation ainsi, l'équation qui relie ω_s(fréquence des tensions et courants su rotor) et ω_m (vitesse électrique du rotor) est la suivante [7] :

$$\omega_s = \omega_r + \omega_m \qquad (02.02)$$

La relation entre la vitesse mécanique de l'arbre $\omega_m$et la vitesse électrique dépend des paires de pôles de la machine :

$$\omega_m = p\Omega_m \qquad (02.03)$$

Les unités de ces deux équations sont données en rad/s. le glissement s de la machine est défini comme suit :

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \qquad (02.04)$$

Les relations précédentes sont également valables si elles sont représentées dans différentes unités, par exemple, en Hz ou en tr/min. Dans la plupart des applications, les enroulements du stator sont directement connecté au réseau, et donc $\omega_s$est constant. Cette fréquence synchrone. Cependant ω_r dépend évidemment de la vitesse électrique de l'arbreω_m, ce qui conduit à trois modes de fonctionnement de la machine en fonction de la vitesse

$$w_m < w_s \Rightarrow w_r > 0 \Rightarrow s > 0 \Rightarrow Subsynchronous\ opération$$

$$w_m > w_s \Rightarrow w_r < 0 \Rightarrow s < 0 \Rightarrow Hypersynchronous\ opération$$

$$w_m = w_s \Rightarrow w_r = 0 \Rightarrow s = 0 \Rightarrow synchronous\ opération$$

A ce stade, la figure montre le circuit équivalent en régime permanent d'une MADA.

Il s'agit d'un modèle idéalisé dans lequel une seule phase du stator et du rotor est représentée. En raison de la symétrie de la machine, les deux autres phases sont modélisées comme essentiellement égales. Il a été supposé que la machine est symétrique et équilibrée en structure et que la magnétisation est linéaire. Comme indiqué précédemment, il est supposé que les enroulements du stator sont alimentés par des tensions triphasées directement depuis le réseau, tandis que le rotor

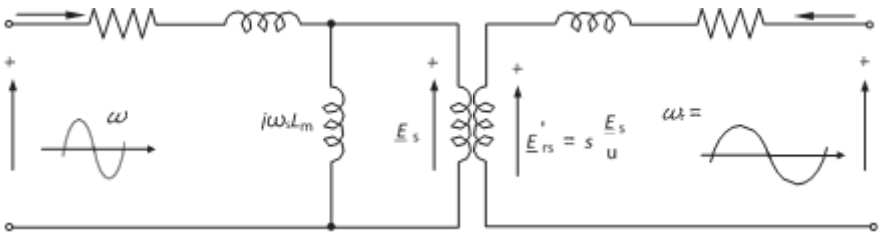


Figure (02.02) : *Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent di MADA*

Est également alimenté par des tensions triphasées mais indépendantes des tensions du stator. Les grandeurs électriques les plus représentatives et les paramètres du modèle sont les suivants :

Les grandeurs électriques du stator et du rotor :

$_v_s$ Tension du stator fournie

$_v'_r$ Tension du rotor fournie

$_I_s$ Courant du stator

$_I'_r$ Courant du rotor

$_E_s$ FEM induite dans le stator

$_E'_{rs}$ FEM induite dans le rotor

Paramètre électriques du stator et du rotor :

$_R_s$ Résistance du stator (**Ω**)

$_R'_r$ Résistance du rotor (**Ω**)

$_L_m$Inductance mutuelle (H)

$_L_{\sigma s}$Inductance de fuite de stator (H)

$_L'_{\sigma s}$Inductance de fuite du rotor (H)

$_N_s$,N_r Enroulements du stator, du rotor, nombre de spires par phase

La fréquence du circuit du stator est $\omega_s$tandis que la fréquence du rotor dépend de la vitesse de rotation, comme le révèle l'expression (10.1). Les impédances de fuite du stator et du rotor sont calculées selon la fréquence correspondante du stator et du rotor. La relation entre le nombre de spires par phase du stator et du rotor est donnée par le coefficient

$$u = \frac{N_s}{N_r} \qquad (02.05)$$

Certaines variations constructives peuvent affecter ce coefficient, tandis que les REM induites du stator et du rotor sont reliées par :

$$\underline{\acute{E}}_{rs} = s\frac{\underline{E_s}}{u} \qquad (02.06)$$

Notes que la relation des amplitudes dépend du glissement (ou de la vitesse de rotation), tandis que dans le cas particulier ou u=1 et la machine est à l'arrêt (s=1), les FEM induites du stator et du rotor sont égales.

En général, pour faciliter l'analyse, ce circuit est modifié pour devenir un équivalent réduit du stator, en référençant les grandeurs et paramètres du rotor au stator au moyen des équivalences suivantes :

$$R_r = \acute{R}_r u^2 \quad L_{\sigma r} = \acute{L}_{\sigma r} u^2 \quad \underline{I_r} = \frac{\acute{I}_r}{u} \quad \underline{V_r} = \underline{\grave{V}_r} u \quad \underline{E_{rs}} = \underline{\acute{E}_{rs}} u \qquad (02.07)$$

La notation adoptée indique les grandeurs et paramètres réels du rotor avec le super indice prime (‘), tandis que les frondeurs réduites du stator sont sans le super indice prime (‘).Cela nous fournit le circuit de phase équivalent de la figure (10.3).

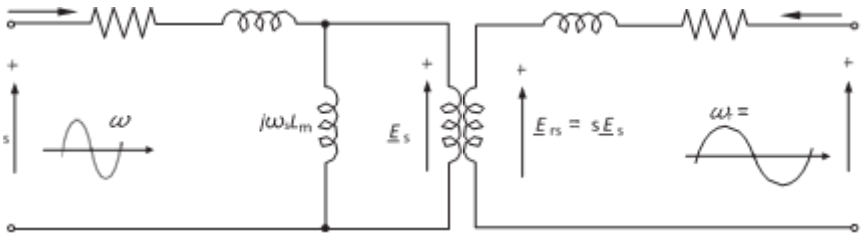


Figure (02.03) : *Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA avec paramètre du rotor, courant et tension réduits au stator*

Pour une analyse pratique, il est plis pratique que les circuits du stator et du rotor présentent les mêmes fréquences. Ainsi, le circuit du rotor est « converti » à la fréquence du statorω_s, simplement en faisant :

$$\underline{V_r} - s\underline{E_s} = (R_r + js\omega_s L_{\sigma r})\underline{I_r} \Rightarrow \frac{\underline{V_r}}{s} - \underline{E_s} = (\frac{R_s}{s} + j\omega_s L_{\sigma r})\underline{I_r} \qquad (02.08)$$

Par conséquent, le circuit équivalent final est obtenu en référençant le rotor au stator, comme le montre la figure (10.4), ou toutes les grandeurs sont de la même fréquence

Les équations électriques de ce circuit équivalent en régime permanent, incluant les flux du stator et du rotor, sont résumées comme suit [7] :

Tensions :

$$\underline{V_s} = R_s\underline{I_s} + j\omega_s L_{\sigma s}\underline{I_s} + j\omega_s L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right)$$

$$\frac{\underline{V_r}}{s} = \frac{R_r}{s}\underline{I_r} + j\omega_s L_{\sigma r}\underline{I_r} + j\omega_s L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) \qquad (02.09)$$

Flux :

$$\underline{\Psi_s} = L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) + L_{\sigma s}\underline{L_s} = L_s\underline{I_s} + L_m\underline{I_r} \qquad 10$$

$$\underline{\Psi_r} = L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) + L_{\sigma r}\underline{I_r} = L_m\underline{I_s} + L_r\underline{I_r}$$

Ou $L_s = L_m + L_{\sigma s}$étant l'inductance du stator et $L_r = L_m + L_{\sigma r}$étant l'inductance du rotor. A partir de toutes ces équations électriques, il est possible de dériver le diagramme de phase pour toute condition de fonctionnement du :

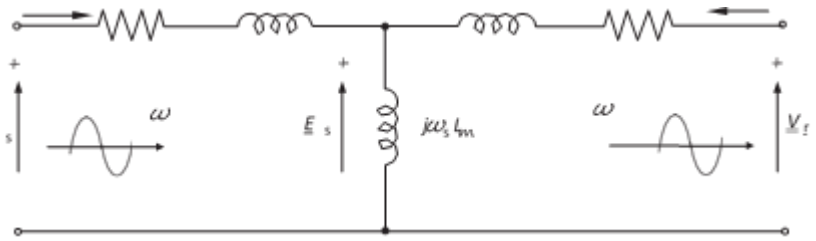


Figure (02.04) : *Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA référence au stator*

2.5.2 Modèle dynamique

a Modèle αβ

Dans le développement du modèle dynamique $\alpha\beta$ de la MADA, la théorie du vecteur espace est appliquée aux équations électriques de base de la machine et encore une fois, comme dans le modèle en régime permanent qui a été considéré, la machine est supposée à la fois idéal et linéaire. La figure (02.06) montre les trois référentiels de rotation différentielle du rotor (DQ)tourne à $\omega_m$et le référentiel synchrone (dq)tourne àω_s. Les indices "s","r"et "a"sont utilisés pour indiquer qu'un vecteur espace est référencé par rapport aux référentiels du stator, du rotor et synchrone, respectivement. En utilisant une transformation rotationnelle directe et inverse, un vecteur espace peut être représenté dans l'un de ces référentiels. Par conséquent, les trois bobines du stator et du rotor séparément, en utilisant la théorie du vecteur espace, peuvent être représentées par deux bobine stationnaires $\alpha\beta$ pour le stator et deux bobines rotatives DQ pour le rotor, fournissant les équations de tension suivantes :

$$\overrightarrow{v_s^s} = R_s\overrightarrow{i_s^s} + \frac{d\overrightarrow{\Psi_s^s}}{dt} \qquad \overrightarrow{v_r^r} = R_r\overrightarrow{i_r^r} + \frac{d\overrightarrow{\Psi_r^r}}{dt} \qquad (02.10)$$

Si les deux équations de tension sont représentées dans le référentiel stationnaire $\alpha\beta$,alors l'équation du rotor doit être multipliée par $e^{i\theta_m}$, ce qui donne l'ensemble d'équations suivant [7] :

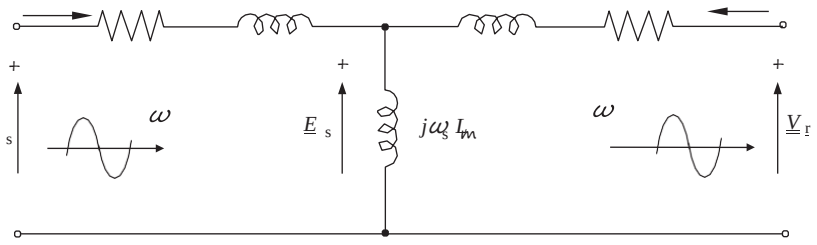


Figure (02.05) : *Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanente du MADA référencé au stator*

$$\overrightarrow{v_s} = R_s\overrightarrow{\imath_s} + \frac{\overrightarrow{d\psi_s}}{dt} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} v_{\alpha s} = R_s\, i_{\alpha s} + \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} \\ v_{\beta s} = R_s\, i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \qquad (02.11)$$

$$\overrightarrow{v_r} = R_r\overrightarrow{\imath_r} + \frac{\overrightarrow{d\psi_r}}{dt} - j\omega_m\,\overrightarrow{\Psi_r} \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha r} = R_r\, i_{\alpha r} + \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} + \omega_m\psi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = R_r\, i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \omega_m\psi_{\alpha r} \end{cases} \qquad (02.12)$$

De manière similaire, il est possible de dériver les expressions de flux du stator et du rotor sous forme de vecteurs espace dans un référentiel stationnaire :

$$\overrightarrow{\Psi_s} = L_s\,\overrightarrow{\imath_s} + L_m\,\overrightarrow{\imath_r} \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha s} = L_s\, i_{\alpha s} + L_m\, i_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} = L_s\, i_{\beta s} + L_m\, i_{\beta\alpha} \end{cases} \qquad (02.13)$$

$$\overrightarrow{\Psi_r} = L_m\,\overrightarrow{\imath_s} + L_r\,\overrightarrow{\imath_r} \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha r} = L_m\, i_{\alpha r} + L_r\, i_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} = L_m\, i_{\beta s} + L_r\, i_{\beta r} \end{cases} \qquad (02.14)$$

Ainsi, à partir de l'ensemble d'équations dérivées, le circuit équivalent en $\alpha\beta$ est développé comme représenté dans la figure (02.07). Il y a un circuit équivalent pour chaque coordonnée, dans lequel toutes les grandeurs de tension, de courant et de flux sont sinusoïdales avec une fréquence de ω_s[7] .

$$P_s = \frac{3}{2}\left(v_{\alpha s} i_{\alpha s} + v_{\beta s} i_{\beta s}\right) \qquad P_r = \frac{3}{2}\left(v_{\alpha r} i_{\alpha r} + v_{\beta r} i_{\beta r}\right) \qquad (02.15)$$

$Q_r = \frac{3}{2}\left(v_{\beta s} i_{\alpha s} - v_{\alpha s} i_{\beta s}\right)$ $Q_r = \frac{3}{2}\left(v_{\beta r} i_{\alpha r} - v_{\alpha r} i_{\beta r}\right)$

D'autre part, les puissance active et réactive des cotés statorique et rotorique peuvent être calculées selon les équations suivantes :

$$T_{em} = \frac{3}{2} pIm\{\overrightarrow{\Psi_r}\,\overrightarrow{i_r^*}\} = \frac{3}{2} p(\Psi_{\beta r} i_{\alpha r} - \Psi_{\alpha r} i_{\beta r}) \qquad (02.16)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} Im\{\overrightarrow{\Psi_s}\overrightarrow{i_r^*}\} = \frac{3}{2} pIm\{\overrightarrow{\Psi_s^*}\,\vec{i}_s\}$$

$$= \frac{3}{2}\frac{L_m}{L_r} pIm\{\vec{\Psi}_r^* \vec{i}_s\} = \frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} pIm\{\vec{\Psi}_r^* \vec{\Psi}_s\} = \frac{3}{2} L_m pIm\{\vec{i}_s \vec{i}_r^*\}$$

Ou encore une fois $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s . L_r$

Ainsi, en réarrangeant les expressions (02.11) _ (02.14), nous pouvons développer plusieurs représentations de l'espace d'état de MADA, qui sont utiles, par exemple, à des fins de simulation ou d'analyse. L'expression suivante en montre une dans laquelle le vecteur d'état est composé des flux du stator et du rotor :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\overrightarrow{\Psi_s^s}\\ \vec{\Psi}_r^s\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r}\\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_r}{\sigma L_r} + j\omega_m\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\vec{\Psi}_s^s\\ \vec{\Psi}_r^s\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\vec{\Psi}_s^s\\ \vec{\Psi}_r^s\end{bmatrix} \qquad (02.17)$$

