



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N°d'enregistrement

Université de Ghardaïa

.../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière :

Spécialité : Automatique et systèmes

Thème

*Commande vectorielle d'une machine
Asynchrone à double alimentation*

Présenté par :

KHALIL Ahmed adbessalame

Mohamed Marouf

Soutenue publiquement le : 20/06/2023

Devant le jury composé de :

BOUCHELGA Fatma

MCA

Univ. Ghardaïa

Président

BOURAGHDA Skander

MAA

Univ. Ghardaïa

Examineur

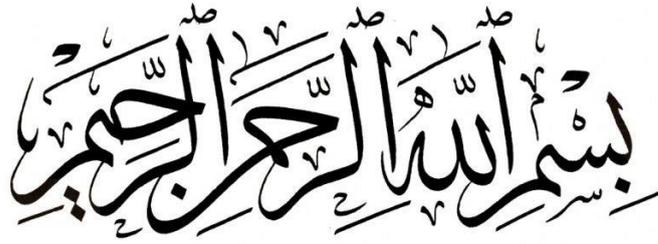
DJELLOULI Tahar

MCB

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2022/2023



Dédicaces

*Premièrement, je remercie Allah, le Bon Dieu, qui m'a accordé
L'ambition, le courage, la santé et la détermination pour accomplir ce*

Modeste travail. Je le dédie :

À mes parents, ma mère et mon père, pour leur patience, leur amour,

Leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon parcours.

*À mes chères sœurs et frères, qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant
ces années d'études.*

À tous mes amis et à tous ceux qui m'aiment,

Je vous remercie d'être toujours présents pour moi."

Ahmed

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant qui m'a guidé et aidé à

Accomplir ce travail

Je dédie humblement ce travail à ma mère (Allah Yar7mhaa), à mon père.

À ma grand-mère, à tous mes frères.

À tous mes amis, à tous ceux qui m'ont soutenu, encouragé tout au long

De mon parcours éducatif, et à tous mes amis qui ont partagé avec moi

les bons moments ainsi que les mauvais.

Et à mon ami Ahmed.

À tous ceux qui aiment Mohammed et à ceux que Mohammed aime.

Mohamed

Remerciements

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre cher encadreur, Dr. DJELLOULI Tahar, pour son suivi attentif et son immense soutien tout au long de cette période de projet. Nous le remercions sincèrement pour ses conseils précieux et sa disponibilité constante.

Nous tenons également à adresser nos chaleureux remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail avec bienveillance.

Nous ne voulons pas manquer l'occasion de remercier tous les enseignants et le personnel de l'université de Ghardaïa, en particulier ceux de la section électromécanique, pour leur aide inestimable, leurs conseils précieux et l'intérêt qu'ils portent à notre formation.

Enfin, nous souhaitons exprimer nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet. Leur soutien et leur implication ont été essentiels à notre réussite.

Nos sincères remerciements à tous.

SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	IV
Notations et Symboles.....	VII
Introduction Générale	1

CHAPITRE I : Généralités sur la machine Asynchrone à Double Alimentation

I.1.Introduction	3
I.2.Bref Historique de la MADA	3
I.3.Description simplifiée de MADA	4
I.4.Principe de fonctionnement de la MADA.....	5
I.5.Modes de fonctionnement de la MADA	6
I.5.1.Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	6
I.5.2.Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.	6
I.5.3.Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.	7
I.5.4.Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.	7
I.6. Structures d'alimentation de la MADA	8
I.6.1.Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur.	8
I.6.2.MADA alimenté par deux convertisseurs.	8
I.6.3.Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.	9
I.7. Domaine d'application de la MADA.	10
I.8. Avantages et inconvénients de la MADA.	11
I.8.1. Avantages de la MADA.	11
I.8.2. Inconvénients de la MADA.....	12
I.9.Conclusion.....	12

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1.Introduction	13
II.2.Modélisation de la MADA.....	13
II.2.1. Hypothèses simplificatrices	14
II.2.2. Représentation de la MADA.....	14
II.2.3. Mise en équation du modèle de la machine	15
II.2.3.1. Equations électriques	15
II.2.3.2.Equations magnétiques	16
II.2.3.3. Equation mécanique.....	17
II.2.3.4.Transformation triphasé- biphasé	17
II.2.4. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q)	19
II.2.5. Equation mécanique et l'équation électromagnétique.....	20
II.2.6.Choix de référentiel	20
II. 2.6.1. Référentiel lié au stator	21
II. 2.6.2. Référentiel lié au rotor	21
II.2.6.3. Référentiel lié au champ tournant	21
II.3. Mise sous forme d'équation d'état	22
II.4. Association Onduleur- Machine	23
II.4.1.Modélisation du redresseur.	24
II.4.2.Modélisation du filtre.....	25
II.4.3.Modélisation d'onduleur de tension.....	26
II.4.4.Principe de la technique MLI.....	26
II.5.Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA).....	28
II.6.Conclusion.	29

CHAPITRE III : Commande vectorielle de la MADA

III.1.Introduction	30
III.2.Théorie de la commande vectorielle de la MADA.....	30
III.2.1. Principe de lacommande vectorielle.....	30
III.2.2. Orientation du flux rotorique.....	31
III.3.Méthodes de la commande vectorielle	32
III.3.1.Méthode directe delacommande vectorielle	32
III.3.2.Méthode indirectede lacommande vectorielle.....	33
III.4.Mise enœuvre de la commande à flux orienté de la MADA.....	34
III.4.1. Contrôle des courants et termes de compensation.....	35
III.4.2. Le découplage par compensation	36
III.4.3.Calcul des correcteurs.....	37
III.4.3.1.Correcteurs des courants rotoriques	37
III.4.3.2.Correcteurs des courant srotoriques	38
III.4.4. Régulation de vitesse de la MADA	39
III.4.5. Correcteur IP avec saturation dans la chaîne directe.....	40
III.4.5.1. Synthèse du correcteur IP de vitesse	40
III.5.Structure générale de la commande vectorielle de la MADA.....	42
III.6.Simulation de la commande vectorielle de la MADA.....	43
III.6.1.Profils de poursuite et de régulation	43
III.6.2.Test de robustesse en basse vitesse et en haute vitesse	49
III.7.Conclusion.....	53
Conclusion Générale.....	54
Références bibliographiques.....	56
ANNEXE.....	58

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)	4
Figure I.2: Les pièces essentielles Rotor et stator en image.....	5
Figure I.3: Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	5
Figure I.4: Modes de fonctionnement de la MADA	7
Figure I.5: Fonctionnement en mode moteur avec un onduleur	8
Figure I.6 : Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs et un bus continu commun	8
Figure I.7: Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs avec deux bus continus	9
Figure I.8: Fonctionnement en mode moteur avec deux cyclo-convertisseurs	9
Figure I.9: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	9

Chapitre II

Figure II.1: MADA avec des bagues collectrices	13
Figure II.2: Représentation schématique du modèle d'une MADA.....	15
Figure II.3: Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	18
Figure II.4: Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q	20
Figure II.5: Système d'alimentation d'une MADA	24
Figure II.6: Redresseur triphasé à diodes	24
Figure II.7: Représentation de la tension de sortie du redresseur	25
Figure II.8: représentation du filtre LC	25
Figure II.9: Onduleur triphasé alimentant le stator d'une MADA	26
Figure II.10: Schéma de principe du contrôle par la MLI à hystérésis d'un bras de l'onduleur...	27
Figure II.11 : Résultats de simulation de la MADA	28

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la Machine à courant continu.....	31
Figure III.2 : Orientation du flux statorique sur l'axe direct.....	32
Figure III.3: Diagramme vectoriel de la MADA correspondant à une magnétisation par le stator.	33

Figure III.4 : Diagramme vectoriel de la MADA correspondant à une magnétisation par le stator.	34
Figure III.5: régulation d'un courant par la méthode de LECOCQ.	35
Figure III.6 : Régulation des courants statoriques et rotoriques de l'axe d.....	37
Figure III.7 : Régulation des courants statoriques et rotoriques de l'axe q.....	37
Figure III.8 : Schéma bloc de régulation des courants rotoriques.....	38
Figure III.9 : Schéma bloc de régulation des courants statoriques.....	39
Figure III.10 : Boucle de régulation de vitesse avec correcteur IP.	39
Figure III.11 : Boucle de régulation de vitesse avec correcteur IP et saturation du Couple.	40
Figure III.12 : Chaîne de régulation de la vitesse.	41
Figure III.13 : Schéma globale de la commande FOC d'une MADA.	42
Figure III.14 : commande vectorielle d'une MADA à flux rotorique orienté	46
Figure III.15 : Résultats de simulation de la machine avec sens inversé	49
Figure III.16 : Simulation de commande FOC d'une MADA FOC d'une MADA en basse et haute vitesse (avec défluxage).....	52
Figure III.17 : Simulation d'une MADA avec une variation de R_r (test de robustesse)	53

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Transformation de Concordia et Transformation de Clarke..... 17

Tableau III.2 : Paramètres des correcteurs des courants rotoriques. 38

Tableau III.3 : Paramètres des correcteurs des courants statoriques..... 39

Tableau III.5 : Paramètres du correcteur IP de la vitesse..... 41

Notations et Symboles

- Paramètres de modélisation de la machine

R_s	Résistance statorique par phase	(Ω)
R_r	Résistance rotorique par phase	(Ω)
L_r	Inductance cyclique statorique par phase	(H)
L_s	Inductance cyclique rotorique par phase	(H)
M_{sr}	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor)	(H)
l_s	L'inductance propre d'une phase statorique	(H)
l_r	L'inductance propre d'une phase rotorique	(H)
f	Coefficient de frottement visqueux	($N.m.s/rad$)
C_{em}	Couple électromagnétique	($N.m$)
C_r	Couple résistant	($N.m$)
σ	Coefficient de dispersion	
n_p	Nombre de paires de pôles	

- Grandeurs mécaniques

W	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation	(rad/s)
W_m	Pulsation électrique correspondante à la vitesse nominale de rotation	(rad/s)
W_s	Pulsation électrique des grandeurs statoriques	(rad/s)
W_r	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques	(rad/s)
F_s	Fréquence électrique des grandeurs statoriques	(Hz)
F_r	Fréquence électrique des grandeurs rotoriques	(Hz)
η	Rendement	(%)
N	Vitesse mécanique de rotation	(tr/min)
N_n	Vitesse mécanique nominale de rotation	(tr/min)
g	Glissement de la vitesse de rotation	

- **Repères**

$(A\ B\ C)$	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques	
$(a\ b\ c)$	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statoriques	
$(d\ q)$	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)	
$(\alpha\ \beta)$	Axes de référentiel de Concordia (repère de Park fixe au stator)	
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator	(rad)
θ_s	Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d)	(rad)
θ_r	Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d)	(rad)

- **Grandeurs électriques au stator**

$V_{S,abc}$	Tensions statoriques triphasées	(V)
$V_{S,dq}$	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d,q)	(V)
$V_{S,\alpha\ \beta}$	Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β)	(V)
$I_{S,abc}$	Courants statoriques triphasées	(A)
$I_{S,dq}$	Courants statoriques diphasées dans le repère (d,q)	(A)

- **Grandeurs électriques au rotor**

$V_{R,ABC}$	Tensions rotoriques triphasées	(V)
$V_{R,dq}$	Tensions rotoriques diphasées dans le repère (d,q)	(V)
$V_{R,\alpha\ \beta}$	Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère (α, β)	(V)
$I_{R,ABC}$	Courants rotoriques triphasées	(A)
$I_{R,dq}$	Courants rotoriques diphasées dans le repère (d, q)	(A)

- **Grandeurs magnétiques au stator**

$\Phi_{S,ABC}$	Vecteur de flux magnétiques au stator	(wb)
$\Phi_{S,dq}$	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d,q)	(wb)
$\Phi_{S,\alpha\ \beta}$	Flux statoriques diphasés dans le repère (α, β)	(wb)

• **Grandeurs magnétiques au rotor**

$\Phi_{R,abc}$ Vecteur de flux magnétiques au rotor (wb)

$\Phi_{R,dq}$ Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) (wb)

$\Phi_{R,\alpha\beta}$ Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β) (wb)

• **Transformations**

p Matricer de Transf. De Park $X_{S,abc} \xrightarrow{T} X_{S,dq}$ et $X_{S,ABC} \xrightarrow{T} X_{r,dq}$

Cl Matricer de Transf. De Clark $X_{S,abc} \xrightarrow{C_{23}} X_{S,\alpha\beta}$ et $X_{S,ABC} \xrightarrow{C_{23}} X_{r,\alpha\beta}$

Co Matricer de Transf. De Concordia $X_{S,abc} \xrightarrow{T_{23}} X_{S,\alpha\beta 0}$ et $X_{S,ABC} \xrightarrow{T_{23}} X_{r,\alpha\beta 0}$

S Opérateur de Laplace

• **les acronymes utilisés pour la modélisation de la machine**

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation

MAS Machine Asynchrone

DFIG Doubly Fed Induction Generator DFIG

DFIM Doubly Fed Induction Motor

AC Courant Alternatif

DC Courant Continu

MLI Modulation de Largeur d'Impulsion

FMM Force Magnétomotrice

FEM Force Électromotrice

MADASC Machine Asynchrone à Double Alimentation Sans Collecteur

PI Proportionnel Intégral (Correcteur)

DFOC Direct Field Oriented Control (Orientation Directe du Flux)

IFOC Indirect Field Oriented Control (Orientation Indirecte du Flux)

GTO Gate Turn-Off Thyristor

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) trouve de nombreuses applications. Elle est largement utilisée comme génératrice dans les systèmes éoliens à vitesse variable, ainsi que comme moteur dans des applications industrielles de grande puissance, telles que la propulsion maritime et la traction ferroviaire. Ce qui la rend particulièrement adaptée à ces applications, c'est sa capacité à fonctionner sur une large plage de variations de vitesse [1].