Par conséquent, en ajoutant l'équation de mouvement mécanique qui décrit le comportement de la vitesse du rotor :

$$T_{em} - T_{load} = J\frac{d\Omega_m}{dt} \qquad (02.18)$$

Avec J, l'inertie du rotor etT_{load}, le couple de charge appliqué à l'arbre, nous avons constitué un modèle de la MADA qui peut également être utilisé pour des simulations informatiques [9].

b Modèle dq

Le modèle de vecteur espace de la MADA peut également être représenté dans un référentiel tournant de manière synchrone. A cet effet, en multipliant respectivement les expressions de tension (02.10) par $e^{-j\theta_s}$ et $e^{-j\theta_r}$, nous obtenons les équations de tension dq :

$$\vec{v}_s^a = R_s \vec{i}_s^a + \frac{d\vec{\Psi}_s^a}{dt} + j\omega_s \vec{\Psi}_s^a \quad \Rightarrow \qquad (02.19)$$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \dfrac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \dfrac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \end{cases}$$

$$\vec{v}_r^a = R_r\vec{i}_r^a + \frac{d\vec{\Psi}_r^a}{dt} + j\omega_r\vec{\Psi}_r^a \quad \Rightarrow \qquad (02.20)$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \dfrac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_r\Psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \dfrac{d\Psi_{qr}}{dt} + \omega_r\Psi_{dr} \end{cases}$$

De même, les flux donnent :

$$\vec{\Psi}_s^a = L_s\vec{i}_s^a + L_m\vec{i}_r^a \quad \Rightarrow \qquad (02.21)$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases}$$

$$\vec{\Psi}_r^a = L_m\vec{i}_s^a + L_r\vec{i}_r^a \quad \Rightarrow \qquad (02.22)$$

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r \\ i_{dr}\Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases}$$

Ainsi, à partir des équations ci-dessus, le circuit électrique équivalent en dq est obtenu, comme illustré dans la figure (02.05). Cependant, cette représentation du modèle avec des expressions équivalentes de puissance et de couple comme dans le modèle , ainsi que le modèle de simulation informatique, peuvent être développés davantage.

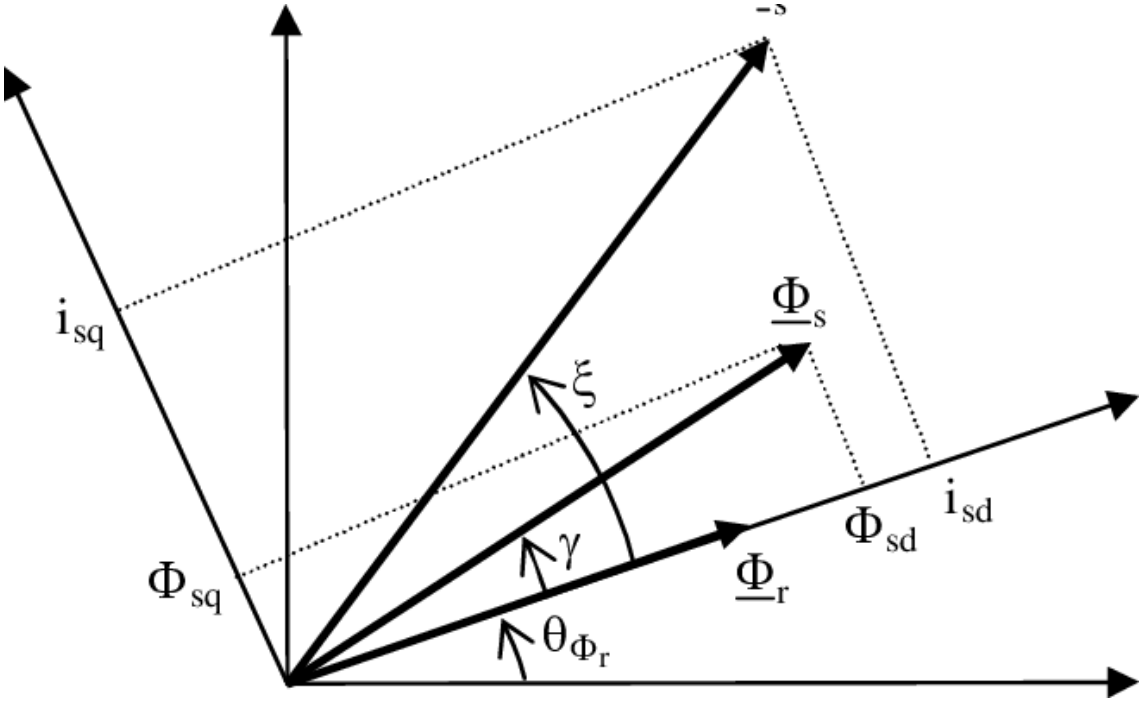


Figure (02.06) : *Différents référents pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA*

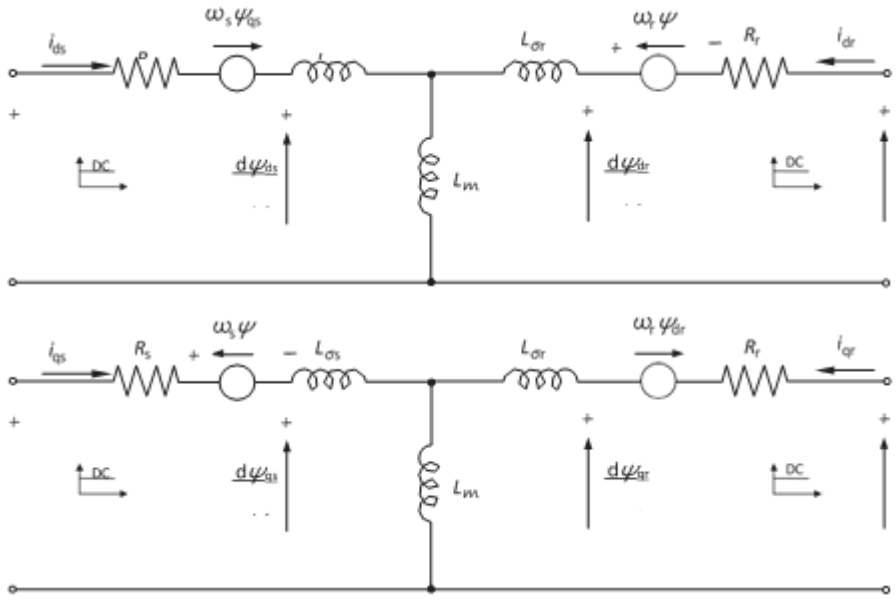


Figure (02.07) : *Modèle du MADA dans le référentiel dq*

2.6 contrôle de MADA

a) **Contrôle du convertisseur côté rotor.**

Le convertisseur côté Rotor (Rotor Side Converter RSC) est responsable de la régulation de la puissance active et réactive de la MADA. Il contrôle le flux et le couple en agissant des directement sur le courant du rotor. Le RSC utilise généralement la méthode de contrôle vectoriel ou de contrôle orienté champ pour atteindre ses objectifs [8].

- **Contrôle vectoriel**

Le contrôle vectoriel décompose les courants du rotor en composants de flux (id) et de couples (iq) Cette décomposition permet de réguler indépendamment Le flux magnétique et le couple. Améliorant ainsi la réponse dynamique de la machine, les étapes clés du contrôle vectoriel sont:

✧ Transformation des courants et tensions du rotor en un cadre de référence synchrone.

✧ Régulation des composants de flux et de couple via des régulateurs PI.

✧ Transformation inverse pour générer les signaux de commande pour le RSC.

- **Régulation de la puissance réactive**

Le RSC peut également être utilisé pour réguler la puissance réactive injectée ou absorber par La MADA , améliorant ainsi la stabilité du réseau et la qualité de l'alimentation électrique.

b) **Contrôle du convertisseur côté réseau**

Le convertisseur coté réseau (GSC-grid side Converter) a pour rôle de garantir que la puissance électrique fournie par la MADA soit compatible avec les les exigences du réseau électrique. Le GSC régule la tension du bus DC et contrôle l'injection de courant dans le réseau [10].

- **Régulation de la tension du bus DC**

La stabilité de la tension du bus DC est cruciale pour le bon fonctionnement de l'ensemble du système de conversion. Le GSC utilise un régulateur PI pour maintenir la tension du bus DC à une valeur de consigne indépendamment des variations de la puissance générée par la MADA .

- **Contrôle du courant injecté**

Le GSC assuré également le contrôle de la forme d'onde du courant injecté dans le réseau pour minimiser les distorsions Harmoniques et respecter les normes de qualité de l'énergie. Cela est réalisé en utilisant une technique de modulation par largeur d'impulsion (PWM) et des régulateurs de courant synchrones.

Le contrôle efficace de convertisseurs côté rotor et côté réseau est essentiel pour maximiser le performance de la MADA . Le contrôle vectoriel du RSC permet une régulation précise du flux et du couple, tandis que le GSC assure la stabilité de la tension du bus DC et la qualité du courant injecté dans le réseau. Ensemble, ces techniques permettent à la MADA de fonctionner de manière optimale même dans des conditions de réseau variables.

2.7 Résultats de simulation de la MADA

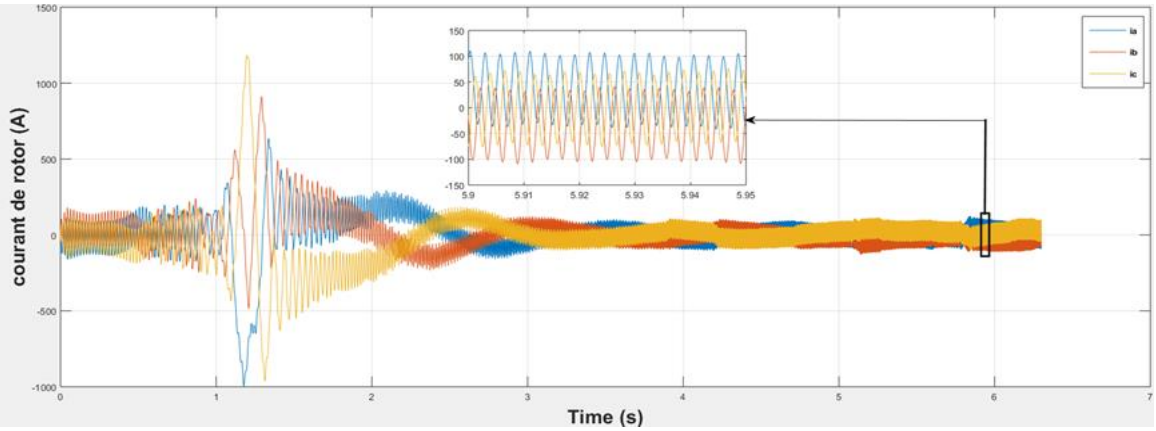


Figure (02.08): *graphe de courant de rotor Ir (iabc r) (A)*

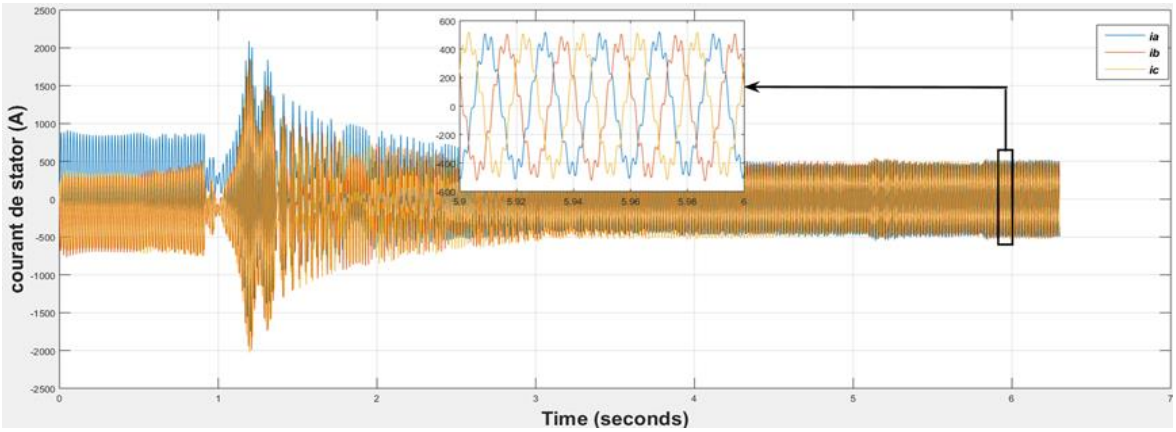


Figure (02.09): *graphe de courant de stator Is (A)*

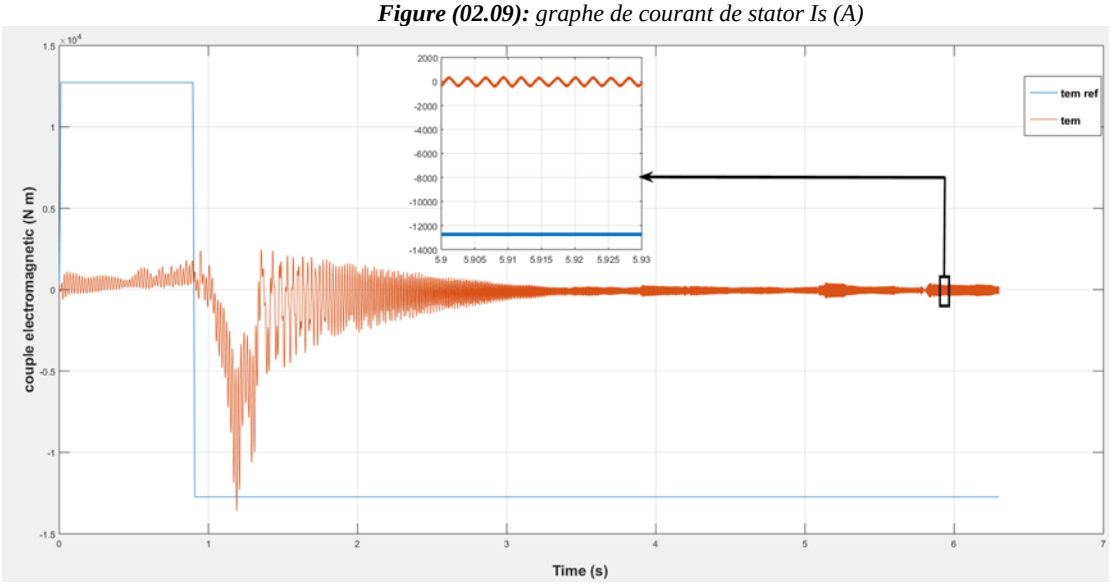


Figure (02.10): *graphe de couple electromagnetic*

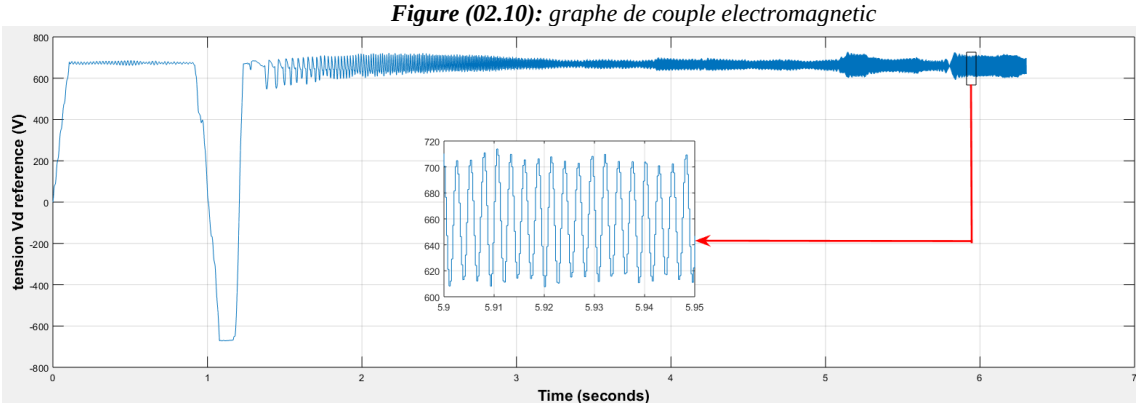
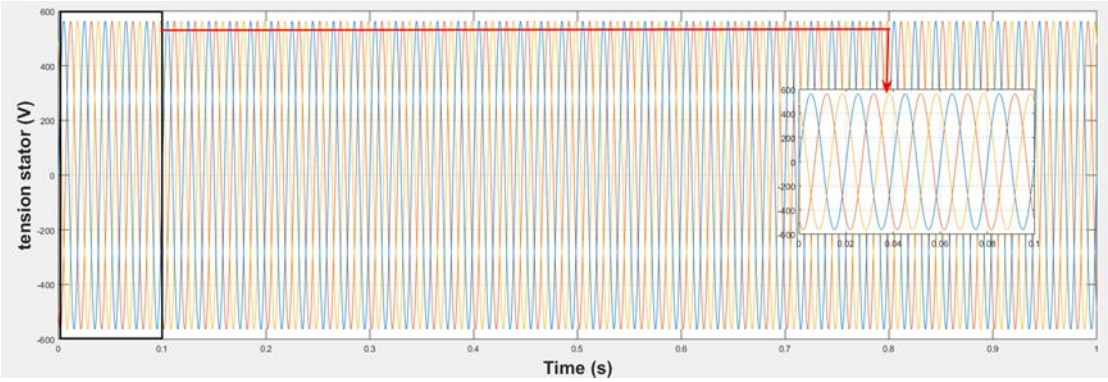
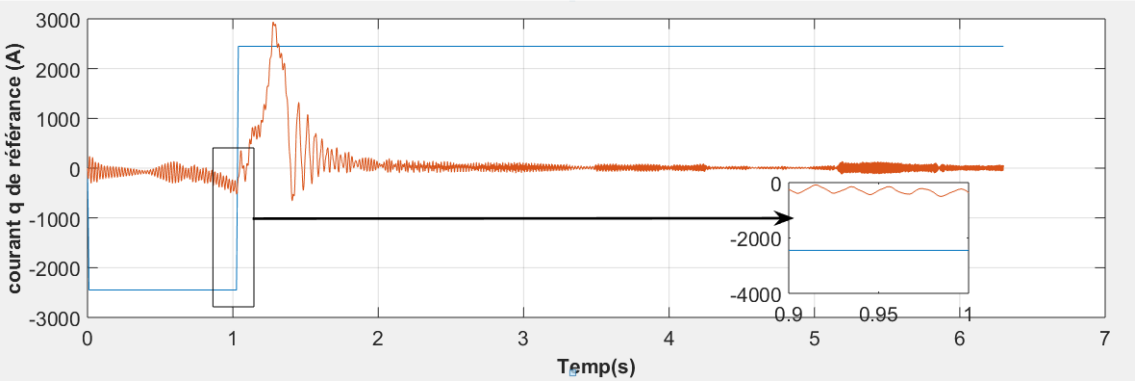


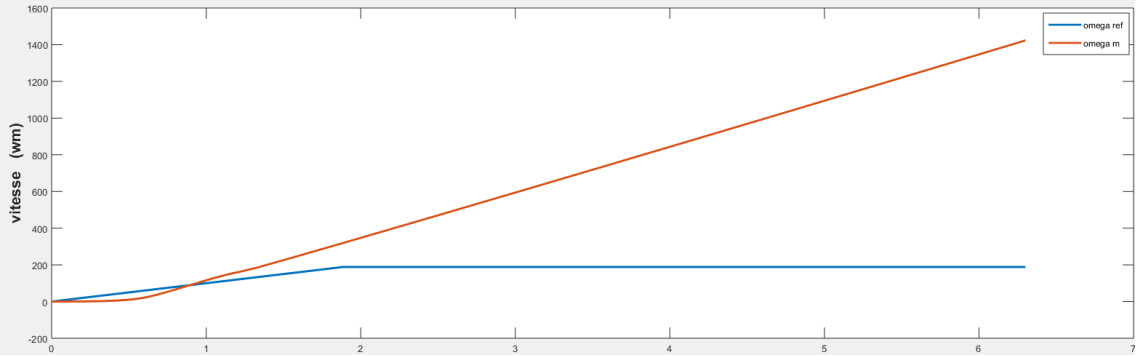
Figure (02.11): *graphe de tension Vd reference (V)*



Figure(02.12): *graphe de tension stator Vs (V)*



Figure(02.13): *graphe de courant de reference coté rotor Iqr (A)*



Figure(02.14): *graphe de vitesse de rotor et vitesse reference*

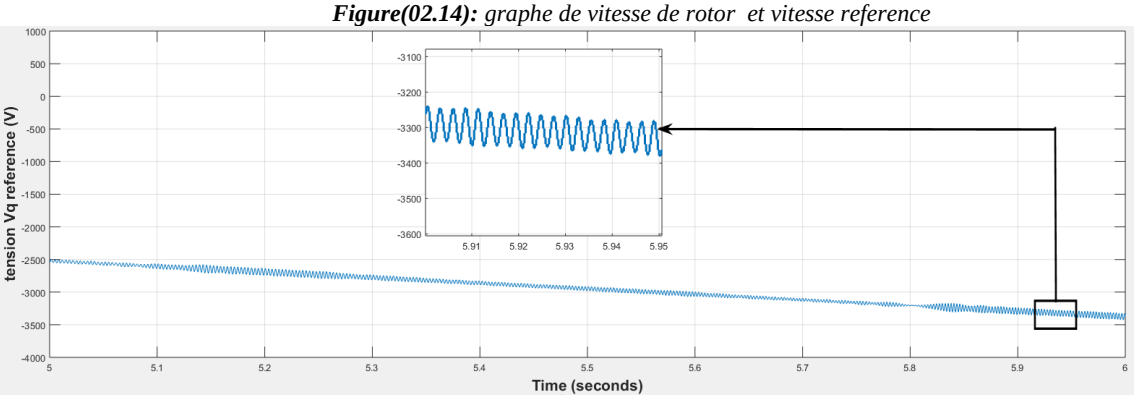


Figure (02.15): *graphe de tension Vq reference (V)*

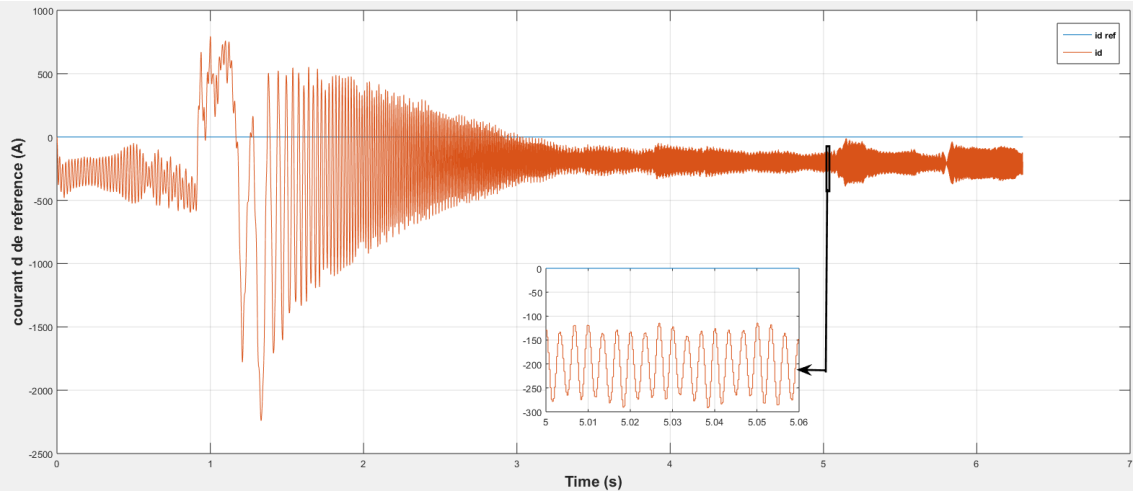


Figure (02.16): *graphe de courant de reference coté rotor Idr (A)*

Figure (02.08) : Le graphique montre les courants des phases iabc en fonction du temps sur une période d'environ 7 secondes. Au début, les courants oscillent faiblement autour de zéro. Vers 1 seconde, il y a une transition marquée par une augmentation significative des amplitudes des courants, indiquant une réponse transitoire du système à une perturbation ou à un changement de régime. Cette phase est caractérisée par des oscillations importantes qui diminuent progressivement en amplitude. À partir de 3 secondes, les courants se stabilisent tout en continuant à osciller à une fréquence élevée avec une amplitude constante. Ce comportement suggère que le système est dans un état de fonctionnement stable mais oscillatoire .

Figure (02.09) : Le graphique des courants statoriques côté rotor , montre des amplitudes de courant atteignant environ 2000 A en crête, ce qui est typique pour une éolienne de grande puissance. Cependant, les oscillations significatives et les ondulations visibles dans le signal suggèrent la présence d'harmoniques. Ces harmoniques peuvent être dues à des imperfections dans le contrôle du convertisseur ou à des perturbations provenant du réseau. Les variations rapides et fréquentes dans les courants indiquent des problèmes potentiels de stabilité dans le système de contrôle, ce qui pourrait affecter la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

Figure (02.10) : Le graphique montre deux séries temporelles : "Tem ref" et "Tem" sur environ 7 secondes. Le signal de référence "Tem ref" commence à une valeur élevée (15000) et reste constant pendant 1 seconde avant de chuter brusquement à zéro. Le signal de réponse "Tem" commence près de zéro, puis réagit fortement au changement de "Tem ref" en affichant un comportement oscillatoire amorti. Les oscillations diminuent en amplitude et le signal se stabilise autour de zéro après environ 3 secondes. Ce comportement indique une réponse typique d'un système dynamique à un changement soudain, où le système, probablement avec un mécanisme de contrôle en boucle, réagit à une perturbation initiale avant de se stabiliser.

Figure (02.11) : Le graphique montre la variation de la tension directe (Vdr) en fonction du temps. Initialement, la tension augmente rapidement pour atteindre environ 200 unités, suivie d'oscillations amorties. À environ 1,5 seconde, une chute soudaine à -150 unités se produit, suivie d'une récupération. Après 3 secondes, les oscillations deviennent plus denses et régulières, indiquant une nouvelle condition stable mais oscillatoire. Le système tente de retrouver la stabilité après chaque perturbation, mais reste oscillatoire, suggérant des perturbations externes .

Figure (02.12) : Ce graphique montre les tensions statoriques Vs des trois phases va vb vc en fonction du temps (en secondes). Les trois tensions sont des sinusoïdes parfaitement déphasées les unes par rapport aux autres. Les tensions ont une amplitude maximale d'environ 500 V. Les trois phases montrent une fréquence et une forme d'onde constantes sur la période observée. Les tensions sinusoïdales équilibrées et déphasées de manière égale indiquent que le générateur fonctionne correctement et que les tensions sont bien régulées. Les sinusoïdes pures sans distorsion significative montrent que le système de conversion et de contrôle des tensions fonctionne efficacement. La fréquence constante des tensions suggère que le système de contrôle maintient une fréquence stable, ce qui est crucial pour la synchronisation avec le réseau électrique.

Figure (02.13) : Ce graphique représente le courant Iqr (courant q côté rotor) en fonction du temps (en secondes). La courbe bleue indique la référence Iqr ref, tandis que la courbe orange montre la valeur réelle du courant Iqr. Au début de la simulation, il y a une grande oscillation dans le courant Iqr, atteignant des valeurs très élevées, bien au-delà de la référence Iqr ref. Ces oscillations diminuent progressivement et se stabilisent autour de la valeur de référence après environ 4 secondes. La valeur de référence Iqr ref reste constante à 2000 A tout au long de la simulation. La grande oscillation initiale suggère une réponse transitoire importante, probablement due à un changement de consigne ou à une perturbation dans le système. Le courant Iqr finit par se stabiliser, ce qui montre que le système est capable de réguler le courant malgré les perturbations initiales. La différence initiale importante entre Iqr et Iqr ref indique que le contrôleur peut nécessiter une optimisation pour réduire les oscillations et atteindre plus rapidement la valeur de consigne. Une réponse transitoire plus rapide et moins oscillatoire serait souhaitable pour améliorer la performance du système.

Figure (02.14): La simulation de la référence de vitesse (omega ref) montre une légère augmentation par paliers dans une courte plage de temps, précisément entre 1.8835 secondes et 1.8855 secondes. Cette évolution indique que le système de contrôle ajuste la vitesse de manière incrémentale, suggérant une réponse en escalier typique des systèmes numériques de contrôle. Ce comportement peut être dû à la quantification de la vitesse de référence dans le contrôleur numérique augmentation progressive par paliers peut aider à éviter des variations brusques de la vitesse, favorisant ainsi la stabilité du système global .

Figure (02.15): Le graphique montre des oscillations régulières et périodiques de la tension quadrature (Vq) entre 340 et 365 unités sur le temps. La courbe `vq_ref ` oscille de manière quasi-sinusoidale avec une amplitude d'environ 25 unités et une fréquence

constante. Ce comportement suggère un système stable en régime permanent sans changements transitoires significatifs.