La stratégie de commande utilisée pour la MADA est la commande vectorielle, également appelée contrôle vectoriel à flux rotorique orienté (FOC), qui permet une répartition de puissance active entre le stator et le rotor. L'objectif principal de ce mémoire de fin d'études est de concevoir et mettre en œuvre une commande vectorielle réalisable pour la MADA. Cette commande offre un contrôle indépendant du flux et du couple de la machine, offrant ainsi une flexibilité et une précision accrues dans le processus de contrôle.

Ce mémoire de fin d'études se compose de trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présentera une introduction générale sur la MADA. Il comprendra une description simplifiée de la machine asynchrone à rotor bobiné et son principe de fonctionnement. Ce chapitre abordera également les modes de fonctionnement, les différentes alimentations, les domaines d'application, ainsi que les avantages et les inconvénients de la MADA.
- ✓ Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation, qui est une phase essentielle du développement de la MADA. Les avancées en informatique et en génie logiciel permettent de réaliser des modélisations performantes et d'optimiser les machines électriques. Les équations reliant les tensions aux flux et les courants aux flux seront exprimés. Certaines modélisations attribuent des valeurs nulles aux tensions rotoriques pour modéliser les machines asynchrones à cage. Cependant, nous aborderons la modélisation en prenant en compte les tensions rotoriques, car nous considérons ici une MADA. Nous présenterons la méthode traditionnelle de modélisation triphasée, puis biphasée dans le référentiel de Park en relation avec le champ tournant. Enfin, nous fournirons un aperçu de la commande à modulation de largeur d'impulsion des onduleurs de tension MLI, qui imposent les tensions des enroulements statoriques et rotoriques.

L'objectif de ce mémoire est de développer une compréhension approfondie de la commande vectorielle et de son application à la MADA, ainsi que d'évaluer les performances de cette technique à travers des simulations. Les résultats obtenus contribueront à améliorer le contrôle des MADA et à garantir leur utilisation dans des applications nécessitant des performances élevées et une efficacité énergétique.

Dans le troisième chapitre, nous mettrons en pratique la stratégie de commande adoptée, à savoir la "Commande vectorielle de la MADA" par orientation du flux rotorique, en nous concentrant tout d'abord sur le régime permanent. Après avoir exprimé les équations reliant les tensions aux flux et les courants aux flux, nous examinerons le concept d'orientation du flux rotorique et récapitulerons les principes fondamentaux des méthodes directe et indirecte utilisées pour l'accomplir. Ensuite, nous utiliserons la méthode indirecte d'orientation du flux rotorique pour ajuster la vitesse de la machine en régulant les courants et en appliquant des boucles de rétroaction et des techniques de réglage en boucle fermée. Des simulations et des analyses de résultats accompagneront cette étude. Nous accorderons une attention particulière aux performances des réglages face aux variations des paramètres de la machine.

Enfin, ce travail se conclura par une synthèse générale résumant l'ensemble des résultats obtenus.

CHAPITRE I

Généralités sur la machine Asynchrone à double alimentation.

I.1. Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), également connue sous le nom de la machine asynchrone à rotor bobiné ou de machine à induction doublement alimentée, elle est couramment utilisée pour la production de l'énergie électrique entraînée par des turbines éoliennes et hydrauliques à vitesse variable et pour les entraînements puissants tel que la traction ferroviaire et la propulsion maritime. Elle appartient à la catégorie des machines asynchrones conventionnelles qui représentent une bonne robustesse et un faible cout d'entretien par la présence des enroulements triphasés statorique et rotorique distincts, alimentés chacun par une source d'alimentation différente. Cette structure particulière leur permet d'offrir un meilleur contrôle de la vitesse et de la puissance, ainsi qu'une efficacité énergétique accrue.

Dans cette étude, nous allons examiner de plus près la structure, le fonctionnement et les avantages des machines asynchrones à double alimentation. Nous commencerons par une brève description de leur structure de base, en passant en revue les principaux composants qui les composent. Nous discuterons ensuite du fonctionnement de ces machines, en mettant en évidence les principaux facteurs qui influencent leur performance. Enfin, nous nous pencherons sur les avantages de la technologie à double alimentation, en soulignant les raisons pour lesquelles elle est de plus en plus couramment utilisée dans les applications industrielles.

I.2. Bref Historique de la MADA

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est une machine électrique qui a été développée au début du XXe siècle. Elle est également connue sous le nom de "machine de Scherbius".

En 1899, un ingénieur allemand nommé Friedrich August Haselwander a conçu une machine électrique qui avait deux enroulements statoriques alimentés par deux sources d'alimentation distinctes. Cette conception a permis à la machine d'avoir un meilleur contrôle de la vitesse et de l'énergie, mais elle a nécessité l'utilisation d'un système de commutation complexe.

En 1908, le professeur allemand Friedrich Scherbius a amélioré la conception de la MADA en utilisant un convertisseur de fréquence à base de valves pour contrôler la vitesse et l'énergie de la machine. Cette amélioration a rendu la MADA plus pratique pour une utilisation industrielle.

Pendant la Première Guerre mondiale, la demande de MADA a augmenté car la machine était utilisée pour alimenter les sous-marins allemands. Après la guerre, la demande pour la MADA a continué de croître dans l'industrie.

Dans les années 1920 et 1930, la MADA a été utilisée dans les centrales électriques pour améliorer l'efficacité énergétique en utilisant l'énergie produite par les turbines pour alimenter les moteurs de la MADA qui ont ensuite été connectés aux générateurs électriques. Aujourd'hui, la MADA est toujours utilisée dans l'industrie pour son efficacité énergétique et son contrôle de la vitesse. Elle est particulièrement utile pour les applications à vitesse variable comme les pompes, les ventilateurs et les compresseurs.

I.3. Description simplifiée de MADA

La machine asynchrone à double alimentation possède trois enroulements statoriques et trois enroulements rotoriques. Le rotor est alimenté par un jeu de trois bagues collectrices, alimenté comme le stator par un système de tension triphasé. Cette configuration permet un contrôle précis de la vitesse et du couple de la machine en ajustant sur le côté stator ou le côté rotor.

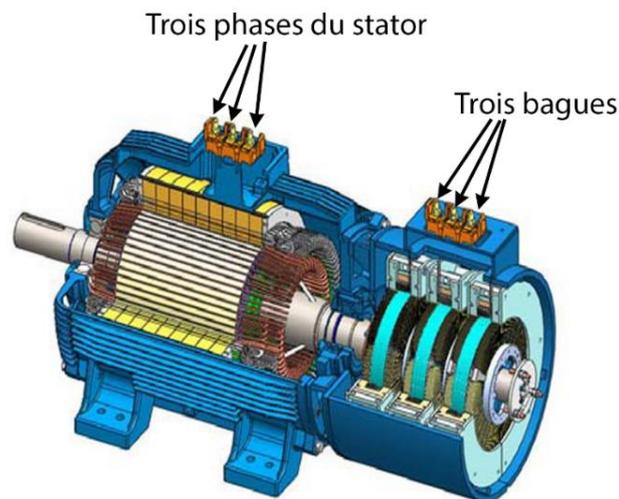
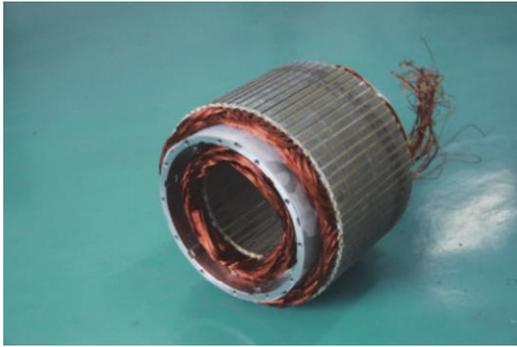
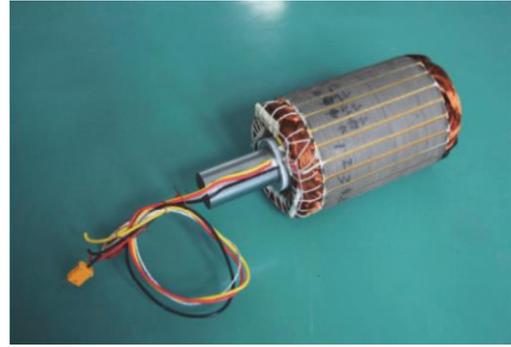


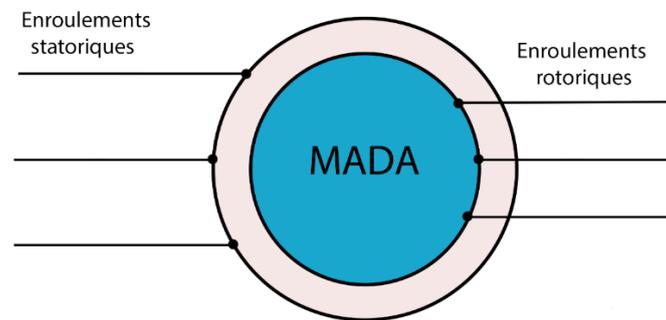
Figure I.1 : la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) [1].



Stator



Rotor

Figure I.2 : Les pièces essentielles Rotor et stator en image.**Figure I.3 :** Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

I.4. Principe de fonctionnement de la MADA

Pour assurer un fonctionnement correct de la MADA, il est nécessaire de l'exciter simultanément au niveau du stator et du rotor avec deux fréquences imposées par les sources d'alimentation. Une certaine synchronisation entre les deux champs magnétiques est requise pour garantir la stabilité de la machine. En régime établi, il est essentiel que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor restent fixes l'un par rapport à l'autre dans l'espace.

Lorsque le vecteur résultant des forces magnétomotrices des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et que le rotor tourne à la vitesse ω , il est nécessaire que le vecteur des forces magnétomotrices des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse angulaire $\omega|gl$ pour que cette condition soit satisfaite.

En d'autres termes, pour maintenir la synchronisation entre le stator et le rotor, il est crucial que le champ magnétique tournant induit par les enroulements statoriques ait une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation du rotor. Cela garantit que les forces magnétiques agissant sur le rotor sont bien orientées et permettent un fonctionnement harmonieux de la machine [2] :

$$\omega_{gl} = \omega_r = \omega_s - \omega \quad (I.1)$$

Lorsque la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les deux vecteurs de forces magnétomotrices du stator et du rotor tournent dans le même sens. En revanche, lorsque la vitesse de la machine dépasse la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs deviennent opposés [2].

le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence établie en fonction de $\omega_r = 2\pi f_r$, ce qui signifie que $f_r = f_s * g$. Le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \begin{cases} > 0 ; \text{régime hypo - synchrone} \\ < 0 ; \text{régime hyper - synchrone} \end{cases} \quad (I.2)$$

Selon l'équation (I.2), il est possible de classifier le fonctionnement de la MADA en quatre régimes distincts.

I.5. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) se distingue des autres types de machines par sa capacité à fonctionner en tant que moteur ou générateur, indépendamment de sa vitesse de rotation.

Cela lui permet de fonctionner en mode moteur ou générateur.

I.5.1. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

La figure (I.4.a) illustre que l'énergie est fournie au réseau par le stator tandis que l'énergie de glissement est absorbée par le rotor. Cela signifie que la machine fonctionne en mode générateur lorsque sa vitesse est inférieure à la vitesse de synchronisme. Cependant, il convient de noter que les machines asynchrones à cage conventionnelles ne sont pas conçues pour fonctionner dans ce mode.

I.5.2. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

Figure (I.4.b) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et récupérée via le rotor pour être réinjectée dans le réseau. Cela permet un équilibre énergétique dans le système., la machine asynchrone fonctionne comme un générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. Bien que la machine asynchrone à cage classique puisse fonctionner dans ce mode, la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor

I.5.3. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

Le fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone se produit lorsque la machine tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme. Dans cette configuration, la fréquence du courant induit dans le rotor est plus élevée que la fréquence du réseau, entraînant un déphasage entre les champs magnétiques du stator et du rotor. En conséquence, le champ magnétique résultant tourne à une vitesse plus lente que la fréquence du réseau, permettant ainsi à la machine de fonctionner en tant que moteur. Ce mode de fonctionnement est couramment utilisé pour le démarrage de la machine, où un couple de démarrage élevé est nécessaire. Vous pouvez vous référer à la figure (I.4.c) pour une représentation visuelle de ce concept.

I.5.4. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

Le fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone, comme illustré dans le quadrant (I.4.d), implique que toute la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau, à l'exception des pertes.