Figure (02.16): Au début, une phase transitoire est marquée par des oscillations importantes et un pic notable, caractéristiques de l'initialisation du système ou d'une perturbation initiale. Ces oscillations diminuent progressivement et le courant se stabilise autour de la valeur de référence après environ 3 secondes, indiquant l'efficacité du contrôleur à réguler le courant.Cette stabilisation rapide et la réduction des oscillations démontrent que le système de contrôle gère efficacement les perturbations et assure une injection stable et précise du courant dans le réseau, garantissant une performance fiable de l'éolienne.

2.8 Problématique d'intégration de l'éolien au réseau électrique

L'intégration de l'éolien au réseau électrique nécessite une attention particulière aux normes de qualité énergie et aux effets des défaut . Les exigences de fiabilité , de stabilité et performance du réseaux électrique imposent des contraintes spécifiques , auxquelles l'énergie éolienne doit se conformer . Comprendre ce contexte permettra d'appréhendre des défis technique et réglementaires liés à cette intégration et de mettre en place des solutions innovantes pour garantir un fonctionnement optimal du réseaux électrique .

2.8.1 Normes internationales et européènes

Les normes internationales et européènes fournissent un cadre commun pour la conception ,la mise oeuvre et l'exploitation des éolienne .elles assurent que les installations éoliennes sont sûres, efficaces et compatibles avec les exigences du réseau.

a Les normes IEC pour énergie éolienne

La commission électrotechnique internationale(IEC) a élaboré une série des normes spécifiques pour l'énergie éolienne, regroupées principalement sous la série IEC 61400. voici quelques -unes des normes les plus important :

IEC 614000-1: conception des éoliennes

IEC 614000-21: mesure et évaluation des caractéristiques de la puissance des éoliennes .

IEC 61400-12: mesure des performances de la production d'énergie des éoliennes

ces normes garantissent que les éoliennes fonctionnent efficacement et en toute sécurité, minimisant les impacts négatifs sur les réseaux électriques .

b normes nationale et locales :

En plus des normes internationales , de nombreux pays et régions ont développé leurs propres normes et régulation pour l'intégration de l'énergie éolienne dans leurs réseaux électriques . Ces normes tiennent compte des spécificités locales , telles que les conditions climatique , les caractéristiques du réseaux et les exigences des opérateurs de réseau .

2.8.2 Les effets des défauts sur le réseau électrique

L'intégration des éolienne dans le réseau électrique peut entraîner divers types de défauts , chacun ayant des conséquence spécifiques sur la qualité de l'énergie et la stabilité du réseau .comprendre ces défauts est crucial pour concevoir des systèmes de protection et des gestion efficaces .

a types de défauts et leurs conséquences

les défauts dans les réseaux électriques peuvent être classés en plusieurs catégories , chacune ayant des conséquences distinctes :

- **Défauts de court-circuit**: se produisent lorsque deux conducteurs ou plus entrent en contact de maniére inappropriè , entraînant une circulation excessive de courant.
- **Conséquence :** surtension ,dommage aux équipements , déclenchement des dispositifs de protection .
- **Défauts de terre :** impliquent une connexion non intentionnelle entre un conducteur et la terre .
- **Conséquences :** perturbation de la tension , danger pour la sécurité, potentiels .
- **Défauts intermittents :** sont des défauts qui apparaissent et disparaissent , souvent dus á des conditions environnement comme le vent ou l'humidité.
- **Conséquence :** variations de tension , instabilités fréquentes , difficultés de diagnostic.
- **Défauts de déséquilibre :** se produisent lorsque la charge n'est pas distribuée uniformément entre les phases .
- **Conséquence :** surchauffe des conducteurs , vibration mécaniques , réducation de la durée de vie des équipements , perturbation de la qualité de l'énergie .

Ces défauts peuvent affecter la qualité de l'énergie , entraîner des interruptions de service et endommage les infrastructures électriques . Des mesures préventives et des systèmes de protection avancés sont essentiels pour atténuer ces effets et maintenir un réseau électrique stable et fiable .

2.9 Objectifs de l’étude

L’objectif de cette étude est de modéliser et de contrôler une éolienne avec machine asynchrone à double alimentation afin d’améliorer son efficacité énergétique. Pour cela, s’agira de développer une modélisation précise du fonctionnement de la machine asynchrone, ainsi que du système de régulation de la vitesse de rotation et de la puissance produite par l’éolienne. Les résultats obtenus permettront de comparer cette technologie avec d’autres solutions éoliennes existantes.

2.10 Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d’ ensemble complète de la modélisation et de contrôle du MADA , démontrant leur importance cruciale pour l’intégration efficace et stable de l’énergie éolienne dans les réseaux électriques. En abordant les aspects théoriques et pratiques, ainsi que les résultats du simulation, Nous avons mis en lumière les avantages et les défauts de cette technologie. Préparez vous à aborder le chapitre suivant ou nous, explorerons le rôle et le fonctionnement de convertisseur. Dos á dos connecté au réseau. en approfondissant les aspects techniques et les implications pour l’intégration de l’énergie éolienne.

Chapitre 3 Convertisseur back to back connecté au réseaux

3.1 Introduction

Dans les systèmes d'énergie éolienne moderne, l'efficacité et la stabilité de la conversion d'énergie sont essentielles pour maximiser la production et garantir Une intégration harmonieuse avec le réseau électrique. Le convertisseur back to back joue un rôle crucial dans cette dynamique. Elle permet non seulement de convertir l'énergie produite par les génératrices éoliennes, mais aussi de contrôler et d'optimiser cette conversion en temps réel.

L'objectif de ce chapitre est de fournir en une compréhension approfondie des convertisseurs back to back , De leur modalisation et de leurs stratégies de contrôle en mettant en lumière leur importance pour l'efficacité et la stabilité des systèmes d'énergie éolienne.

3.2 Définition

Le convertisseur dos á dos, aussi appeler convertisseur back to back ou convertisseur AC-DC- AC, est une, technologie clé utilisée dans les systèmes d'énergie éolienne, en particulier pour les machines asynchrones à double alimentation. Ce convertisseur se compose de 2 parties principales, le convertisseur coté machine et le convertisseur coté réseau relié par un bus DC intermédiaire le rôle principal de convertisseur back to back est de permettre une conversion et un contrôle efficace de l'énergie électrique produite par l'ÉOLIENNE. En répondant aux variations de vitesse de vent et en assurant la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique [7][16][17] .

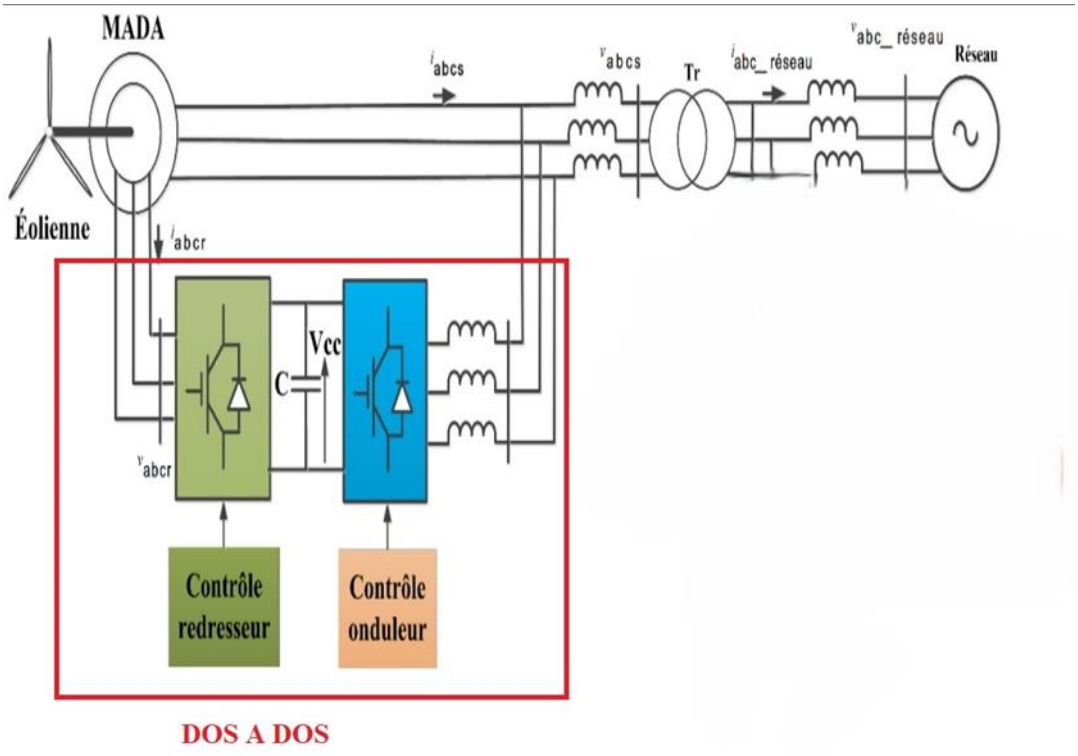


Figure (03.01) : Configuration du système de l'éolienne basée sur MADA avec le convertisseur back to back .

3.3 Modélisation Mathématique du Convertisseur back to back

La modélisation mathématique d'un convertisseur back to back est essentielle pour comprendre son comportment dynamique et concevoir des stratégies de contrôle efficaces. Ce type de convertisseur est composé de deux parties principales, un convertisseur côté réseau et un convertisseur côté machine (rotor), reliés par un bus à courant continu (DC-link). Dans cette section, nous détaillons la modélisation mathématique de chaque composant du système.

3.3.1 Modélisation du Convertisseur Côté Réseau

Le convertisseur côté réseau régule le flux de puissance entre le réseau électrique et le bus DC. Il est typiquement composé d'un pont triphasé de transistors (IGBTs) utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les équations suivantes décrivent son comportement.

a Équations de Tension et de Courant

Pour chaque phase du convertisseur, les équations de tension et de courant sont données par :

$$V_{an} = L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a + V_{dc} d_a \qquad (03.01)$$

$$V_{bn} = L_s \frac{di_b}{dt} + R_s i_b + V_{dc} d_b \qquad (03.02)$$

$$V_{cn} = L_s \frac{di_c}{dt} + R_s i_c + V_{dc} d_c \qquad (03.03)$$

Où :

V_{an} V_{bn} V_{cn} sont les tensions de phase,
i_a i_b i_c sont les courants de phase,
L_s est l'inductance de la phase,
R_s est la résistance de la phase,
V_{dc} est la tension du bus DC,
d_a d_b d_c sont les rapports cycliques de la modulation PWM pour chaque phase.

b Équation de Puissance

La puissance active échangée entre le convertisseur et le réseau est donnée par :

$$P_{grid} = \frac{3}{2}(V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c) \qquad (03.04)$$

L'équation de la dynamique du bus DC est Où :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{grid} - I_{load} \qquad (03.05)$$

C_{dc} est la capacité du bus DC,
I_{grid} est le courant fourni par le réseau,
I_{load} est le courant consommé par le convertisseur côté rotor.

3.3.2 Modélisation du Convertisseur Côté Rotor

Le convertisseur côté rotor régule le flux de puissance entre le rotor de la machine asynchrone et le bus DC. Les équations suivantes modélisent le comportement du convertisseur côté rotor.

a Équations de Tension et de Courant

Pour le convertisseur côté rotor, les équations différentielles sont :

$$V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + e_{r\alpha} \qquad (03.06)$$

$$V_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + e_{r\beta} \qquad (03.07)$$

Où :

$V_{r\alpha}$, $V_{r\beta}$ sont les tensions du rotor dans le référentiel α−β,
$i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ sont les courants du rotor,
R_r est la résistance du rotor,
L_r est l'inductance du rotor,
$e_{r\alpha}$, $e_{r\beta}$ sont les forces électromotrices induites.

b Équation de Puissance

La puissance échangée entre le rotor et le bus DC est donnée par :

$$P_{rotor} = V_{r\alpha} i_{r\alpha} + V_{r\beta} i_{r\beta} \qquad (03.08)$$

3.3.3 Modélisation du Bus DC

Le bus DC relie les deux convertisseurs et joue un rôle crucial dans le transfert de puissance. La dynamique de la tension du bus DC est décrite par :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{grid} - I_R \qquad (03.09)$$

Où :
C_{dc} est la capacité du bus DC,
I_{grid} est le courant fourni par le convertisseur côté réseau,
I_R est le courant consommé par le convertisseur côté rotor.

3.3.4 Modèle Global du Convertisseur back to back

En combinant les modèles des deux convertisseurs et du bus DC, nous obtenons un modèle global du convertisseur back to back . Les équations d'état suivantes décrivent le système complet :

a Équations d'État

$$\begin{cases} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}}(I_{grid} - I_R) \\ L_s \frac{di_a}{dt} = V_{an} - R_s i_a - V_{dc} d_a \\ L_s \frac{di_b}{dt} = V_{bn} - R_s i_b - V_{dc} d_b \\ L_s \frac{di_c}{dt} = V_{cn} - R_s i_c - V_{dc} d_c \\ L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} = V_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} - e_{r\alpha} \\ L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} = V_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - r_{r\beta} \\ L_s \frac{di_c}{dt} = V_{cn} - R_s i_c - V_{dc} d_c \\ L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} = V_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} - e_{r\alpha} \\ L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} = V_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - e_{r\beta} \end{cases} \qquad (03.10)$$

b Equations de Puissance

$$\begin{cases} P_{grid} = \frac{3}{2}(V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c) & (03.11) \\ P_{rotor} = V_{r\alpha} i_{r\alpha} + V_{r\beta} i_{r\beta} & (03.12) \end{cases}$$

Ces equations permettent de simuler et de contrôler le comportement dynamique du convertisseur back to back dans un système utilisant une MADA. La modélisation mathématique fournie ici est une base essentielle pour développer des stratégies de contrôle avancées et optimiser les performances du système [7] [12].

3.4 Structure du convertisseurs back to back

La structure de puissance, dite back to back est aujourd'hui largement utilisé afin d'adapter la fréquence des tensions rotoriques à celles du circuit starorique et donc du réseau. Son emploi est justifié par le fait qu'elle permet un fonctionnement sur quatre quadrants, ce qui signifie que le sens du transit de l'énergie peut être inversé à n'importe quel quelle instant. Par conséquent les deux convertisseurs de tension mis en œuvre peuvent fonctionner en mode redresseur ou en mode onduleur qu'ils soient connectés côté rotor ou côté réseau, et le bus continu est donc réversible.

Chacun des deux convertisseurs comporte trois bras de commutation et six interrupteurs électroniques bidirectionnels, commandable à l'ouverture et à la fermeture, de type IGBT connectés en tête bêche avec des diodes. la stratégie de commande des convertisseurs est basée sur la technique modulation de largeur l'impulsion (MLI) qui permet de limiter les harmoniques en réduisant le contenu harmonique en basse fréquence [15].