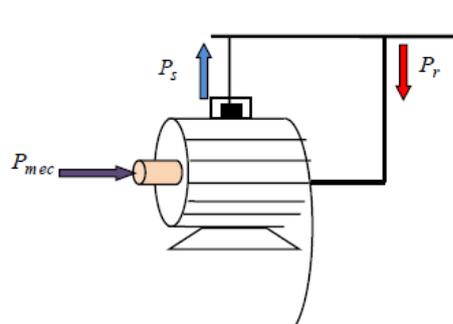


Figure I.4.a: mode générateur hypo-synchrone

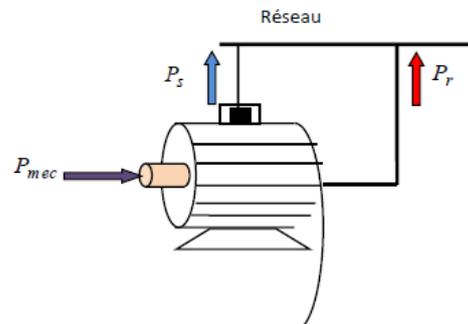


Figure I.4.b: mode générateur hyper-synchrone

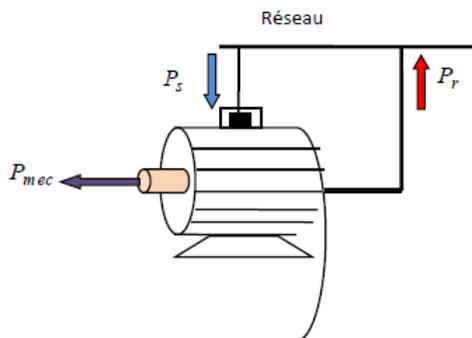


Figure I.4.c: mode moteur hypo-synchrone

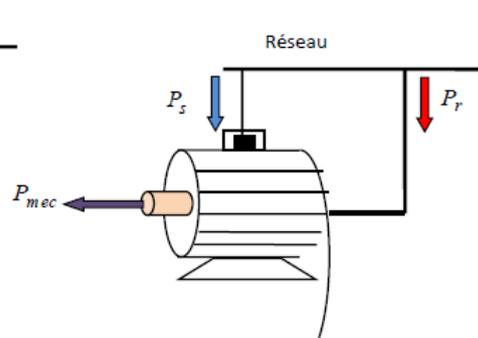


Figure I.4.d: mode moteur hyper-synchrone

Figure I.4: Modes de fonctionnement de la MADA [3].

I.6. Structures d'alimentation de la MADA

Il existe plusieurs structures d'alimentation de la machine coté stator ou coté rotor ou les deux. Dans la suite, nous présenterons ces différentes structures successivement.

I.6.1. Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur

La configuration présentée dans la Figure I.5 illustre le mode moteur de fonctionnement [4].

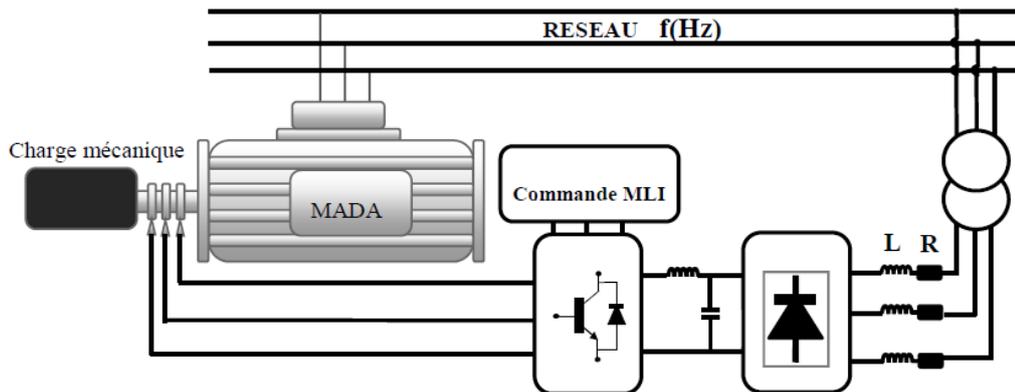


Figure I.5 : Fonctionnement en mode moteur avec un onduleur [5].

I.6.2. MADA alimenté par deux convertisseurs

Il existe différentes configurations pour ce type d'alimentation :

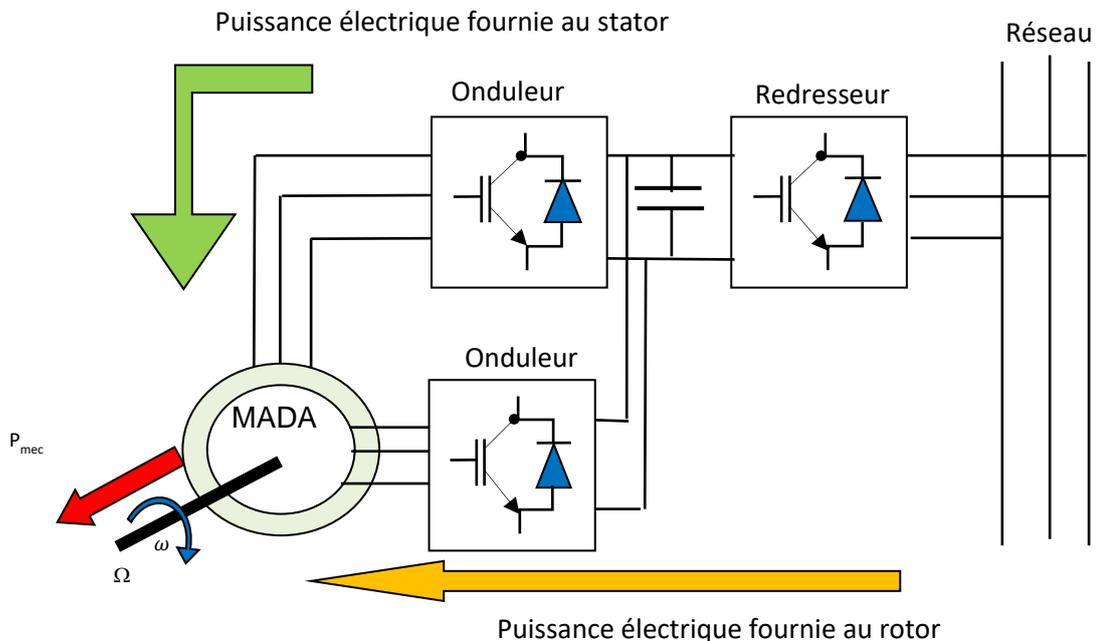


Figure I.6 : La configuration opérationnelle en mode moteur implique l'utilisation de deux onduleurs et d'un bus continu partagé [6].

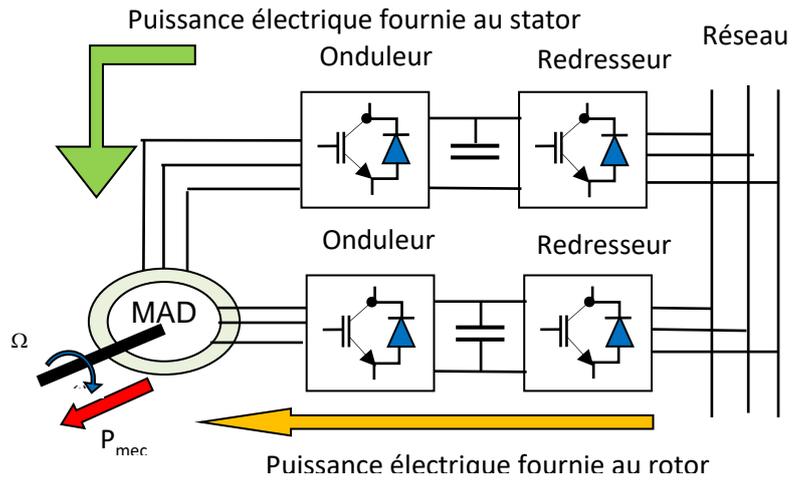


Figure I.7: Le fonctionnement en mode moteur nécessite l'utilisation de deux onduleurs, chacun avec son propre bus continu [6].

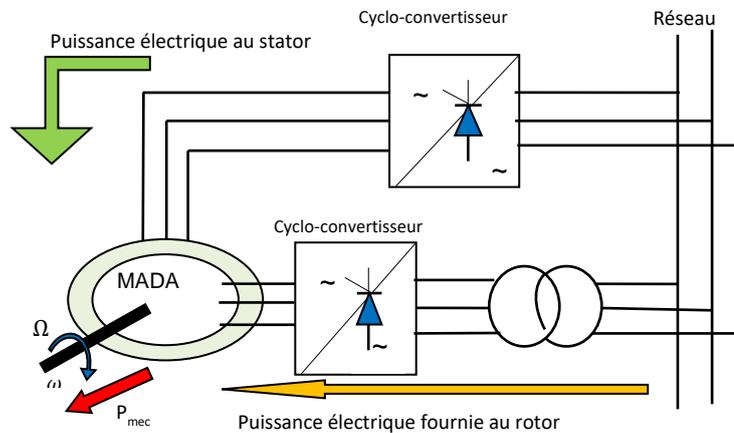


Figure I.8 : Le fonctionnement en mode moteur requiert l'utilisation de deux cyclo-convertisseurs [6].

I.6.3. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Pour permettre un échange bidirectionnel d'énergie entre le rotor et le réseau, il est possible de remplacer la combinaison redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur (voir Figure 1-23). Cette configuration est appelée la structure de Scherbius.

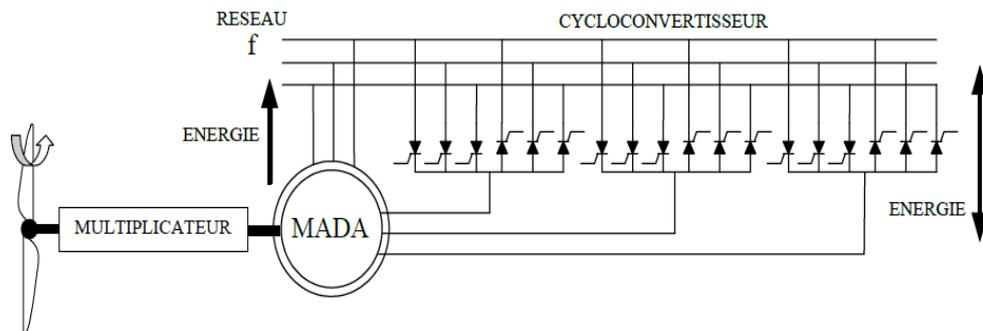


Figure I.9 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [4].

Actuellement, les éoliennes utilisent couramment une machine asynchrone pilotée par le rotor. La figure (I.9) illustre un exemple de schéma typique d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, directement connectée au réseau via son stator et alimentée par un convertisseur AC/AC au niveau du rotor. Le dimensionnement du convertisseur est réalisé de manière à gérer une puissance rotorique d'environ 30% de la puissance nominale, pour une vitesse d'entraînement proche de la vitesse de synchronisme de la machine.

On distingue deux catégories d'éoliennes : les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. Ces dernières sont conçues pour maximiser la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Ainsi, les éoliennes à vitesse variable offrent une meilleure performance globale par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, en exploitant de manière plus efficace les ressources éoliennes disponibles.

I.7. Domaine d'application de la MADA

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS) sont parmi les applications les plus répandues des Machines Asynchrones à Double Alimentation (MADA). Dans un WECS, la MADA joue un rôle crucial en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Grâce à la commande vectorielle appliquée à la MADA dans un WECS, il est possible d'assurer un contrôle de point de puissance maximale (MPPT), ce qui permet d'optimiser la production d'énergie éolienne. La commande vectorielle permet également à la MADA de fonctionner.

- Une autre application des MADA se trouve dans les véhicules électriques (EV). Dans un EV, le MADA est utilisé comme moteur de traction pour entraîner les roues. La commande vectorielle du MADA dans un EV permet un contrôle précis du couple et de la vitesse du moteur, ce qui est crucial pour assurer un fonctionnement doux et efficace du véhicule.
- Les DFIM sont également utilisés dans des processus industriels tels que les pompes et les compresseurs. Dans ces applications, la commande vectorielle du MADA permet un contrôle précis de la vitesse et du couple du moteur, ce qui est nécessaire pour maintenir un fonctionnement stable et améliorer l'efficacité énergétique.
- La commande vectorielle d'un DFIM est particulièrement Particulièrement bénéfique pour les applications exigeant des performances remarquables et un contrôle précis

de la vitesse et du couple du moteur, La capacité à contrôler indépendamment le couple et la vitesse du moteur permet une plus grande flexibilité et une plus grande adaptabilité dans diverses applications telles que les éoliennes, les véhicules électriques et les processus industriels.