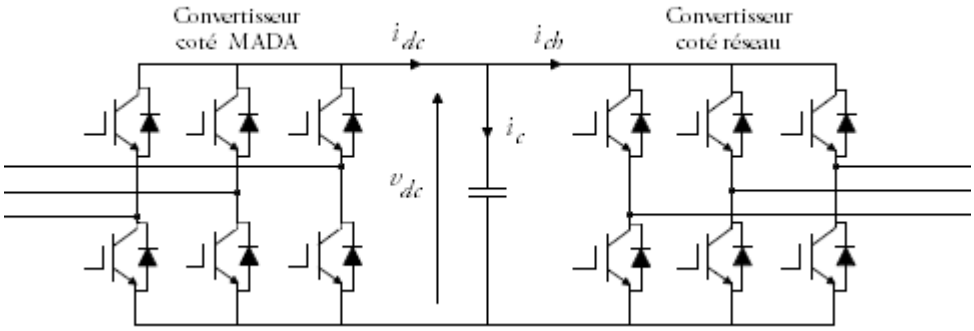


Figure (03.02): *Structure Back to Back des convertisseurs de puissance*

3.5 Contrôle du convertisseur back to back, côté redresseur et côté onduleur

3.5.1 Contrôle du côté Redresseur

Le Redresseur AC-DC convertit l'alimentation en courant alternatif AC en courant Continue DC . Son principal objectif est de maintenir une tension stable sur le bus DC tout en minimisant les harmoniques dans le courant d'entrée[11].

- **Régulation de la tension du bus DC**

Le contrôle de la tension du bus DC est essentiel pour la stabilité globale du système. Le Redresseur utilise un régulateur proportionnel intégral PI pour maintenir la tension de bus DC à une valeur de consigne prédéfinie. Le régulateur PI ajuste le rapport cyclique de la modulation par largeur d'impulsion (PWM) Pour contrôler la tension de sortie du redresser.

- **Réduction des harmoniques**

Pour minimiser Les distorsions harmonique dans le courant d'entrée, des techniques de contrôle vectoriel peuvent être employées. Cela implique la transformation du courant d'entrée et un cadre de référence synchrone permettant une régulation indépendante des composantes direct et quadrature du courant.

3.5.2 Contrôle du côté onduleur

L'onduleur DC-AC convertit la tension continue de bus DC en tension alternative. Son objectif principal est de fournir une alimentation AC de haute qualité avec des caractéristiques spécifiques de fréquence Et d'amplitude[11].

a Principe de Fonctionnement

L'onduleur DC-AC convertit la tension continue du bus DC en tension alternative. Son objectif principal est de fournir une alimentation AC de haute qualité avec des caractéristiques spécifiques de fréquence et d'amplitude.

b Contrôle de la Forme d'Onde de Sortie

Le contrôle de l'onduleur vise à générer une forme d'onde sinusoïdale pure à la sortie. Cela est réalisé en utilisant des techniques de modulation par largeur d'impulsion (PWM). Les étapes clés sont :

- Génération de la Référence Sinusoïdale : Une référence sinusoïdale est générée, correspondant à la fréquence et à l'amplitude souhaitées de la sortie.
- Comparaison avec le Signal Triangulaire : La référence sinusoïdale est comparée à un signal triangulaire de haute fréquence.
- Génération des Signaux PWM : Les points d'intersection déterminent les instants de commutation des transistors de puissance, produisant ainsi une tension de sortie sinusoïdale.

c Régulation de Courant

L'onduleur utilise également des régulateurs de courant pour contrôler les courants de sortie et garantir qu'ils suivent les références souhaitées. Le processus inclut :

- **Transformation de Clark et Park :** Les courants de sortie sont transformés en composantes d et q.
- **Contrôle Indépendant des Composantes d et q :** Les régulateurs PI ajustent les composantes d et q pour suivre les références de courant.

• **Transformation Inverse :** Les courants régulés sont transformés en courants triphasés pour générer les signaux de commande pour l'onduleur[13][7].

3.6 Applications

3.6.1 Interconnexion de Réseaux Électriques

- Couplage de Réseaux avec Différentes Fréquences
  - Permet d'interconnecter des réseaux opérant à des fréquences différentes, par exemple, 50 Hz et 60 Hz.
- Stabilisation de Réseaux
  - Améliore la stabilité des réseaux en contrôlant les flux d'énergie.
- Échange d'Énergie
  - Facilite les échanges d'énergie entre régions ou pays avec des réseaux électriques différents.

3.6.2 Systèmes de Traction Électrique

- Transport Ferroviaire
  - Utilisé dans les trains à grande vitesse pour adapter l'énergie provenant des lignes électriques aux besoins des moteurs de traction.
- Métros et Tramways
  - Convertit l'énergie pour alimenter les systèmes de transport urbain.

3.6.3 Énergies Renouvelables

- Éoliennes et Systèmes Solaires
  - Synchronise l'énergie générée avec le réseau électrique.
  - Convertit la fréquence et la tension de l'énergie produite par les éoliennes et les panneaux solaires.

3.7 Avantages

- Flexibilité et Adaptabilité
  - Capable de gérer différentes tensions et fréquences, offrant une grande polyvalence dans diverses applications.

- Qualité de l'Énergie
  - Améliore la qualité de l'énergie en réduisant les harmoniques et en stabilisant la tension et la fréquence.

- Réversibilité
  - Fonctionne dans les deux sens, permettant des échanges bidirectionnels d'énergie[16][17].

3.8 Inconvénients

- Complexité et Coût
  - Technologie complexe nécessitant des composants avancés et un contrôle précis, ce qui peut augmenter les coûts de mise en œuvre et de maintenance.

- Pertes d'Énergie
  - Malgré une efficacité généralement élevée, des pertes d'énergie se produisent inévitablement lors de la conversion.

- Maintenance
  - Nécessite une maintenance régulière pour garantir la performance et la fiabilité du système[16][17].

3.9 Applications Spécifiques et Cas Pratiques

3.9.1 Interconnexion de Réseaux Électriques

a Couplage de Réseaux avec Différentes Fréquences

Les convertisseurs back to back sont essentiels pour connecter des réseaux électriques fonctionnant à des fréquences différentes. Par exemple, ils permettent l'interconnexion entre des réseaux de 50 Hz et de 60 Hz, courants respectivement en Europe et en Amérique du Nord. Ce couplage est crucial pour faciliter le commerce d'énergie transfrontalier et améliorer la sécurité énergétique.

b Stabilisation de Réseaux

Les convertisseurs back to back jouent un rôle clé dans la stabilisation des réseaux électriques. En contrôlant les flux d'énergie entre différentes sections du réseau, ils aident à équilibrer l'offre et la demande, réduisant ainsi le risque de pannes et de fluctuations de tension.

c Échange d'Énergie

Ces convertisseurs permettent également des échanges d'énergie entre régions ou pays ayant des caractéristiques de réseau différentes. Cela est particulièrement utile dans les cas où un pays peut avoir un surplus d'énergie renouvelable qu'il peut vendre à ses voisins, optimisant ainsi l'utilisation des ressources disponibles.

3.9.2 Systèmes de Traction Électrique

a Transport Ferroviaire

Dans le transport ferroviaire, les convertisseurs back to back sont utilisés pour adapter l'énergie provenant des lignes électriques aux besoins spécifiques des moteurs de traction

des trains à grande vitesse. Cela permet d'assurer une performance optimale des trains tout en minimisant les pertes d'énergie.

b Métros et Tramways

Pour les métros et les tramways, les convertisseurs back to back jouent un rôle crucial en convertissant l'énergie électrique pour alimenter les systèmes de transport urbain. Ils permettent de garantir une alimentation stable et fiable, essentielle pour le bon fonctionnement des services de transport public.

c Énergies Renouvelables

Éoliennes

Les convertisseurs back to back sont utilisés dans les parcs éoliens pour convertir l'énergie générée par les turbines en une forme compatible avec le réseau électrique. Ils assurent que l'énergie produite par les éoliennes, souvent de nature variable, peut être synchronisée et injectée efficacement dans le réseau.

Systèmes Solaires

De manière similaire, les convertisseurs back to back sont utilisés dans les installations solaires pour convertir l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Ils permettent de réguler la tension et la fréquence de l'énergie produite pour qu'elle puisse être utilisée efficacement par le réseau électrique ou stockée pour une utilisation ultérieure.

3.10 Avantages Techniques

- Contrôle Précis de l'Énergie

  - Les convertisseurs back to back permettent un contrôle précis de l'énergie, ce qui est essentiel pour des applications nécessitant une qualité de service élevée.

- Réduction des Harmoniques

  - Ces convertisseurs contribuent à la réduction des harmoniques dans le système électrique, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique et réduisant les risques de perturbations pour les équipements sensibles.

- Efficacité Énergétique

  - Bien que des pertes d'énergie soient inévitables, les technologies modernes de convertisseurs back to back sont conçues pour maximiser l'efficacité énergétique, minimisant ainsi les pertes et optimisant l'utilisation de l'énergie disponible[16][17].

3.11 Défis et Solutions

- Complexité de la Conception

  - La conception et la mise en œuvre des convertisseurs back to back sont techniquement complexes. Des solutions avancées de modélisation et de simulation sont utilisées pour optimiser la conception et minimiser les coûts.

- Coût Élevé

  - Le coût initial des convertisseurs back to back peut être élevé en raison des composants de haute qualité nécessaires et de la technologie avancée impliquée. Cependant, les économies réalisées sur le long terme grâce à une meilleure efficacité énergétique et à une maintenance réduite peuvent compenser ces coûts initiaux.

- Maintenance

  - La maintenance des convertisseurs back to back doit être effectuée régulièrement pour garantir leur performance optimale. Les développements récents en matière de diagnostics en ligne et de maintenance prédictive permettant de réduire les coûts et les interruptions associées à la maintenance.

3.12 Les résultats des simulations

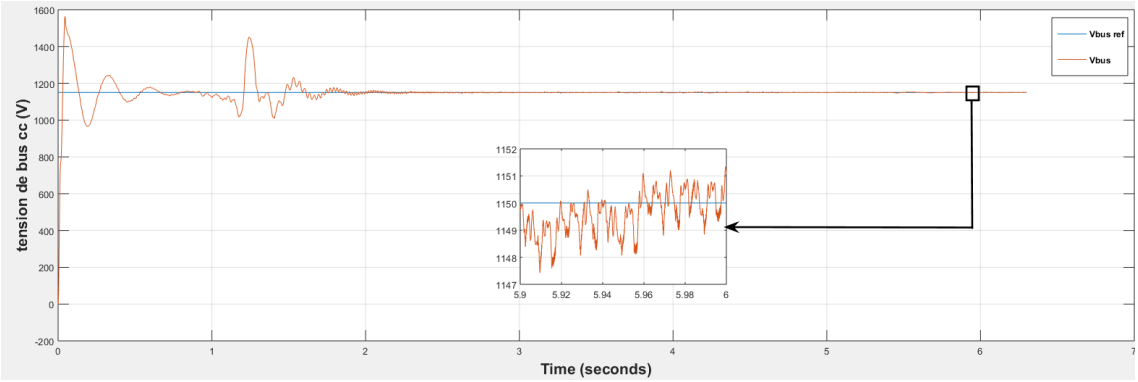


Figure (03.03): *graphe de tension de bus cc reference au stator Vbus et Vbus ref*