I.8. Avantages et inconvénients de la MADA

I.8.1. Avantages de la MADA

Les machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont préférées pour de nombreuses applications industrielles et d'énergie renouvelable en raison de leurs propriétés uniques. Certains des principaux avantages des MADA sont les suivants :

- **Efficacité énergétique améliorée** : Les MADA ont des niveaux d'efficacité plus élevés par rapport aux autres types de machines électriques, en particulier à des charges partielles. Cela est dû au fait que les MADA ont un circuit de rotor plus petit que le circuit de stator, ce qui réduit les pertes de cuivre et l'énergie gaspillée sous forme de chaleur.
- **Fonctionnement à vitesse variable** : Les MADA peuvent fonctionner à des vitesses variables, ce qui est une caractéristique essentielle pour les applications d'énergie renouvelable telles que les éoliennes. Les MADA permettent à l'éolienne de fonctionner à des vitesses de vent variables tout en maintenant une production d'énergie optimale.
- **Rentabilité** : Les MADA sont généralement moins coûteuses que d'autres types de machines électriques, telles que les machines à aimants permanents. Les MADA ont une structure plus simple et ne nécessitent pas de matériaux rares coûteux, ce qui en fait une option rentable pour de nombreuses applications.
- **Freinage régénératif** : Les MADA peuvent fonctionner en mode moteur et en mode générateur, ce qui signifie qu'ils peuvent être utilisés pour le freinage régénératif. Pendant le freinage, la MADA peut convertir l'énergie cinétique de la charge en rotation en énergie électrique, qui peut être renvoyée dans le réseau ou stockée dans une batterie. Cela améliore l'efficacité énergétique et réduit la quantité de chaleur générée pendant le freinage.

En résumé, les MADA offrent plusieurs avantages par rapport à d'autres types de machines électriques, tels que l'amélioration de l'efficacité énergétique, le fonctionnement à vitesse

variable, la rentabilité, le freinage régénératif et la haute densité de couple. Ces avantages font des MADA un choix idéal pour de nombreuses applications industrielles et d'énergie renouvelable.

I.8.2. Inconvénients de la MADA

Bien que les machines asynchrones à double alimentation (MADA) présentent de nombreux avantages, elles ont également certains inconvénients, notamment :

- Nécessite un convertisseur de fréquence : Les MADA nécessitent un convertisseur de fréquence pour fonctionner en mode variable, ce qui peut ajouter des coûts supplémentaires et augmenter la complexité du système.
- Besoin d'une maintenance régulière : Les MADA nécessitent une maintenance régulière pour garantir leur bon fonctionnement.
- Nécessite un système de contrôle sophistiqué : Les MADA nécessitent un système de contrôle sophistiqué pour fonctionner de manière optimale. Le système de contrôle doit être capable de surveiller et de contrôler la tension, le courant et la fréquence de la machine pour garantir une production d'énergie optimale.

I.9. Conclusion

En conclusion, les machines asynchrones à double alimentation (MADA) présentent de nombreux avantages, tels que leur efficacité énergétique élevée, leur capacité à fonctionner à des vitesses variables et leur capacité à supporter des charges variables. Ces caractéristiques en font une solution idéale pour de nombreuses applications industrielles et d'énergie renouvelable, telles que les éoliennes et les véhicules électriques.

Cependant, les MADA ont également quelques inconvénients, tels que leur coût initial élevé, leur besoin d'un convertisseur de fréquence, leur nécessité d'une maintenance régulière et leur besoin d'un système de contrôle sophistiqué.

Malgré ces inconvénients, les avantages offerts par les MADA l'emportent souvent sur les coûts et les exigences supplémentaires. Avec une maintenance et une gestion appropriée, les MADA peuvent offrir des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique, de stabilité et de performance pour de nombreuses applications industrielles et d'énergie renouvelable.

CHAPITRE II :

Modélisation de la Machine Asynchrone à Double alimentation

II.1. Introduction

Le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est fascinant en raison de sa capacité à offrir un contrôle précis de la vitesse et du couple. Cependant, pour mieux comprendre ce principe, une étude approfondie de la MADA est essentielle. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation de la MADA en utilisant un référentiel lié au champ tournant. Nous développons un modèle mathématique qui nous permettra de valider notre modèle en boucle ouverte.

Pour atteindre notre objectif, nous commençons par formuler les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la MADA sous un système de tension triphasée. Ensuite, nous réduisons l'ordre du système et éliminons la dépendance entre les coefficients d'inductance et la position du rotor en utilisant la transformation de Park, ce qui nous permet d'obtenir un modèle biphasé de la MADA.

II.2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation se compose de deux éléments principaux : le stator et le rotor. Le stator comprend trois bobines réparties de manière équidistante, tandis que le rotor comprend également trois bobines décalées de $2\pi/3$ par rapport aux bobines du stator.

Cette disposition des bobines assure une répartition uniforme du champ magnétique à l'intérieur de la machine. Lorsque la machine est mise en marche, le champ magnétique rotatif généré par les enroulements du stator induit un courant dans les enroulements du rotor. Ce courant crée à son tour un champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique rotatif créé par les enroulements du stator, engendrant ainsi un couple de rotation.

Le couple de rotation peut être ajusté en modifiant la tension d'alimentation des enroulements du rotor, offrant ainsi un contrôle sur la vitesse et le couple de la machine.

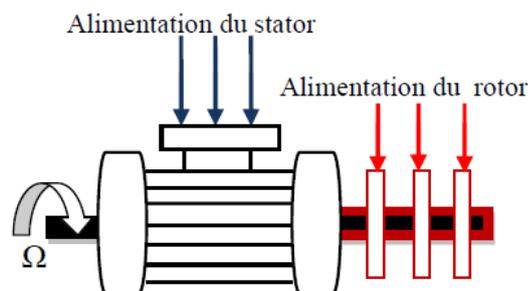


Figure II.1: MADA avec des bagues collectrices [6].

II.2.1. Hypothèses simplificatrices

Voici quelques exemples courants d'hypothèses simplificatrices souvent faites lors de l'analyse et de la modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) [8]

1. Symétrie : Une hypothèse simplificatrice courante est de supposer que la machine est symétrique, c'est-à-dire que les enroulements statoriques et rotoriques sont identiques. Cela peut faciliter l'analyse.
2. Circuits magnétiques linéaires : Une autre hypothèse simplificatrice courante est de supposer que les circuits magnétiques de la MADA sont linéaires, c'est-à-dire que les caractéristiques magnétiques ne varient pas avec le champ magnétique.
3. Comportement sinusoïdal : Une hypothèse simplificatrice courante est de supposer que le comportement de la MADA est sinusoïdal, c'est-à-dire que les tensions et les courants sont supposés varier selon une onde sinusoïdale.
4. Modèle linéaire : Une autre hypothèse simplificatrice courante pour la modélisation d'une MADA est d'utiliser un modèle linéaire, qui suppose que les relations entre les variables sont linéaires.
5. Stator symétrique : Une autre hypothèse simplificatrice courante pour la modélisation d'une MADA est de considérer que le stator est symétrique, c'est-à-dire que les enroulements statoriques sont uniformément espacés et ont des caractéristiques électriques identiques.
6. Rotor sans pertes : L'une des hypothèses simplificatrices courantes pour la modélisation d'une MADA est de considérer que le rotor est sans pertes. Cela signifie que les pertes par effet Joule et les pertes ferromagnétiques dans le rotor sont négligeable

II.2.2. Représentation de la MADA

On étudie la machine asynchrone double alimentée qui est représentée par une structure de principe sur la Figure (II.1). Cette machine est constituée de deux armatures magnétiques cylindriques, le stator et le rotor, séparées par un entrefer constant. Chaque armature est équipée d'un enroulement triphasé.

- Le stator est équipé de trois enroulements triphasés, dont les axes magnétiques OA, OB et OC sont décalés de 120° dans l'espace.

- Le rotor (rotor bobiné) est également équipé de trois enroulements triphasés, avec le même nombre de pôles que celui du stator. Les axes magnétiques de ces enroulements, O_a , O_b et O_c , sont également décalés de 120° dans l'espace [9].

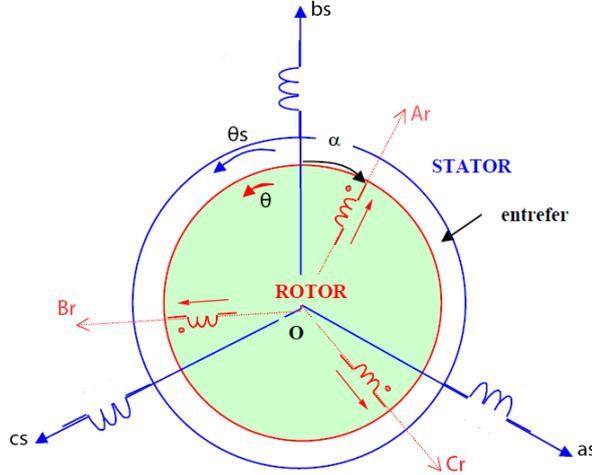


Figure II.2: Représentation schématique du modèle d'une MADA

II.2.3. Mise en équation du modèle de la machine

II.2.3.1. Equations électriques

$$\begin{cases} [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \\ [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.1.a}) ; \quad \begin{cases} [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \\ [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.1.b})$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.2}) ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

De même, au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

D'où les formes matricielles condensées :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

$[V_{as}]$: La matrice des tensions par phase au stator.

$[V_{ar}]$: La matrice des tensions par phase au rotor.

$[I_s]$: La matrice des courants au stator.

$[I_r]$: La matrice des courants au rotor.

II.2.3.2. Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\begin{cases} [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \\ [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.8}) \quad \begin{cases} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \\ [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

L_r : est l'inductance d'un bobinage seul

M_r : L'inductance mutuelle de couplage entre bobinage du rotor

$[L_r]$:Matrice des bobinages au rotor

L_s : Est l'inductance d'un bobinage seul

M_s : L'inductance mutuelle de couplage entre bobinages du stator.

$[L_s]$: Matrice des bobinages au stator

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

On aura finalement :

$$\begin{cases} [V_{sabs}] = [R_s][I_{sabs}] + \frac{d}{dt}([L_s][I_{sabs}] + [M_{sr}][I_{rabs}]) \\ [V_{rabs}] = [R_r][I_{rabs}] + \frac{d}{dt}([L_r][\varphi_r][I_{rabs}] + [M_{rs}][I_{sabs}]) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.2.3.3. Equation mécanique

L'équation du mouvement de la machine s'écrit :

$$c_e - c_{st} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{II.12})$$

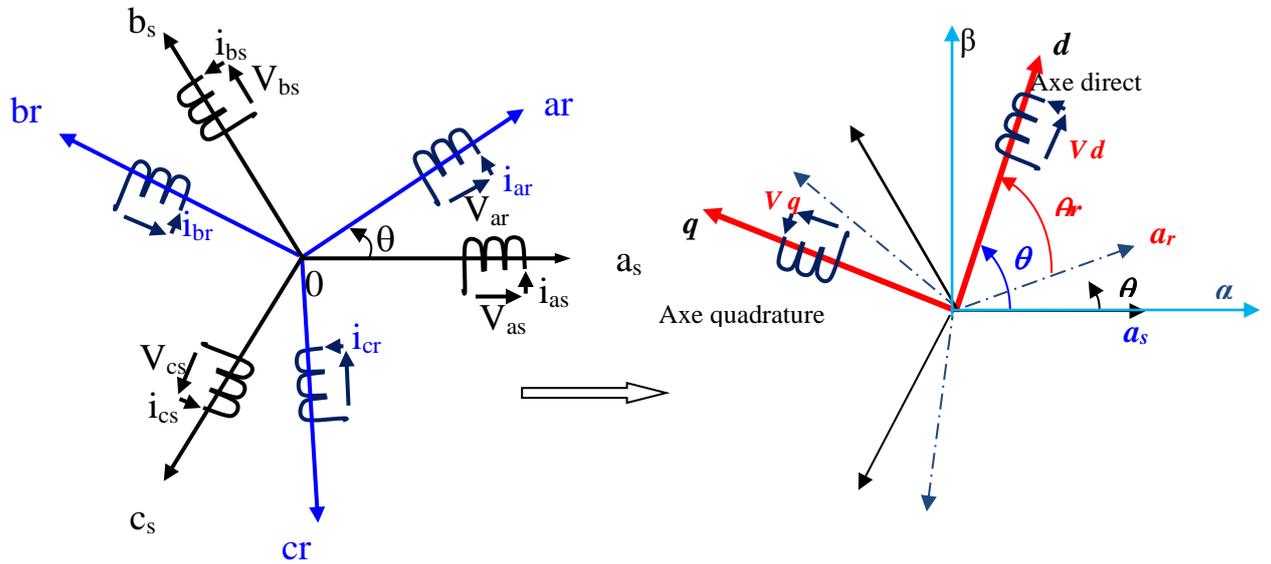
II.2.3.4. Transformation triphasé- biphase

Tableau II.1 : Transformation de Concordia et Transformation de Clarke [1].

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke
Convertir abc en $\alpha\beta$.	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c - à - d } x_{\alpha\beta} = T_{23}[x_{abc}]$ Avec $T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c - à - d } x_{\alpha\beta} = C_{23}[x_{abc}]$ Avec $C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
Convertir $\alpha\beta$ en abc.	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c - à - d } x_{abc} = T_{32}[x_{\alpha\beta}]$ Avec $T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c - à - d } x_{abc} = C_{32}[x_{\alpha\beta}]$ Avec $C_{32} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

La transformation de Park, également appelée transformation en dq, est une technique utilisée en électricité pour convertir une grandeur électrique triphasée en une grandeur électrique biphasée. Cette transformation est souvent utilisée dans les applications de commande de machines électriques et de systèmes de puissance.