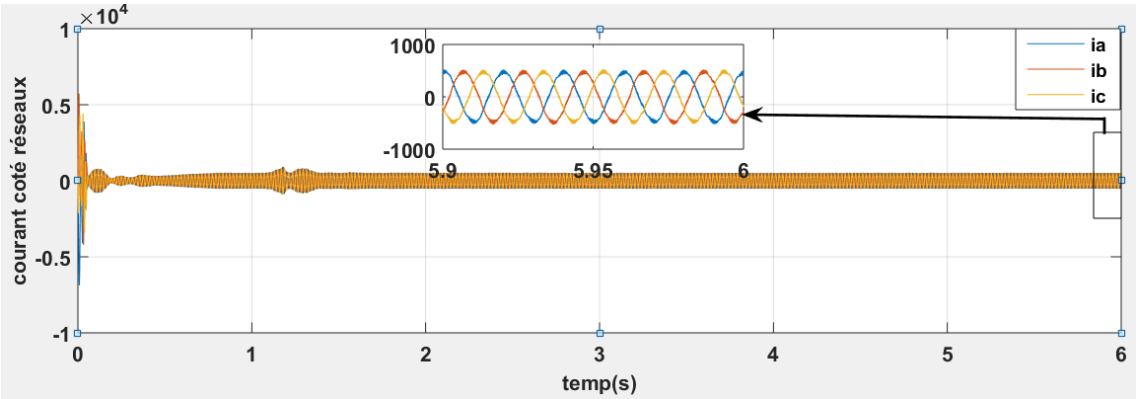


Figure (03.04): *graphe de courant coté réseaux Ig (A)*

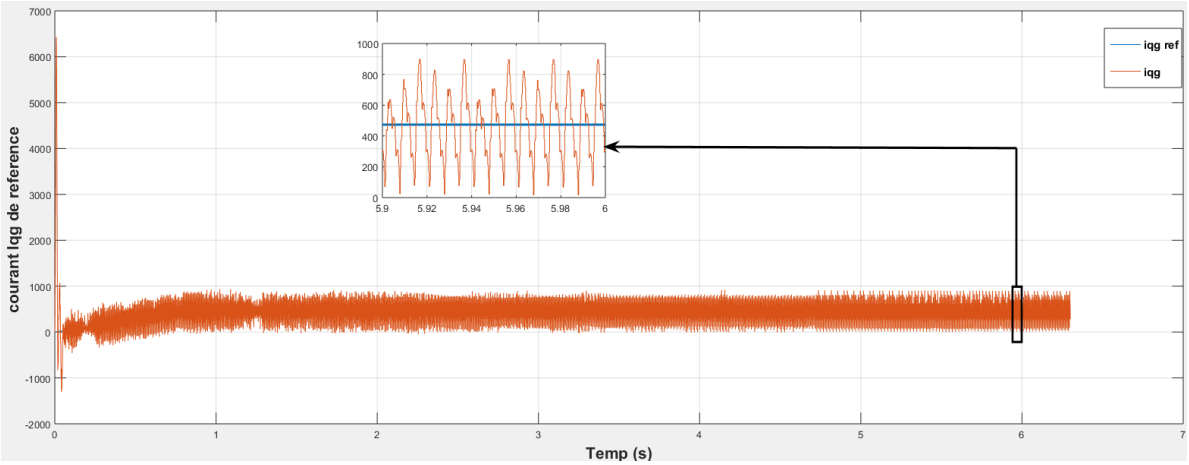


Figure (03.05): *graphe de courant Iqg (A)*

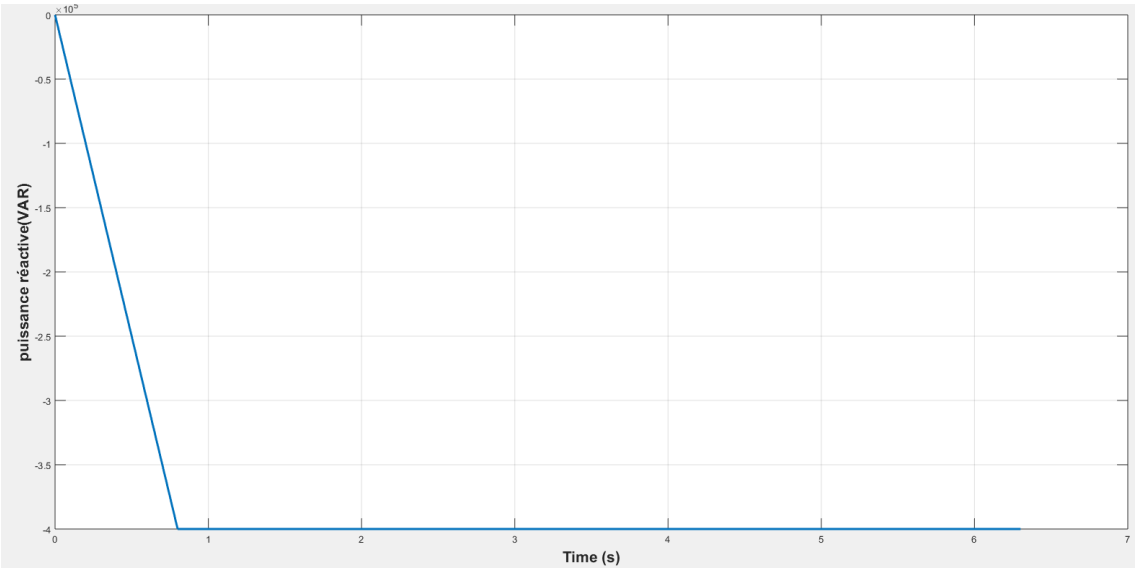


Figure (03.06): *graphe de puissance réactive (VAR)*

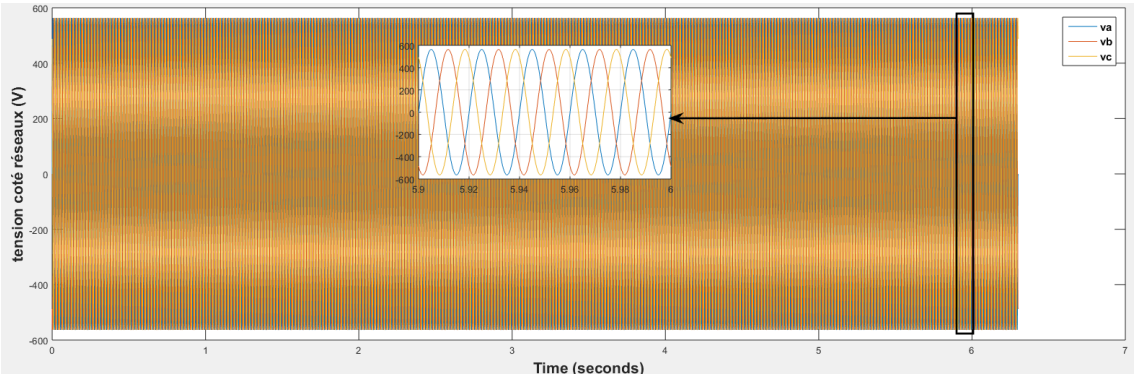


Figure (03.07): *graphe de tension du réseau Vs (v)*

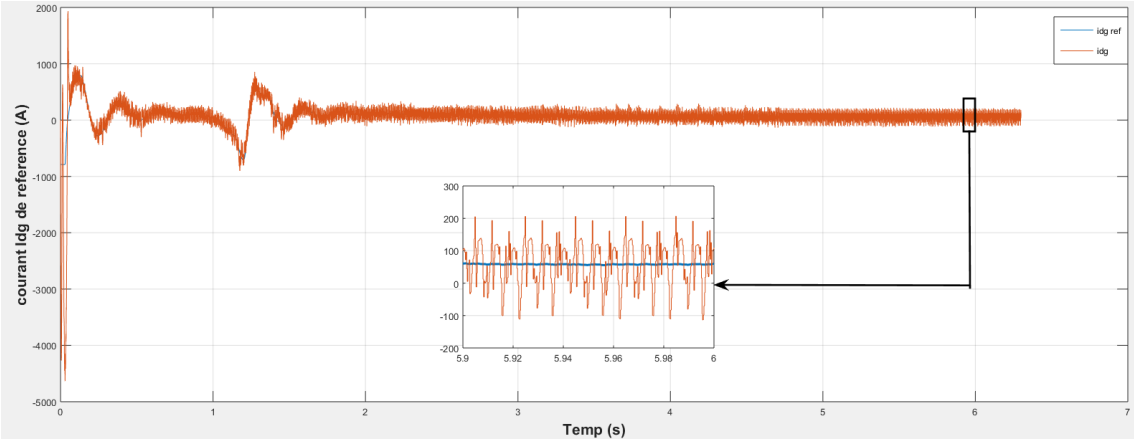


Figure (03.08): *graphe de courant Idg (A)*

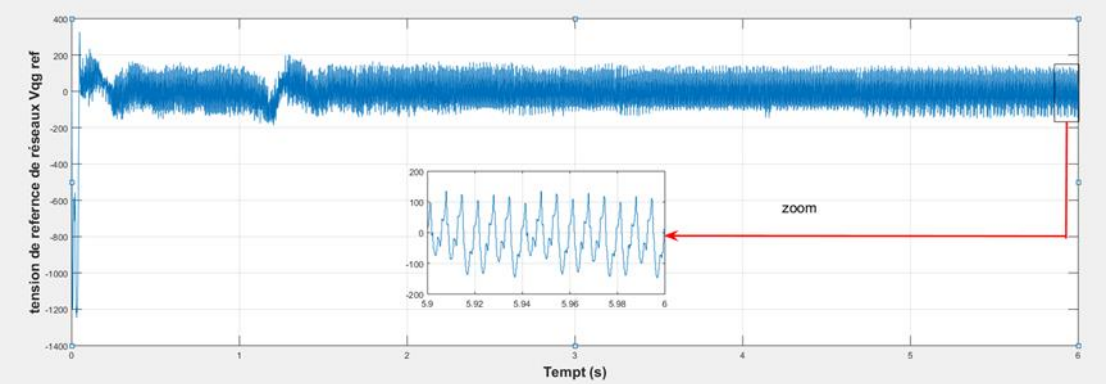


Figure (03.09): *graphe de tension de reference coté réseaux Vqg (v)*

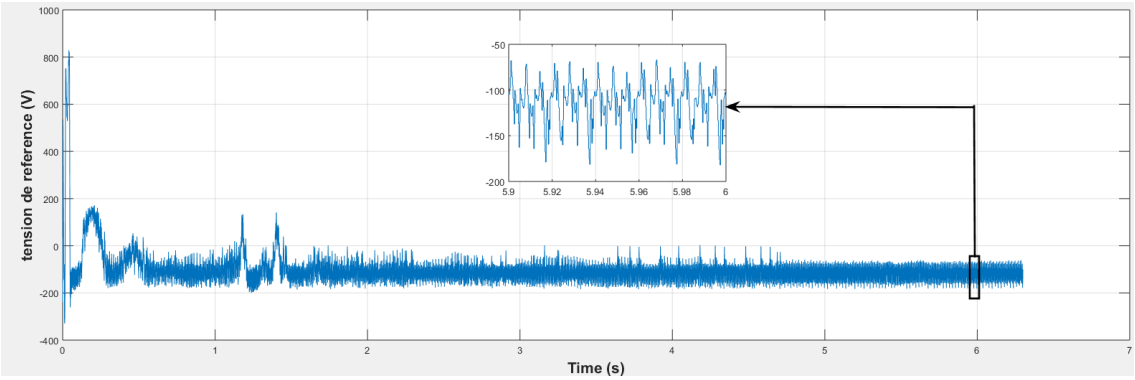


Figure (03.10): *graphe de tension de reference coté réseaux Vdg (v)*

Figure(**03.03**): Le graphique montre les variations de la tension du bus DC référée au stator (Vbus) par rapport à sa référence (Vbus ref). Les oscillations régulières et périodiques de Vbus autour de Vbus ref indiquent des fluctuations dans la tension du bus DC, ce qui peut être dû à des variations de la charge ou des perturbations dans le système. L'amplitude des oscillations est notable et pourrait affecter la performance globale de l'éolienne MADA si elle n'est pas correctement gérée. La stabilité du bus DC est cruciale

pour le bon fonctionnement du convertisseur dos à dos, car des variations excessives peuvent entraîner des inefficacités ou même des dysfonctionnements du système. Il serait pertinent d'examiner les causes de ces oscillations et d'évaluer si des améliorations peuvent être apportées au système de contrôle pour atténuer ces fluctuations et stabiliser davantage la tension du bus DC.

Figure (03.04) : Le graphe montre l'évolution des courants dans une grille codée pour les phases i_a i_b et i_c sur 7 secondes. Initialement, les courants subissent de fortes fluctuations atteignant des valeurs de crête de 6000 A et -8000 A, indiquant une mise en marche ou une perturbation. Après environ 1 seconde, les courants se stabilisent autour de zéro, oscillant de manière régulière avec une amplitude réduite. Les courants i_a i_b et i_c sont quasiment superposés après la période transitoire, ce qui suggère un système de grille équilibré et symétrique.

Figure (03.05) : Le graphique présente les performances du courant Iqg (A) en fonction du temps (secondes). Deux séries de données sont tracées : la référence *iqg ref* (en bleu) et le courant réel i (en orange). Sur l'axe des ordonnées, les valeurs varient entre -2000 et 7000 ampères, tandis que l'axe des abscisses s'étend de 0 à 7 secondes. Au début de l'intervalle de temps, il y a une oscillation notable dans le courant iqg qui se stabilise rapidement autour de zéro, avec de petites fluctuations continues tout au long de la période observée. Le comportement montre que le courant suit de près la référence après une période initiale d'instabilité, indiquant une bonne régulation du courant autour de la valeur de consigne.

Figure (03.06) : Le graphique montre l'évolution de la puissance réactive en fonction du temps, avec une échelle de temps très fine centrée autour de 0.8 secondes. La puissance réactive, représentée par "Qg ref", est mesurée en unités de 105105. La courbe présente un palier stable à environ -3.999 unités, suivi d'une brève chute à environ -4.001 unités avant de revenir à un palier stable légèrement plus bas que le précédent. Cette transition indique une modification brusque mais contrôlée de la puissance réactive, suggérant une intervention pour ajuster ou stabiliser le système à ce moment précis.

Figure (03.07) : Le graphe montre les tensions de phase (va_s, vb_s, vc_s) du réseau électrique sur une période de temps allant de 0 à 0.1 secondes.

Les tensions des trois phases sont sinusoïdales, ce qui est attendu pour un système triphasé équilibré. Les ondes semblent avoir une forme pure sans distorsions visibles.

Les amplitudes des trois phases semblent être égales et environ 500 V. Cela indique un système symétrique, où les tensions de chaque phase ont la même amplitude maximale et minimale.

Les tensions oscillent à une fréquence qui semble être de 50 Hz ou 60 Hz, ce qui est typique pour des réseaux électriques. Pour déterminer la fréquence exacte, on peut mesurer la période d'une oscillation complète (par exemple, le temps entre deux pics consécutifs).

Les trois courbes sont décalées de 120 degrés les unes par rapport aux autres, ce qui est typique pour un système triphasé équilibré. Ce décalage assure une puissance constante et équilibrée dans le système.

Les légendes (va_s, vb_s, vc_s) correspondent respectivement aux tensions de phase a, b, et c du côté réseau. Ces courbes indiquent que toutes les phases fonctionnent correctement et en synchronisation.

Figure (03.08) : Le graphique présente le courant côté réseau (idg) et sa référence (idg ref)Initialement, il y a des oscillations et un pic significatif, indiquant une phase transitoire typique lors de la mise en route ou de variations brusques de conditions comme des rafales de vent. Ces oscillations s'atténuent rapidement, et le courant se stabilise autour de la valeur de référence après environ 2 secondes. La correspondance étroite entre le courant réel et la référence après cette période démontre l'efficacité du contrôleur du convertisseur à maintenir le courant désiré et à réguler la puissance injectée dans le réseau. Cette performance souligne la robustesse du système face aux perturbations et sa capacité à assurer une injection stable et de haute qualité de la puissance éolienne dans le réseau électrique.

Figure (03.09) : Le graphe montre la tension de référence Vqg en fonction du temps : Au début du graphique, entre 0 et 1 seconde, il y a une variation transitoire significative de la tension, atteignant environ -1200 V. Ces transitoires peuvent être dus au démarrage du système ou à des changements brusques dans les conditions de fonctionnement. Après cette période initiale, la tension semble se stabiliser autour de 200 V, avec des fluctuations mineures. Cette stabilisation indique que le contrôleur du système a réussi à atteindre un état stable Les fluctuations persistantes, même après la stabilisation, peuvent être attribuées à des perturbations dans le réseau ou à des imperfections dans le contrôle. Il serait utile d'analyser ces fluctuations pour s'assurer qu'elles ne dépassent pas les tolérances acceptables pour la qualité de l'énergie.

Figure (03.10) : Le graphe montre la tension de référence Vdg en fonction du temps :Au début, entre 0 et 0,5 seconde, il y a un pic important atteignant environ 800 V. Ce pic initial est souvent dû à un changement brusque, tel que la mise sous tension du système. Entre 0,5 et 2 secondes, la tension subit des oscillations significatives, montrant un comportement instable dans cette période. Ces oscillations peuvent indiquer une réponse transitoire à des perturbations ou des ajustements dans le système . Après 2 secondes, la tension se stabilise autour de 0 V, avec des fluctuations de moindre amplitude. La stabilité de la tension après cette période indique que le système a atteint un état d'équilibre.