La transformation de Park est basée sur la notion de référentiel de Park, qui est un système de coordonnées tournant avec la fréquence du système triphasé. Cette transformation permet de décomposer les grandeurs électriques triphasées en deux grandeurs biphasées : une grandeur directe d et une grandeur en quadrature q [12].



a) Représentation de la MADA Dans le repère (abc).

b) Machine asynchrone vue dans le repère dq

Figure II.3 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA [12].

Cette transformation permet de simplifier les équations de commande et de régulation en décomposant les grandeurs électriques triphasées en deux grandeurs biphasées : une grandeur directe (d) et une grandeur en quadrature (q).

Pour effectuer cette transformation de Park, nous utilisons une matrice de passage normalisée.

$$[P] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La matrice est orthogonale, Cela implique que $[P(\theta)]^t = [P(\theta)]^{-t}$ La transformation de Park permet de convertir les grandeurs électriques (tensions, courants, flux) en utilisant une transformation de variables.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La matrice inverse de transformation de PARK normalisée a pour expression :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.2.4. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q) :

Les tensions statorique et rotorique peuvent être exprimées selon les axes (d, q) de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_a \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_a \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_a - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_a - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Les flux statoriques et rotoriques dans le système en (d, q) peuvent être exprimés par les expressions suivantes [13] :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$L_r = l_r - M_r \quad (\text{II.18})$$

$$L_s = l_s - M_s \quad (\text{II.19})$$

$$M = \frac{3}{2l_m} \quad (\text{II.20})$$

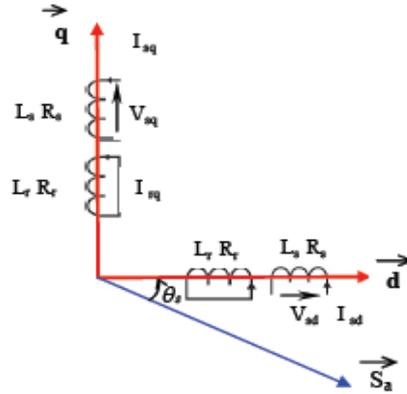


Figure II.4 : Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q

II.2.5. Equation mécanique et l'équation électromagnétique :

L'équation mécanique est donnée par son expression précédente :

$$c_e - c_{st} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \text{ Ou } \frac{Jd\omega}{Pdt} = c_e - c_r - \frac{f}{P}\omega \quad (\text{II.21})$$

L'équation qui décrit le couple électromagnétique en fonction des grandeurs biphasées dq est donnée par :

$$c_e = PM[I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qr}] \quad (\text{II.22})$$

II.2.6. Choix de référentiel :

Lors de l'étude par simulation de la MADA, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui simplifie au maximum le système différentiel, car le résultat final ne dépend pas du choix du système de coordonnées. Cela peut rendre les calculs plus ou moins complexes.

À partir du système d'axes (d, q), il est possible de dériver d'autres systèmes d'axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, on suppose que les composantes homopolaires sont nulles. En général, l'analyse du comportement dynamique des machines électriques peut être réalisée en utilisant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel dépend du phénomène à étudier et des simplifications offertes par ce choix. En pratique, trois types de référentiels sont couramment utilisés :

II. 2.6.1. Référentiel lié au stator :

Le système d'axes (α, β) , également appelé cadre, est utilisé pour analyser les systèmes de démarrage et de freinage des machines électriques [2]. Dans ce système, ω_a est égal à zéro. Les équations électriques de la machine sont les suivantes :

Au niveau du stator et niveau du rotor :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.23.a}) \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.23.b})$$

II. 2.6.2. Référentiel lié au rotor :

Dans cette configuration, le système d'axes (d,q) est fixe par rapport au rotor et tourne à la même vitesse ($\omega_a = \omega_r$). Ce système d'axes est utilisé pour analyser les phénomènes transitoires dans les machines synchrones et asynchrones présentant une connexion asymétrique des circuits du rotor [2]. Les équations électriques de la machine, dans ce référentiel, se présentent comme suit : Pour le stator et le rotor :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.24.a}) \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.24.b})$$

II.2.6.3. Référentiel lié au champ tournant :

Dans cette configuration, on utilise également un référentiel appelé système d'axes (X,Y) qui est en rotation à la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire ($\omega_a = \omega_s$). Les équations électriques se présentent alors comme suit, tant au niveau du stator qu'au niveau du rotor

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.25.a}) \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.25.b})$$

Avec :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{PM}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega + C_r \quad (\text{II.26})$$

II.3. Mise sous forme d'équation d'état :

Les flux sont utilisés pour substituer les équations de tension et obtenir le modèle complet de la MADA. Cela donne quatre équations électriques dépendant des courants et/ou des flux statoriques et rotoriques. En combinant ces équations électriques avec l'équation mécanique, on obtient le modèle de la MADA dans le repère de Park, exprimé sous forme d'un modèle d'état. [14] :

$$\frac{dX}{dt} = \dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{II.27})$$

Il est possible de représenter le système sous forme matricielle d'état, comme le montre l'expression suivante.

$$\frac{dX}{dt} = \dot{x} = Ax + Bu \quad \text{Avec} \begin{cases} x = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T \\ u = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{dr} \ v_{qr}]^T \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega + \omega_s & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega \\ -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\frac{1}{\sigma} \omega + \omega_s \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega & \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & \frac{1}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{ou } A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega + \omega_s & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega \\ -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\frac{1}{\sigma} \omega + \omega_s \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega & \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & \frac{1}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 p \Omega + \omega_s & a_3 & a_4 p \Omega \\ -a_2 p \Omega - \omega_s & a_1 & -a_4 p \Omega & a_3 \\ a_5 & -a_6 p \Omega & a_7 & -a_8 p \Omega + \omega_s \\ a_6 p \Omega & a_5 & a_8 p \Omega - \omega_s & a_7 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & b_2 \\ b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: coefficient de dispersion

$$a_1 = -\frac{R_s}{\sigma L_s}; a_2 = \frac{(1-\sigma)}{\sigma}; a_3 = \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r}; a_4 = \frac{M}{\sigma L_s}; a_5 = \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r}; a_6 = \frac{-M}{\sigma L_r};$$

$$a_7 = -\frac{R_r}{\sigma L_r}; a_8 = \frac{1}{\sigma}; b_1 = \frac{1}{\sigma L_s}; b_2 = -\frac{M}{\sigma L_s L_r}; b_3 = \frac{1}{\sigma L_r}$$

II.4. Association Onduleur- Machine

L'alimentation de la machine asynchrone se fait par le biais d'un système comprenant un redresseur, un filtre RLC et un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Différentes méthodes sont utilisées pour entraîner ce type de machine, allant de la connexion directe au réseau électrique aux variateurs de vitesse, en passant par les démarreurs. Les variateurs de vitesse ont plusieurs objectifs, tels que l'optimisation des performances dans différentes phases de fonctionnement, la prolongation de la durée de vie des moteurs à induction en contrôlant le courant dans leurs enroulements et la réduction de la consommation d'énergie.

Cette étude se concentre spécifiquement sur l'association d'une machine asynchrone à rotor bobiné avec un système d'alimentation à fréquence variable au niveau du stator et du rotor. La configuration de cette machine, appelée MADA à vitesse variable, est représentée dans la figure (II.5). Elle est alimentée par deux sources à fréquence variable, une pour le stator et une pour le rotor. Les deux sources sont identiques, à l'exception d'un transformateur abaisseur dans l'alimentation du rotor. Chacune des sources est composée d'un redresseur triphasé double alternance à diodes, d'un filtre passe-bas passif (L, C) et d'un onduleur de tension à MLI.

Cette configuration permet d'obtenir une vitesse de rotation optimisée pour la machine asynchrone, de suivre des profils dynamiques de vitesse et de maintenir une vitesse constante malgré les variations de charge, tout en minimisant la consommation d'énergie et en prolongeant la durée de vie des moteurs à induction.

Ainsi, la MADA à vitesse variable offre une solution avantageuse pour obtenir un contrôle précis de la machine asynchrone en adaptant la fréquence d'alimentation au stator et au rotor. Cela permet d'optimiser les performances de la machine, d'assurer une régulation précise de la vitesse et de réaliser des économies d'énergie significatives, tout en améliorant la durabilité des moteurs à induction [15].

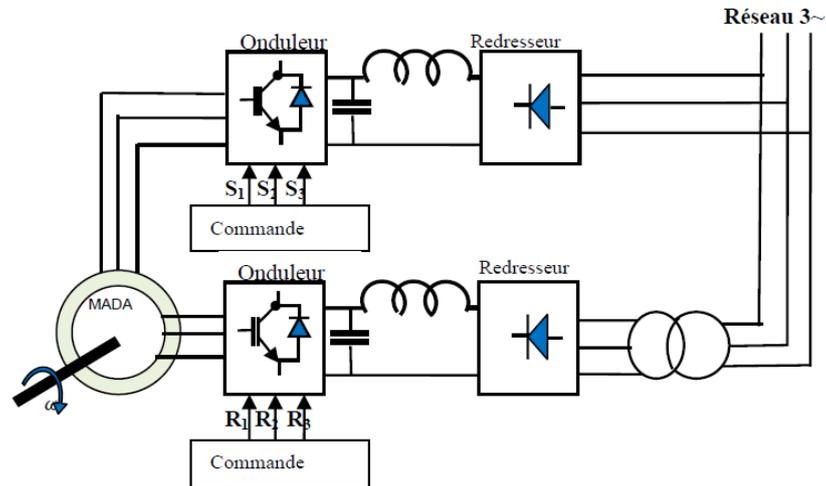


Figure II.5: Système d'alimentation d'une MADA [6].

II.4.1. Modélisation du redresseur

Les redresseurs sont des composants d'électronique de puissance utilisés pour convertir un courant alternatif en courant continu. Ils sont connectés à une source de tension alternative et fournissent en sortie un courant continu destiné à alimenter un récepteur. Parmi les redresseurs les plus couramment utilisés, on retrouve le pont triphasé à diodes, qui est alimenté par un système de tension sinusoïdale triphasée. Ce dispositif est illustré dans la figure (II-6).

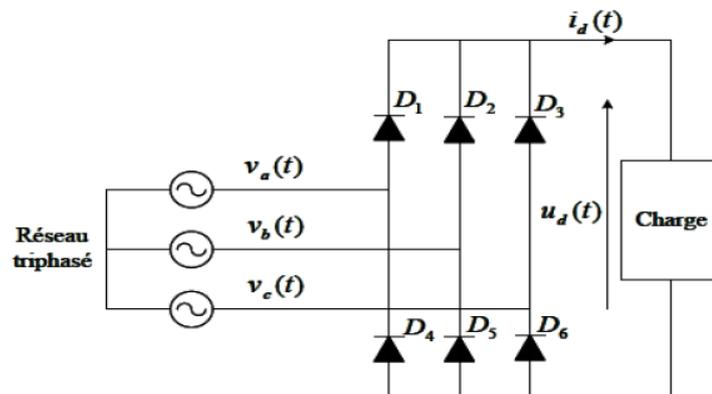


Figure II.6: Redresseur triphasé à diodes.

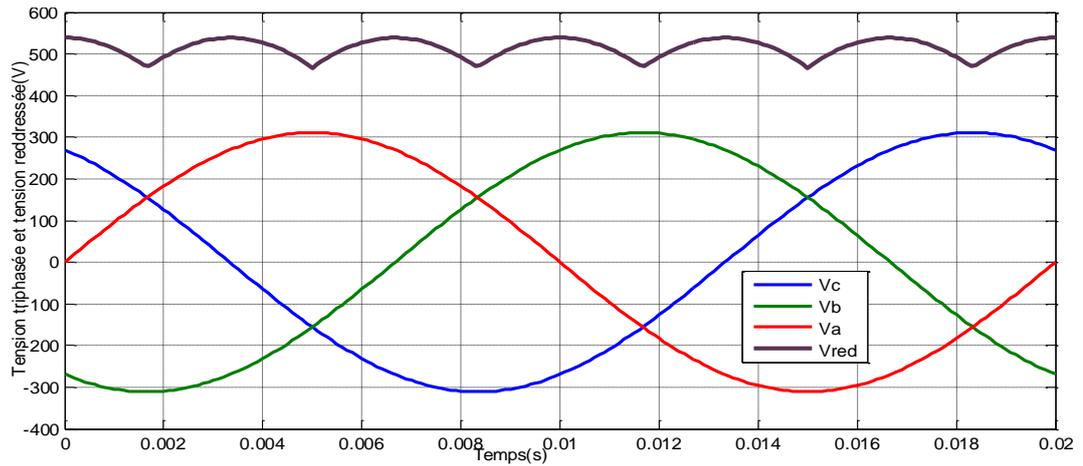


Figure II.7: la tension de sortie du redresseur

II.4.2. Modélisation du filtre :

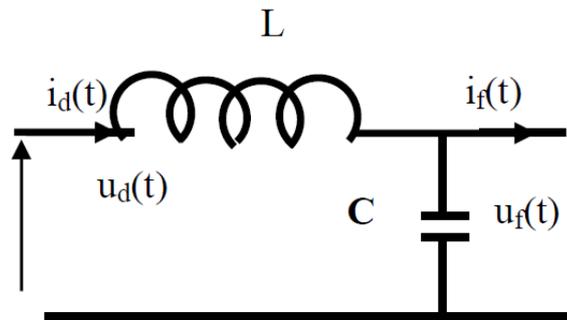


Figure II.8: représentation du filtre LC [6].

Les équations du filtre sont données par :

$$U_d(t) = L_f \frac{dI_d}{dt} + RI_d + U_{dc}(t) \tag{II.32}$$

$$\frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I(t)) \tag{II.33}$$

La fonction de transfert du filtre :

$$F(t) = \frac{U_{dc}(t)}{U_d(t)} = \frac{U_{filtre}}{U_{redressée}} = \frac{1}{(\sqrt{L_f C_f S})^2 + 1} \tag{II.34}$$

la pulsation de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f S}} \times \frac{1}{2\pi} \tag{II.35}$$

II.4.3. Modélisation d'onduleur de tension :

L'onduleur joue un rôle essentiel en électronique de puissance en permettant la conversion entre une tension continue et une tension alternative. Il utilise des transistors pour réaliser la commutation forcée. Deux techniques courantes de commande de l'onduleur sont la méthode classique et la Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans le cadre de cette étude, nous utilisons la MLI de courant pour contrôler les deux onduleurs de tension.

Considéré comme le cœur du système d'alimentation, l'onduleur se compose de trois bras indépendants, chacun étant équipé de deux interrupteurs. Chaque interrupteur comprend un transistor et une diode en antiparallèle. Cette configuration permet de fournir à la machine des tensions ou des courants de différentes amplitudes et fréquences. La Figure II.9 illustre le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente le stator de la MADA.

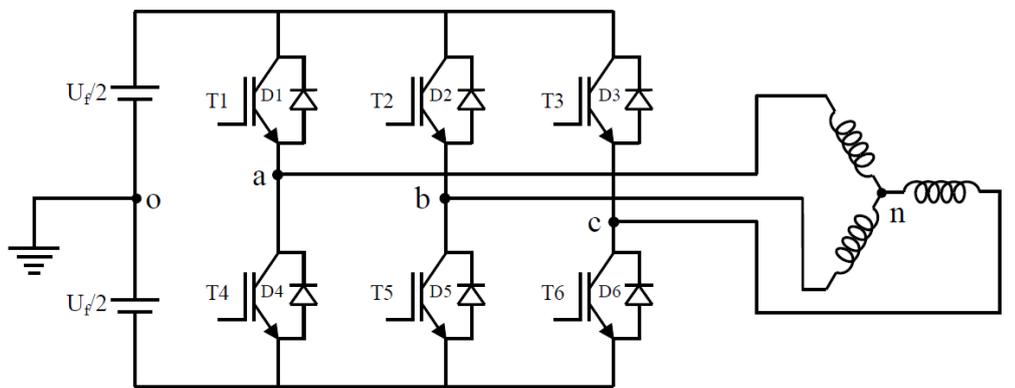


Figure II.9: Onduleur triphasé alimentant le stator d'une MADA [6].

II.4.4. Principe de la technique MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), également connue sous le nom de PWM (Pulse Width Modulation) en anglais, est une méthode de commande largement utilisée pour contrôler la vitesse et le couple de la MADA. Elle permet de générer un signal de commande pour l'onduleur de tension qui alimente l'enroulement rotorique de la machine asynchrone.

Le principe de la MLI consiste à ajuster la durée des impulsions du signal de commande à une fréquence donnée. Le signal de commande est généralement une onde sinusoïdale de fréquence variable, correspondant à la fréquence de rotation souhaitée du rotor de la machine. Pour générer ce signal, la MLI compare une onde de référence sinusoïdale avec un signal de porteuse de fréquence fixe. La différence entre l'onde de référence et le signal de porteuse est utilisée pour déterminer la durée des impulsions générées [16].

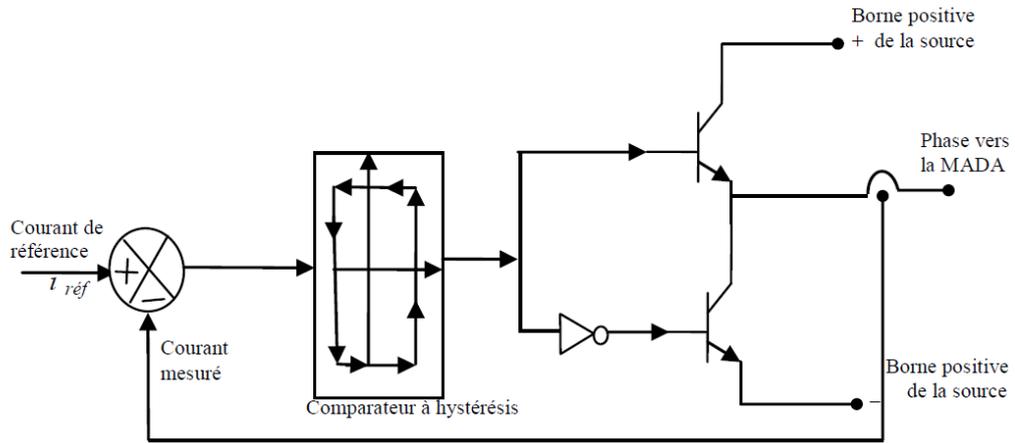


Figure II.10: Schéma de principe du contrôle par la MLI à hystérésis d'un bras de l'onduleur [6].

II.5. Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA)

La simulation numérique joue un rôle crucial dans la modélisation, l'analyse et la simulation précise des systèmes. De nos jours, il existe une vaste gamme de logiciels utilisés pour l'étude des machines électriques. Pour simuler le comportement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB/SIMULINK, réputé pour sa fiabilité et ses fonctionnalités avancées. Les paramètres de la MADA, disponibles dans l'annexe (A), sont alimentés initialement par un réseau triphasé équilibré.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés de manière claire dans les figures suivantes.

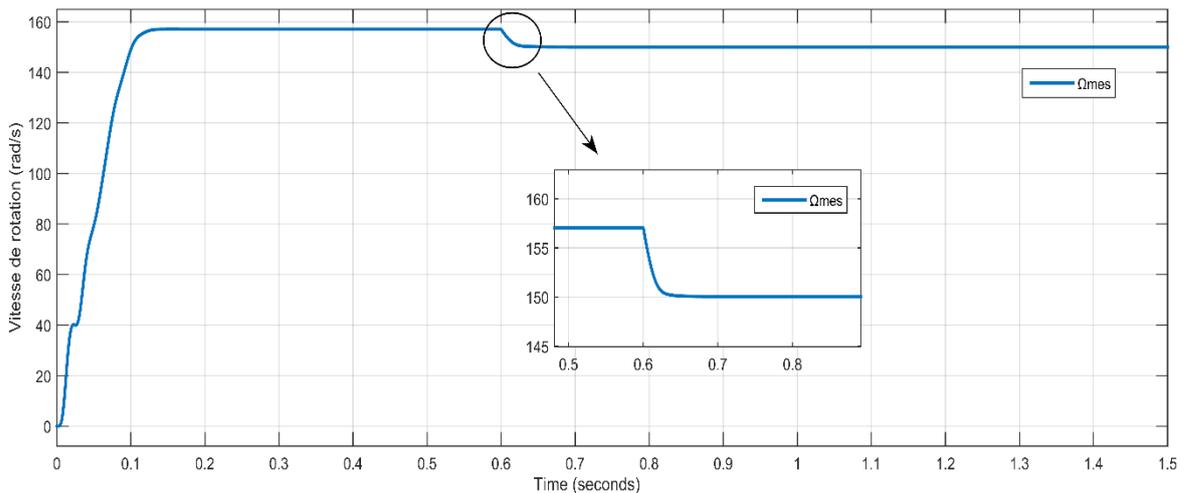


Figure II.11.a: Résultat de la vitesse de la machine .

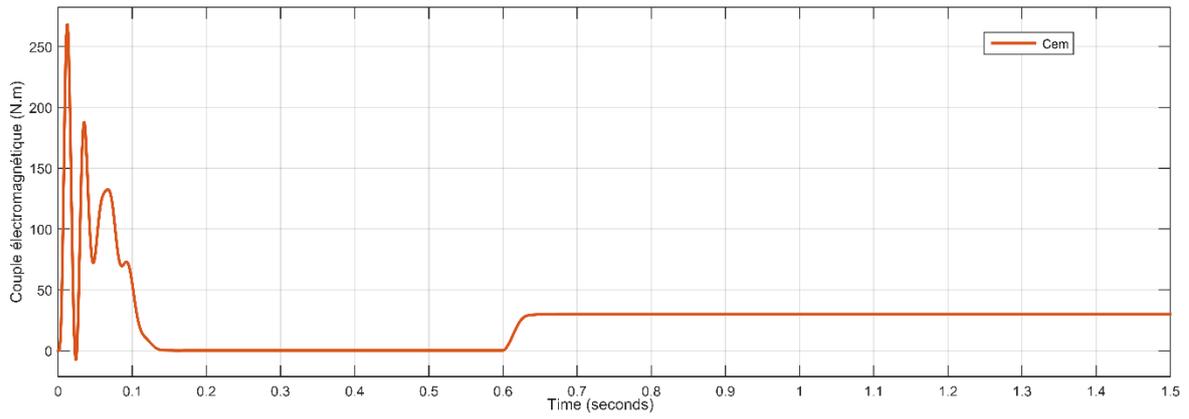


Figure II.11.b: Résultat du couple électromagnétique

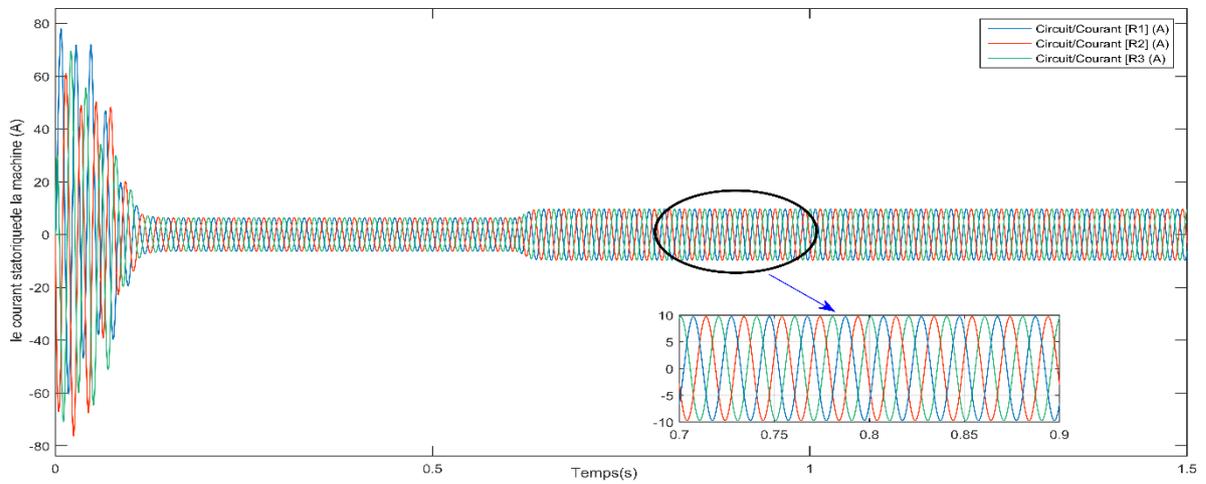


Figure II.11.c: Résultat du courant statorique.

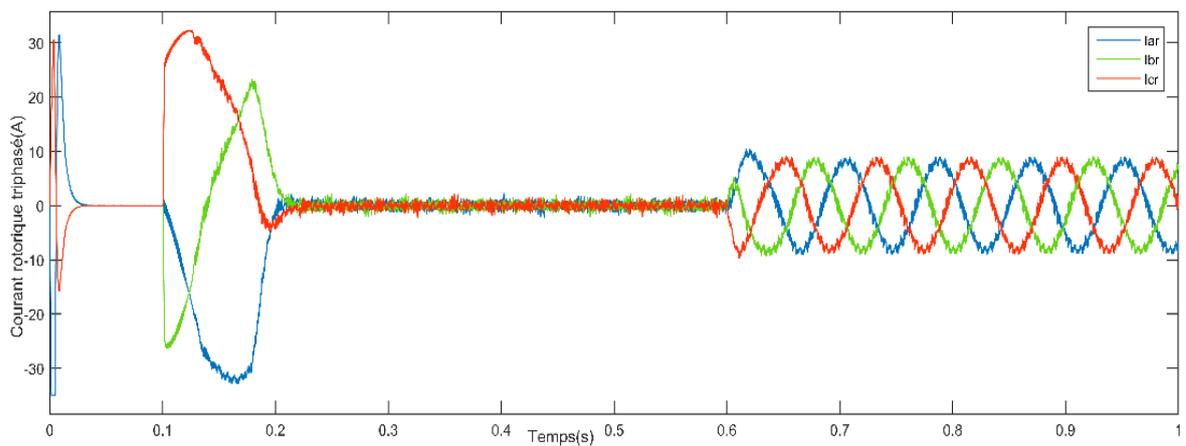


Figure II.11.d: Résultat du courant rotoriques

Figure II.11 : Résultats de simulation de la MADA avec un couple de charge (30 N.m) à $t=0.6$ sec.