3.13 Fonctionnement sous tension de réseau déséquilibre

Dans certains scénarios et applications, la MADA peut être obligé de fonctionner sous une tension de réseau déséquilibrée. Cela pourrait être de manière permanente, par exemple, dans des réseaux faibles où des charges non linéaires produisent des déséquilibres de tension du réseau, ou bien, pendant une période limitée lors de défauts de réseau, où la tension vue par la MADA pourrait être déséquilibrée. Dans tous les cas,

le déséquilibre de tension affecte directement le fonctionnement du MADA, qui, si aucune autre mesure n'est prise, dégrade ses performances, par exemple par l'apparition d'oscillations de couple et d'échanges déséquilibrés de courants statoriques.

Comme démontré ci-après, la plupart des problèmes provoqués par les déséquilibres peuvent être surmontés en introduisant une quantité précise de séquence négative dans les références de courant du rotor. De cette manière, les références de courant sont l'addition de deux séquences : l'une synchronisée avec la séquence positive de la tension du réseau, et l'autre synchronisée avec la séquence négative. Afin de garantir que les deux séquences soient bien régulées, il est nécessaire de contrôler chaque séquence indépendamment. La boucle de contrôle d'origine est puis remplacée par deux boucles de contrôle : la première travaillant dans un référentiel tournant positif, et l'autre travaillant dans un référentiel tournant inversement. Cette philosophie de contrôle est appelée technique de contrôle à double vecteur. La figure (03.10) illustre un exemple de contrôle double vecteur pour une MADA . Les boucles de courant du rotor suivent les mêmes bases du contrôle vectoriel classique. Les termes de couplage ne sont pas inclus au niveau des boucles de contrôle dans cet exemple, mais pourraient également être utilisés (à noter que la présence de la séquence négative nécessiterait alors d'être recalculée). Le courant rotorique mesuré doit être divisé en deux séquences avant d'être introduit dans les régulateurs de courant. La décomposition séquentielle et le contrôle double vecteur lui-même nécessitent l'estimation de l'angle θr. En général, utilisant la même PLL ou, comme le préfèrent certains auteurs, en utilisant une méthode de synchronisation plus sophistiquée qui gère les séquences positives et négatives de la tension du stator, synchronisées avec la séquence positive. Les références de courant positif et négatif du rotor doivent être calculées à partir des références de puissance active et réactive du stator, comme décrit ci-après. Notez que si l'application l'exige, la référence de puissance active peut provenir de la boucle de contrôle de vitesse, alors que la puissance réactive dans cet exemple n'inclut pas de contrôle en boucle fermée, comme utilisé dans la section précédente. Les références positives et négatives de courant rotorique peuvent normalement être générées afin de répondre à différents objectifs de minimisation : oscillations de puissance statorique, séquence négative des courants statoriques ou rotoriques, tension rotorique, etc. Dans cette section, une seule de ces stratégies est étudiée en détail ; la minimisation de la séquence négative des courants statoriques, qui est une solution typique, adoptée dans les éoliennes basées sur MADA lors de défauts de tension. Ainsi, dans un cas général, si aucune mesure particulière n'est prise, des tensions et des courants statoriques déséquilibrés provoquent des oscillations des puissances active et réactive du stator d'un double de la fréquence du réseau. Les puissances moyennes sont fournies par les éléments suivants expression matricielle (1) et (2)

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} + P_{scos}\cos(2\omega_s t) + P_{ssin}\sin(2\omega_s t) \\ Q_s = Q_{s0} + Q_{scos}\cos(2\omega_s t) + Q_{ssin}\sin(2\omega_s t) \end{cases} \quad (03.01)$$

$$\begin{bmatrix} P_{s0} \\ Q_{s0} \end{bmatrix} = \frac{3}{2}\begin{bmatrix} v_{ds1} & v_{qs1} & v_{ds2} & v_{qs2} \\ v_{qs1} & -v_{ds1} & v_{qs2} & -v_{ds2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \end{bmatrix} \qquad (03.02)$$

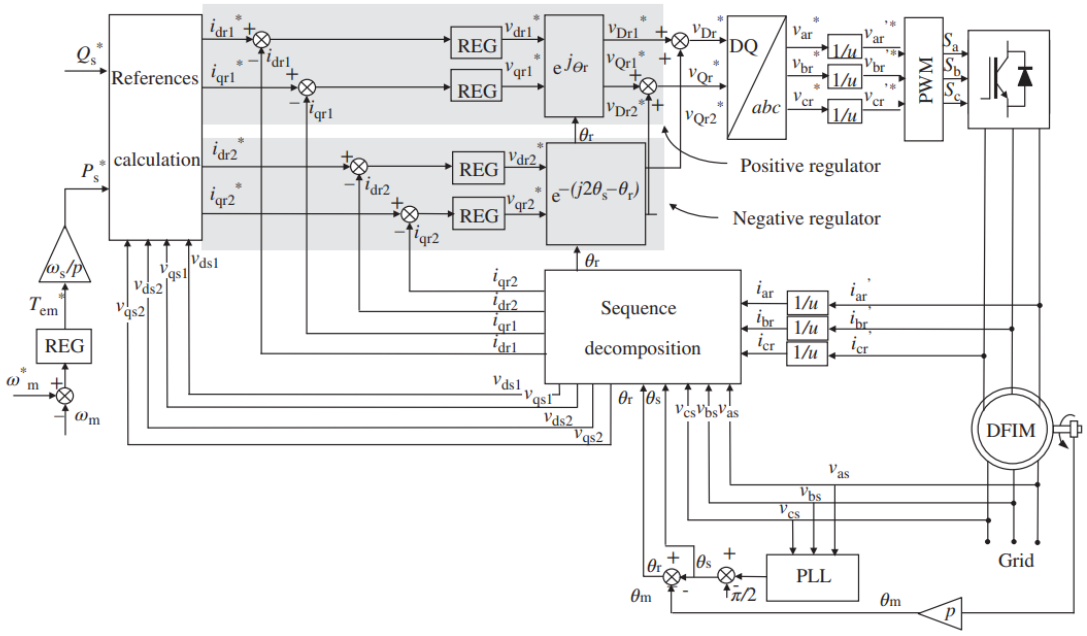


Figure (03.11): *Contrôle double vecteur pour une MADA*

Dans lequel une séquence négative nulle du courant statorique est souhaitée. Ainsi, en inversant cette équation matricielle et en rendant i_{ds2} et i_{qs2} nuls, les courants positifs du stator sont obtenus. Une fois les courants statoriques obtenus, alors en utilisant l'expression du modèle (3) et qui relie les courants statoriques et rotoriques et en supposant que le flux statorique est en quadrature avec la tension statorique donne par l'equation (4):

$$\vec{\Psi}_s^s = L_s\vec{i}_s^s + L_m\vec{i}_s^s \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \Psi_{as} = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha s} \\ \Psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta s} \end{cases} \qquad (03.03)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \\ i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_s L_m}\begin{bmatrix} v_{qs1} \\ -v_{ds1} \\ -v_{qs2} \\ v_{ds2} \end{bmatrix} - \frac{L_s}{L_m}\begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \end{bmatrix} \qquad (03.04)$$

Par conséquent, en combinant les deux dernières expressions, les références de courant du rotor, qui réalisent l'élimination inverse des courants du stator, sont obtenues (5) :

$$\begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \\ i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} = -\frac{2}{3}\frac{L_s}{L_m}\frac{1}{v_{ds1}^2+v_{qs1}^2}\begin{bmatrix} v_{ds1} & v_{qs1} \\ v_{qs1} & -v_{ds1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} P_{s0} \\ Q_{s0} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_s L_m}\begin{bmatrix} v_{qs1} \\ -v_{ds1} \\ -v_{qs2} \\ v_{ds2} \end{bmatrix} \qquad (03.05)$$

Ainsi, cette expression est directement substituée dans le bloc « calcul de référence » du schéma bloc général de double commande de Figure(03.10) . En cela, P_{s0} et Q_{s0} sont les références de puissance active et réactive du stator P_s^* et Q_s^*, qui sont à une valeur moyenne et oscillent comme décrit par l'expression (6). Notez que pour les boucles de courant, ainsi que pour la génération de référence de tension, une décomposition de séquence doit être effectuée. Cette tâche est représentée graphiquement dans la Figure(03.11). Lors de la décomposition et de l'utilisation de la transformation rotationnelle, des oscillations au double de la fréquence apparaissent qu'il faut supprimer pour obtenir un fonctionnement acceptable des boucles. Ceci peut être réalisé en utilisant des filtres coupe-bande, des filtres passe-bas ou une méthode d'annulation du signal numérique[18].

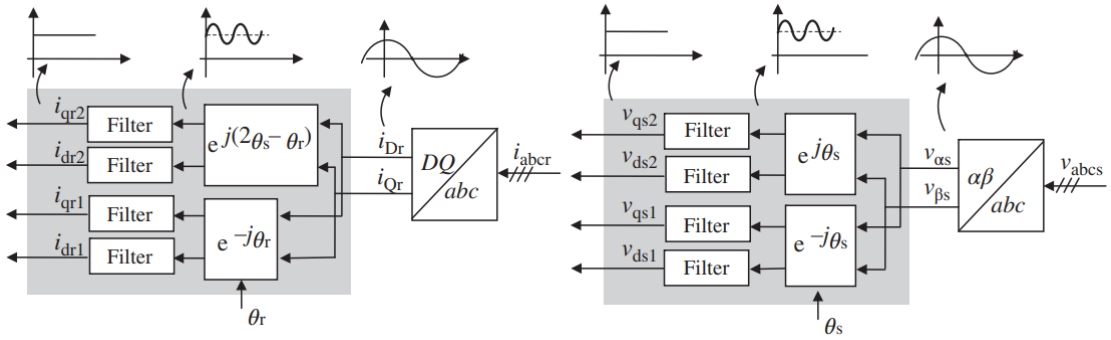


Figure (03.12): Décomposition de séquence (Sequence decomposition)

$$\varepsilon_{\psi_S} = \frac{\psi_{\alpha s}^{ref}\psi_{\beta s}^{est} - \psi_{\beta s}^{ref}\psi_{\alpha s}^{est}}{\overrightarrow{\psi}_s^{ref}\overrightarrow{\psi}_s^{est}} \qquad (03.06)$$

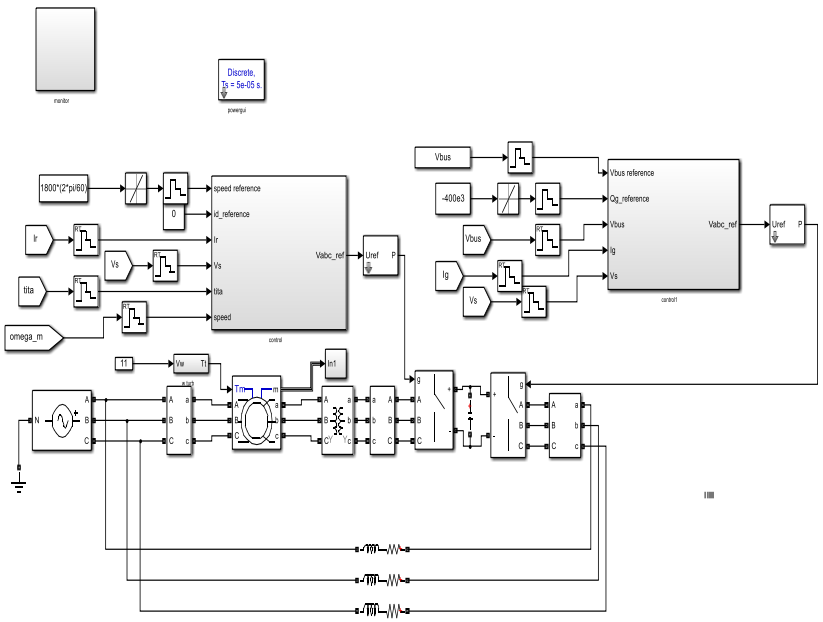


Figure (03.13) : *schém de block simulink*

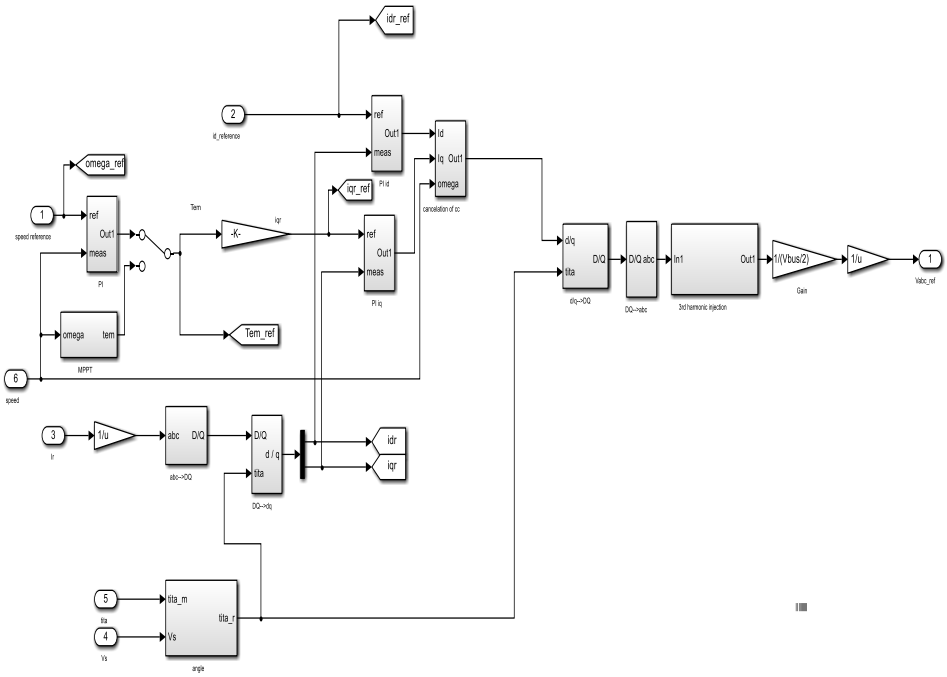


Figure (03.14) : schéma de block controle (rotor side)