La Figure (II.5) illustre le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sous une charge nominale de 30 N.m, après un démarrage à vide sans alimentation du rotor. On peut observer que la vitesse atteint sa valeur finale d'environ 157 rd/s avec un temps de réponse de 0.15 seconde, ce qui est similaire au fonctionnement d'une machine asynchrone conventionnelle. De plus, le courant du rotor reste faible à cette étape.

Après l'introduction de la charge à l'instant $t=0,6$ seconde, la caractéristique de la vitesse montre une légère diminution de la vitesse de 157 rad/s à environ 150,05 rad/s, ce qui correspond à une augmentation du glissement de la machine. Par conséquent, on observe également une augmentation des courants statorique et rotorique.

L'introduction de la charge entraîne une diminution de la vitesse de rotation, ce qui est une conséquence directe de l'augmentation du glissement. En conséquence, les courants statorique et rotorique augmentent pour compenser la charge supplémentaire imposée à la machine. Cela démontre la capacité de la MADA à réagir et à s'adapter aux variations de charge, assurant ainsi un fonctionnement stable et efficace.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère de Park lié au champ tournant, en prenant en compte les conditions de régime quelconque. Ce modèle a été développé en considérant certaines hypothèses simplificatrices nécessaires pour notre étude. Notre objectif principal était de proposer un modèle adapté à la commande de la machine. De plus, nous avons également procédé à la modélisation et à la simulation de l'onduleur.

Les résultats de nos simulations ont clairement démontré que la MADA présente des problèmes de sensibilité à la charge en boucle ouverte. Dans de tels cas, l'utilisation de commandes bouclées, en particulier les commandes de type vectoriel, devient indispensable.

Le prochain chapitre sera entièrement dédié à la commande de la MADA. Nous aborderons en détail les principes et les techniques de la commande vectorielle, qui permettent de contrôler avec précision la vitesse et le couple de la machine. Grâce à cette approche de commande avancée, nous espérons résoudre les problèmes de sensibilité à la charge et améliorer les performances globales de la MADA.

CHAPITRE III :
Commande vectorielle de la MADA

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le principe fondamental de la commande vectorielle. Ensuite, nous examinons le contrôle à flux à orienté, à savoir le contrôle direct et le contrôle indirect, tout en fournissant un aperçu des observateurs de flux. Par ailleurs, nous exposons un bref rappel sur les méthodes de commande en courant et en tension. Ensuite, nous abordons le choix des régulateurs classiques, et enfin, nous effectuons une simulation suivie par une interprétation des résultats.

III.2. Théorie de la commande vectorielle de la MADA

III.2.1. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle, également connu sous le nom de commande par orientation de champ (FOC - Field-Oriented Control), est une technique de commande utilisée dans les systèmes de contrôle des moteurs électriques, en particulier les moteurs à courant alternatif (AC) tels que les moteurs asynchrones ou les moteurs synchrones à aimants permanents.

Le principe de base de la commande vectorielle est de contrôler indépendamment le flux magnétique et le couple du moteur électrique. Traditionnellement, les moteurs AC étaient commandés en utilisant une commande basée sur la tension ou la fréquence, ce qui ne permettait pas un contrôle précis et dynamique du moteur. La commande vectorielle a été développée pour résoudre ces problèmes.

La commande vectorielle consiste à transformer les grandeurs électriques triphasées du moteur (courants et tensions) du système triphasé en un système de référence bidimensionnel, appelé système de référence direct-quadratique (dq). Dans ce système, la grandeur directe (d) représente le flux magnétique produit par le moteur, tandis que la grandeur quadratique (q) représente le couple.

En utilisant des algorithmes de commande sophistiqués, la commande vectorielle permet de contrôler indépendamment le flux et le couple en ajustant les composantes directes et quadratiques du courant fourni au moteur. Cela permet d'obtenir un contrôle précis du moteur et d'atteindre des performances élevées en termes de dynamique, d'efficacité et de réponse aux variations de charge.

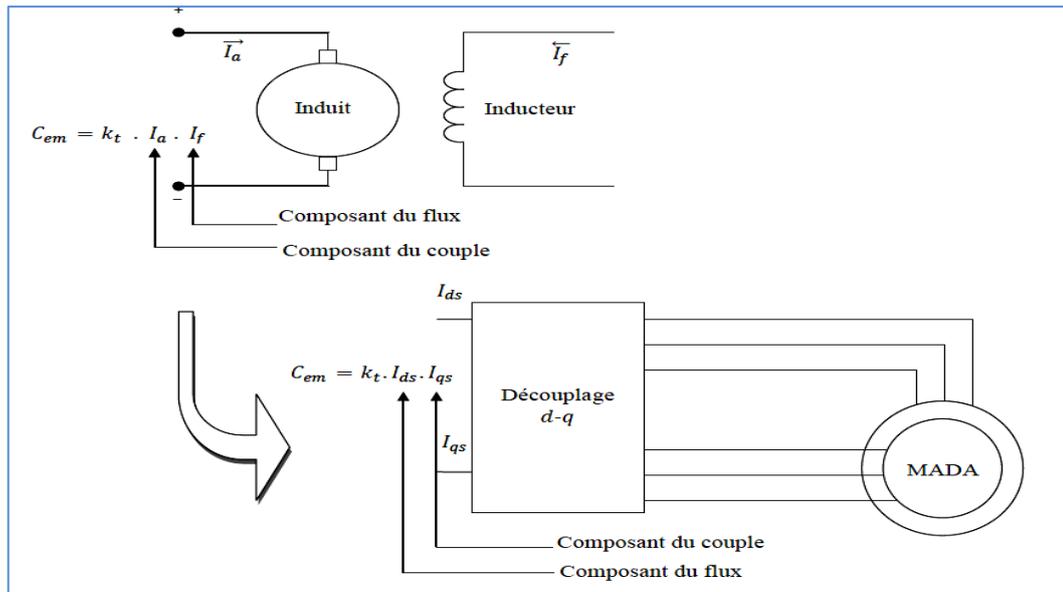


Figure III.1 : Schéma de principe du découplage pour la MADA par analogie avec la Machine à courant continu [18].

III.2.2 Orientation du flux rotorique

Soit plusieurs équations à résoudre pour déterminer l'état de fonctionnement de la machine :

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

Les équations liant les flux sont :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} ; \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Pour mettre en œuvre la loi de commande, nous optons pour l'alignement du flux rotorique le long de l'axe d représenté dans la figure (III.2).

En conséquence, nous obtenons le résultat souhaité :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

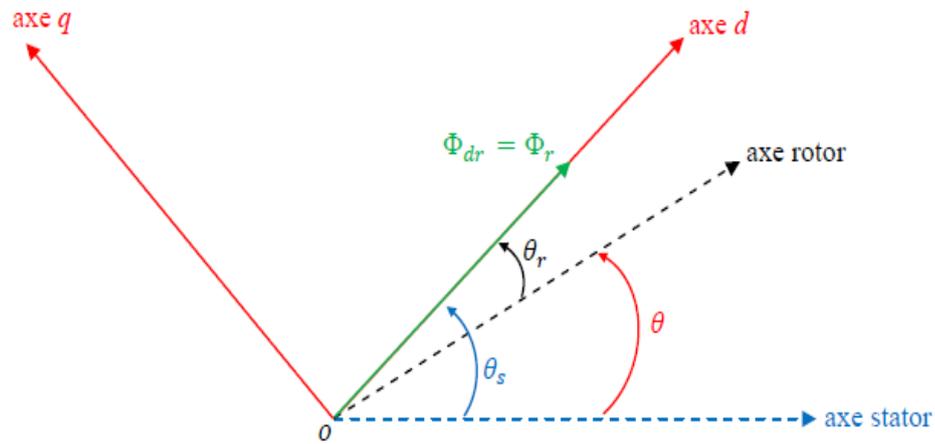


Figure III.2 : Orientation du flux statorique sur l'axe direct [19].

Donc :

$$\Phi_{qr} = 0 \iff \begin{cases} I_{qr}^* = -\frac{M}{L_r} I_{qs}^* \\ I_{qs}^* = -\frac{L_r}{M} I_{qr}^* \end{cases} \quad (III.4)$$

On peut décrire la relation entre le couple électromagnétique et courant :

$$\begin{cases} \Phi_{qs} = -\sigma \frac{L_r L_r}{M} I_{qs} \\ C_{em} = P \cdot M (I_{qs} I_{dr} - I_{dr} I_{qs}) = -P \Phi_{dr}^* I_{qr}^* \end{cases} \quad (III.5)$$

III.3. Méthodes de la commande vectorielle

La commande vectorielle à flux rotorique orienté peut être classée comme directe ou indirecte en fonction de la méthode utilisée pour estimer le vecteur du flux rotorique [12].

Pour atteindre cet objectif, il existe deux approches possibles :

- La méthode directe
- La méthode indirecte

III.3.1. Méthode directe de la commande vectorielle

Pour assurer le découplage entre le couple et le flux, il est nécessaire de mesurer électriquement la position du flux à orienter. Cela peut être réalisé en utilisant soit un capteur physique de flux, soit un modèle dynamique de flux. En effet, l'information sur le flux

rotorique est utilisée pour calculer algébriquement la position du flux rotorique, comme illustré dans la figure (III.3) [18].

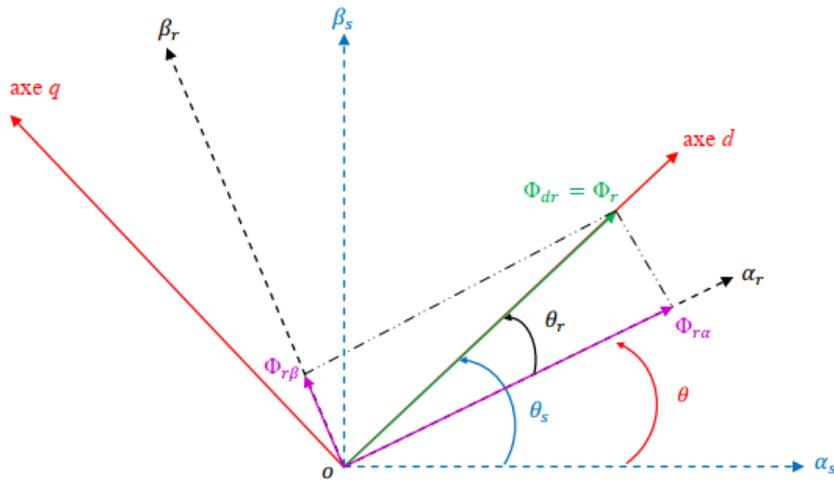


Figure III.3 : Diagramme vectoriel de la MADA correspondant à une magnétisation par le stator [19].

les flux rotoriques :

$$\Phi_r = \sqrt{\Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2} \quad (\text{III.6})$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{r\beta}}{\Phi_{r\alpha}} \right) \quad (\text{III.7})$$

$\sin(\theta_s)$ et $\cos(\theta_s)$ Les valeurs nécessaires pour la transformation de Park peuvent être obtenues directement en utilisant les méthodes suivantes (voir figure (III.3)) :

$$\sin \theta_s = \frac{\Phi_{r\beta}}{\sqrt{\Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2}} \quad (\text{III.8})$$

$$\cos \theta_s = \frac{\Phi_{r\alpha}}{\sqrt{\Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2}} \quad (\text{III.9})$$

III.3.2. Méthode indirecte de la commande vectorielle

La méthode indirecte implique de ne pas estimer directement l'amplitude du flux rotorique, mais plutôt d'utiliser l'amplitude de référence Φ_{dr} de manière indirecte [19].

On peut obtenir ces valeurs à l'aide d'une relation de défluxage formulée comme suit :

$$\Phi_{dr} = \begin{cases} \Phi_r^* & \text{Si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \Phi_r^* \cdot \frac{\Omega_n}{|\Omega|} & \text{Si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Où :

III.4. Mise en œuvre de la commande à flux orienté de la MADA

La magnétisation de la machine peut être utilisée pour contrôler le module du flux rotorique, et cela peut être réalisé de différentes manières :

- Soit par le stator seul :

$$I_{dr} = 0 \iff \Phi_{dr} = M I_{ds} \quad (\text{III.11})$$

- Soit par le rotor seul

$$I_{ds} = 0 \iff \Phi_{dr} = L_r I_{dr} \quad (\text{III.12})$$

- Une alternative consiste à utiliser une méthode de magnétisation mixte, impliquant à la fois le stator et le rotor

$$\Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \quad (\text{III.13})$$

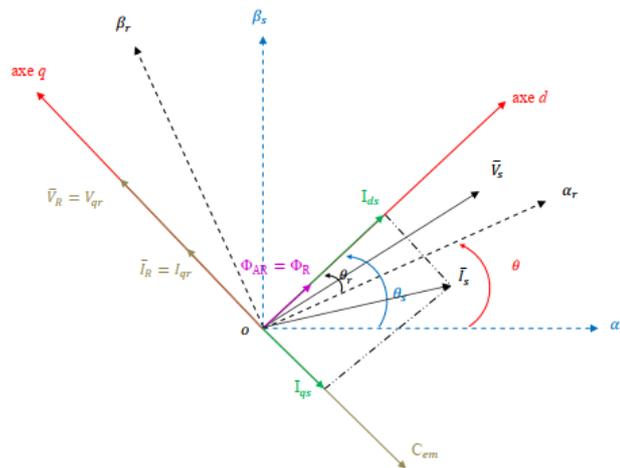


Figure III.4 : Diagramme vectoriel de la MADA correspondant à une magnétisation par le stator [19].