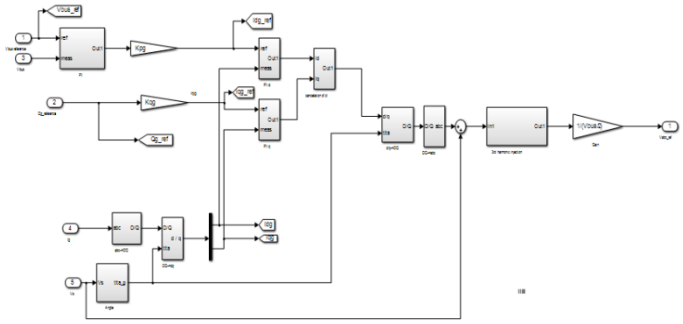


Figure (03.15): *schéma de block controle 1 (grid side)*

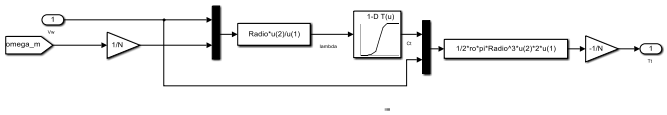


Figure (03.16): *schéma de block turbine*

3.14 Résultats de THD

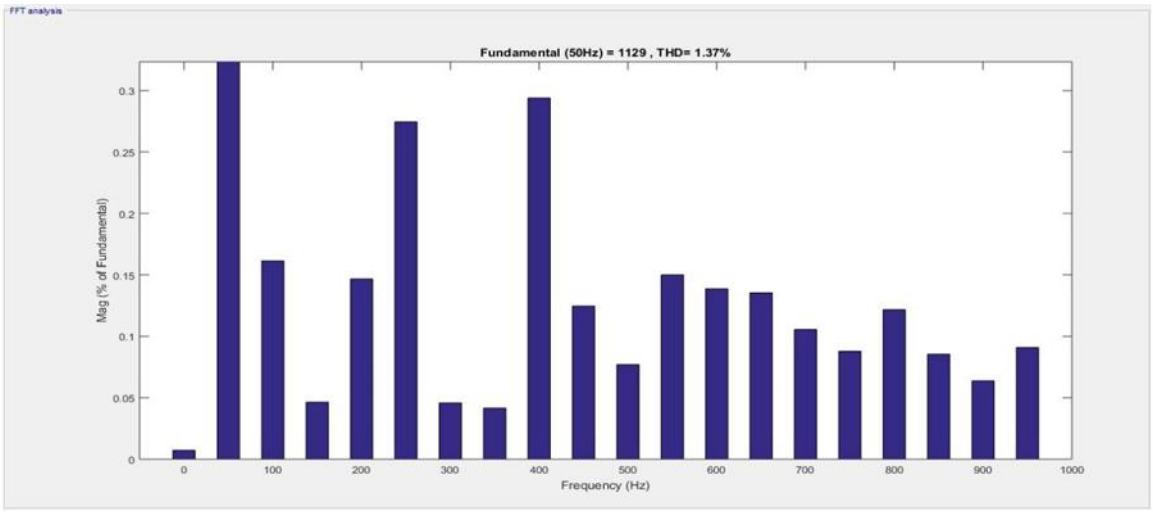


Figure (03.16): *THD de courant statorique Is* **.**

THD Is = 1.37%

.

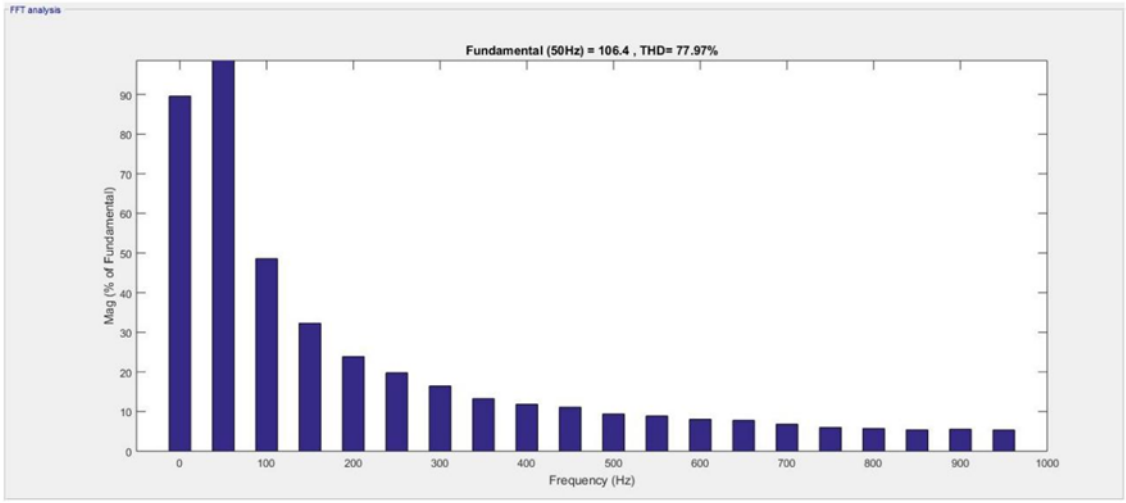


Figure (03.17): *THD de courant rotorique Ir avant le convertisseur back to back*

THD Ig= 77.97 %

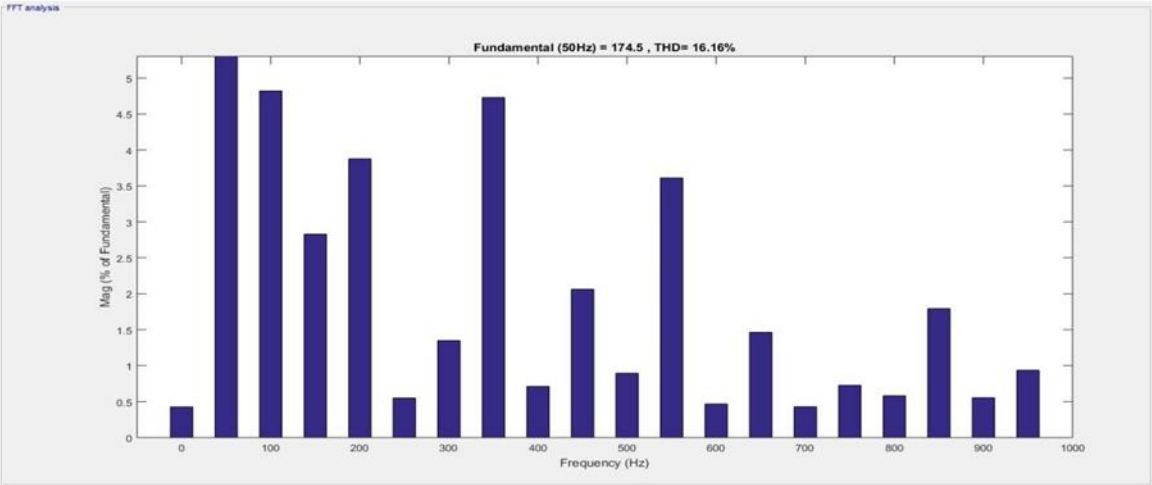


Figure (03.18): *THD courant rotorique Ig après le convertisseur back to back*

THD Ir=16.16%

Si on ajoute dans la commande du convertisseur back to back la méthode d'observation pour le courant rotorique sans utilisé les capteurs de vitesse pour lma MADA .

Le courant rotorique va s'alisseé et le THD demenue jusqu'à 3%

- ## Comparison entre Ir et Ig (avant et après)

Les graphiques montrent une analyse FFT des courants rotorique avant (Ir) et après (Ig) le convertisseur back to back. Avant le convertisseur, le courant présente une fréquence fondamentale de 50 Hz avec une magnitude de 106.4% et un THD élevé de 77.97%, indiquant une forte présence d'harmoniques. Après le convertisseur, la fréquence fondamentale reste à 50 Hz, mais avec une magnitude augmentée à 174.5%, et le THD est considérablement réduit à 16.16%. Cela démontre que le convertisseur back to back est efficace pour atténuer les harmoniques et améliorer la qualité du courant, en fournissant un signal plus propre et stable au réseau. La réduction des harmoniques et l'augmentation de la magnitude de la fondamentale après le convertisseur reflètent une meilleure performance et une plus grande efficacité du système global.

- ## Résistances crowbar

Les résistances crowbar sont des sets de résistance à trois phases qui sont reliées aux enroulements du rotor du générateur d'induction double (DFIG), tel qu'un générateur d'énergie éolienne.

Les résistance Crowbar sont utilisés pour éviter d'endommager les circuits transducteurs fixés au côté du rotor lorsqu'un défaut se produit dans le réseau. Le convertisseur de puissance MADA , dont la limite de surintensité est définie, nécessite une attention particulière lors de défauts dans le réseau. Si le courant du rotor ou la tension (DC) du circuit intermédiaire atteint la valeur de seuil, les résistances Crowbar coupent le convertisseur pour empêcher le générateur de se transformer en une machine à induction à cage d'écureuil. Grâce aux résistances Crowbar, la MADA pourrait rester connecté au réseau et poursuivre son fonctionnement.

Les valeurs des résistances Crowbar doivent être suffisamment hautes pour limiter le courant de court-circuit du rotor et elles doivent aussi être suffisamment basses pour éviter une tension trop élevée dans le circuit du rotor. La résistance Crowbar doit être conçue avec une faible inductance et une capacité de gérer des courants élevés de courtes durée.

3.15 Conclusion

Ce chapitre a détaillé le concept. La modalisation mathématique et les stratégies de contrôle de convertisseur back to back . Nous avons illustré comme comment ces convertisseurs permettant de gérer efficacement. L'énergie produite par les éoliennes est à est de garantir une injection stable et de haute qualité dans le réseau électrique. Ces aspects techniques ne sont mieux équipés pour aborder dès les défauts liés. A l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques modernes.

Conclusion générale

Cette étude s'est concentrée sur l'analyse et la simulation d'une éolienne équipée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA), connectée au réseau à travers un convertisseur back to back . L'objectif principal était de comprendre les dynamiques de la MADA et de développer des stratégies de contrôle efficaces pour optimiser la production d'énergie et assurer la stabilité du système.

Dans le premier chapitre, les généralités sur les éoliennes ont été présentées. Ce chapitre a fourni un aperçu des différents types d'éoliennes, de leur fonctionnement, de leur intégration dans le réseau électrique et de leur rôle croissant dans la transition énergétique mondiale. Les éoliennes, en particulier celles utilisant la technologie MADA, offrent une flexibilité opérationnelle et une efficacité énergétique qui les rendent idéales pour une large gamme de conditions de vent.

Le deuxième chapitre a abordé la modélisation et le contrôle de l'éolienne avec MADA. La modélisation mathématique a permis de représenter précisément les dynamiques du système, incluant les équations différentielles décrivant le comportement du rotor et du stator. Des techniques de contrôle avancées, ont été mises en œuvre pour réguler le flux et le couple, améliorant ainsi la performance globale de la machine. Les stratégies de contrôle ont été conçues pour répondre aux variations de la vitesse du vent et aux exigences de puissance réactive du réseau.

Le troisième chapitre a analysé en détail le convertisseur back to back connecté au réseau. La régulation de la tension du bus DC, essentielle pour la stabilité du système, a été examinée, ainsi que les techniques de réduction des harmoniques et la génération de formes d'onde sinusoïdales pour une injection efficace de courant dans le réseau. Les simulations numériques réalisées avec MATLAB/Simulink ont permis de valider les modèles théoriques et de démontrer l'efficacité des stratégies de contrôle proposées.

Les résultats obtenus montrent que l'optimisation des performances des éoliennes MADA repose sur une compréhension approfondie des dynamiques de la machine et une maîtrise des techniques de conversion et de contrôle de puissance. Les simulations ont révélé que les méthodes de contrôle développées permettent de maintenir la stabilité du système, de maximiser l'efficacité énergétique et de minimiser les perturbations sur le réseau électrique.

Cette étude contribue significativement à la recherche et au développement des technologies éoliennes, offrant des solutions pratiques pour améliorer la stabilité et la

qualité de l'énergie injectée dans le réseau. Elle soutient également la transition vers des sources d'énergie renouvelable, en favorisant l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques de manière efficace et fiable.

En conclusion, les travaux réalisés dans ce mémoire démontrent que les éoliennes MADA, associées à des convertisseurs back to back bien contrôlés, constituent une solution prometteuse pour la production d'énergie renouvelable. Ils permettent une intégration harmonieuse de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, tout en assurant une performance élevée et une grande fiabilité. Ces résultats encouragent à poursuivre les recherches dans ce domaine, afin de continuer à améliorer les technologies éoliennes et à soutenir la transition vers un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

bibliographie

[1] **Adam Mirecki** " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance" thèse de doctorat Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIHT Unité Mixte de Recherche CNRS Nº 5828 année 2005 .

[2] **FNANE Malikaa , BOUABDELLI Wissam , OULDMOKHTAR Lynda** "Application de l'onduleur à trois niveaux dans un système éolien à base d'une MADA avec la commande de backstepping " Memoire de fin d'etudes pour l'obtention du diplôme de Master université IBN-KHALDOUNDE tiaret promotion 2016/2017 .

[3] **Frédéric POITIERS** " etude et commende de generatrice asynchrone pour l'utilisation de l'energie éolienne Machine asynchrone à cage autonome Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseaux " Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes Le 19 décembre 2003

[4] Global Wind Report 2023 https://gwec.net/

[5] **DRICHE Samira DJEBRANI Hakim DJEMAI Djaml** " Modélisation et Simulation d'un Générateur Eolien Connecté au Réseau " Mémoire De fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique année 2007/2008 .

[6] **Khelfat Lotfic, Maataoui Lakhdar** "Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée " memoire de master université BADJI MOKHTAR- ANNABA juin 2017.

[7] Gonzalo Abad " doubly fed induction machine " (modeling and control for wind energy generation) livre par Institute of Electrical and Electronics Engineers **IEEE** copyright 2011 **.**

[8] Bimal K. Bose. "Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends" livre Deuxième édition 2020

[9] BOUFADENE Mourad "Modeling and Control of AC Machine using MATLAB/Simulink" livre annee 2018.

[10] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins "Power Electronics: Converters, Applications, and Design" livre october 2002

[11] Shahriyar Kaboli, Dr. Frede Blaabjerg, Saeed Peyghami "Resilient Power Electronic Systems" August 2022 **.**

[12] Mario García-Sanz et Constantine H. Houpis "Wind Energy Systems: Control Engineering Design" livre peremiere edition 12 fevrier 2012 .

[13] R. Pena, J.C. Clare et G.M. Asher, "Modeling and Control of a Wind Turbine with a Doubly Fed Induction Generator" article publié dans IEEE

[14] Janaka Ekanayake, Lee Holdsworth, Xueguang Wu , Nick Jenkins "Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines" publié dans IEEE juin 2003

[15] LOUCIF MOURAD "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur**"** these de doctorat 3ème Cycle université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen le 12 / 05 / 2016

[16] K. R. Padiyar "HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions **"** livre copyright 1990 new age international reprint 2005

[17] Mohan, Ned " Power electronics : converters, applications, and design**"** publier par New York : Wiley 1989

[18] Abdelkader Morsli, Fayçal Hadj Mihoub Sidi Moussa, Abdelhalim Tlemçani, Hassan Nouri, Hocine Belmili "A Comparison Analysis Between Two and Three Levels Inverter to Grid-Connected Used the Photovoltaic System **"** publié dans IEEE février 2023