III.4.1. Contrôle des courants et termes de compensation

D. LECOQ a introduit cette méthode qui requiert l'utilisation de quatre correcteurs de courant.

Son objectif est d'assurer une séparation efficace des grandeurs selon les axes d et q. Pour y parvenir, il introduit de nouvelles tensions transformées de la manière suivante [19] :

$$\begin{cases} V_{tds} = V_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_r} V_{dr} \\ V_{tdr} = V_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_s} V_{ds} \end{cases} \quad \begin{cases} V_{tqs} = V_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_r} V_{qr} \\ V_{tqr} = V_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_s} V_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En s'appuyant sur l'alignement du flux rotorique et en maintenant un facteur de puissance unitaire au niveau du rotor, nous parviendrons [7] :

$$\begin{cases} \Phi_{qr} = 0 \\ I_{dr} = 0 \\ I_{dr} = \frac{\Phi_{dr}}{M} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_{dr} = \frac{M}{L_r} I_{qs} \quad (\text{III.15})$$

D'où :

$$\begin{cases} V_{tds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} - R_r \frac{M_{sr}}{L_r} I_{dr} - \Phi_{qr} \omega_s + \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{tqs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} - R_r \frac{M_{sr}}{L_r} I_{qr} - \Phi_{ds} \omega_s + \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{dr} (\omega_s - \omega) \\ V_{tdr} = R_r I_{dr} + \sigma L_r \frac{dI_{dr}}{dt} - R_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{ds} - \Phi_{qr} (\omega_s - \omega) + \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{qs} \omega_s \\ V_{tqr} = R_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{dI_{qr}}{dt} - R_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qs} - \Phi_{dr} (\omega_s - \omega) + \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{ds} \omega_s \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Soit :

$$\begin{cases} V_{tds} = V_{tdsc} + V_{tdsc1} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + V_{tdsc1} \\ V_{tqs} = V_{tqsc} + V_{tqsc1} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + V_{tqsc1} \\ V_{tdr} = V_{tdrc} + V_{tdrc1} = R_r I_{dr} + \sigma L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + V_{tdrc1} \\ V_{tqr} = V_{tqrc} + V_{tqrc1} = R_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + V_{tqrc1} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Où V_{tdsc1} , V_{tqsc1} , V_{tdrc1} , V_{tqrc1} Les termes mentionnés sont considérés comme des termes de compensation.

$$\begin{cases} \frac{I_{ds}(s)}{V_{tqsc}} = \frac{I_{ds}(s)}{V_{tqs}(s)} = \frac{1}{R_r + \sigma L_s s} \\ \frac{I_{qr}(s)}{V_{tqrc}} = \frac{I_{dr}(s)}{V_{tdrc}(s)} = \frac{1}{R_s + \sigma L_r s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Le schéma de régulation :

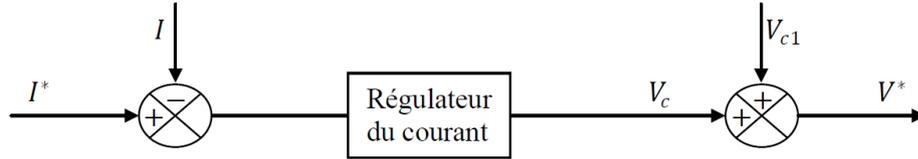


Figure.III.5 : régulation d'un courant par la méthode de LECOQ.

III.4.2. Le découplage par compensation

Les relations entre les composantes statoriques et rotoriques de chaque axe peuvent être exprimées à l'aide des fonctions de transfert, dérivées de l'équation (III.16), de la manière suivante :

$$\frac{I_{qs}(s)}{V_{tqsc}(s)} = \frac{I_{ds}(s)}{V_{tdsc}(s)} = \frac{1}{R_r + \sigma T_s \cdot s} \quad (\text{III.19})$$

$$\frac{I_{qr}(s)}{V_{tqrc}(s)} = \frac{I_{dr}(s)}{V_{tdrc}(s)} = \frac{1}{R_s + \sigma T_r \cdot s} \quad (\text{III.20})$$

Les fonctions de transfert associées sont quasi-identiques et dépendent des paramètres du rotor et du stator de la machine.

Les courants de référence :

$$\begin{cases} I_{ds}^* = \frac{1}{M} \Phi_r^* ; I_{qs}^* = \frac{L_r}{PM \Phi_r^*} C_{em}^* \\ I_{dr}^* = \frac{V_{dr}}{R_r} ; I_{qr}^* = \frac{1}{M} \Phi_r^* C_{em}^* \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

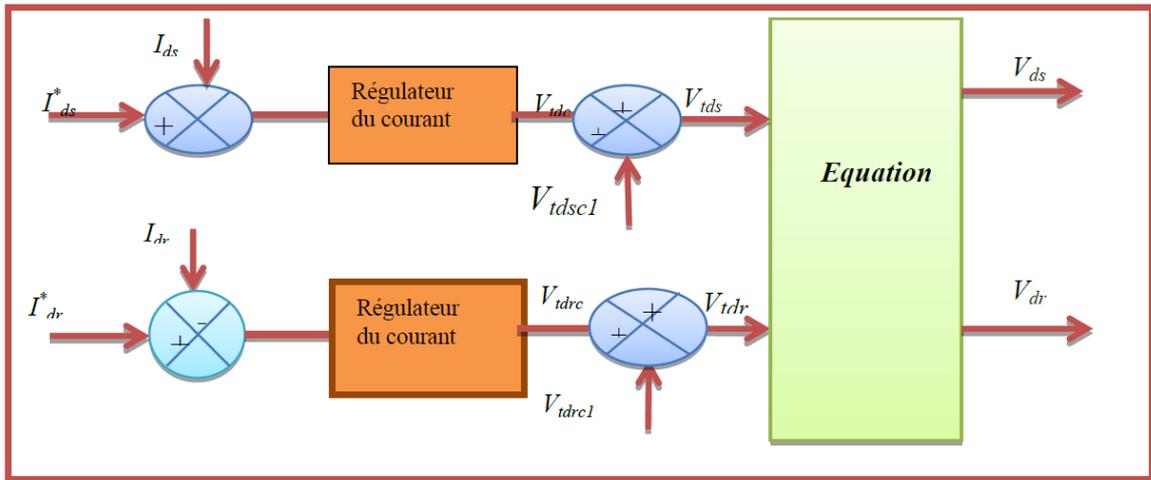


Figure III.6 : Régulation des courants statoriques et rotoriques de l’axe d [6].

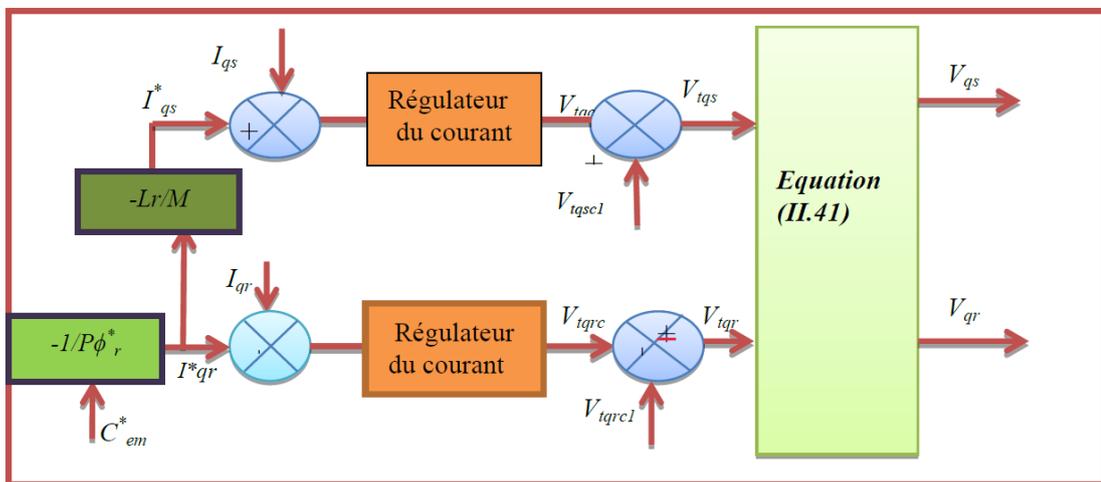


Figure III.7 : Régulation des courants statoriques et rotoriques de l’axe q [6].

III.4.3. Calcul des correcteurs

Nous utilisons des correcteurs PI pour le réglage des courants en raison de leur facilité de mise en œuvre. Ces correcteurs garantissent une erreur statique nulle grâce à l'intégration et une réactivité déterminée par la proportionnalité. Leur calcul est basé sur le principe d'imposition des pôles [20].

III.4.3.1. Correcteurs des courants rotoriques

Nous avons l'équation suivante :

$$\frac{I_{qr}(s)}{V_{tqrc}(s)} = \frac{I_{dr}(s)}{V_{tdr}(s)} = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \sigma T_r s} \quad (III.22)$$

Avec : $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$

De même, les composantes du courant rotorique (I_{dr}, I_{qr}) pour la partie statorique sont régulées par une boucle commune, comme illustré par la figure (III.12) :

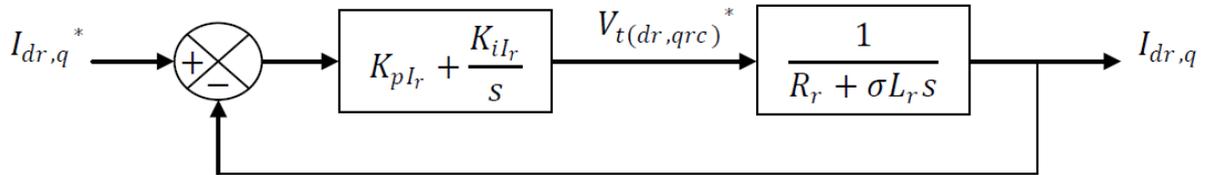


Figure III.8 : Schéma bloc de régulation des courants rotoriques.

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{Ir}(s) = \frac{I_{dr,q}}{I_{dr,q}^*} = \frac{\frac{1}{\sigma T_r R_r} (K_p I_r s + k_{ilr})}{s^2 + s \left(\frac{1 + K_p I_r}{\frac{R_r}{\sigma T_r}} \right) + \frac{K_{ilr}}{\sigma T_r R_r}} \tag{III.23}$$

Les correcteurs des courants rotoriques suivent La même procédure est utilisée pour les correcteurs des courants rotoriques que celle appliquée aux courants statoriques, ce qui implique que les paramètres des correcteurs sont identiques. Ces paramètres sont répertoriés dans le tableau (III.2).

Tableau III.2 : Paramètres des correcteurs des courants rotoriques.

	K_{pI_r}	K_{iI_r}
Correcteur IP	$(2\xi \cdot \omega_0 \sigma T_r - 1) / R_r$	$\omega_0^2 \sigma T_r R_r$

III.4.3.2. Correcteurs des courants statoriques

La fonction de transfert reliant les composantes statoriques de chaque axe de la MADA est rappelée :

$$\frac{I_{qs}(s)}{V_{tqs}(s)} = \frac{I_{ds}(s)}{V_{tds}(s)} = \frac{1}{R_s + \sigma T_s s} \tag{III.24}$$

Avec : $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$

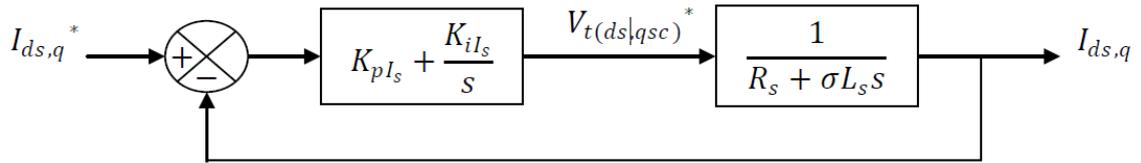


Figure III.9 : Schéma bloc de régulation des courants statoriques [21].

Ainsi, en utilisant l'amortissement ξ et la pulsation propre ω_0 , nous pouvons déterminer les paramètres du correcteur PI.

En faisant correspondre les équations (II.23), Voici les paramètres obtenus pour le correcteur PI :

Tableau III.3 : Paramètres des correcteurs des courants statoriques.

	K_{pI_s}	K_{iI_s}
Correcteur IP	$(2\xi \cdot \omega_0 \sigma T_s - 1)/R_s$	$\omega_0^2 \sigma T_s R_s$

III.4.4. Régulation de vitesse de la MADA

Pour mieux comprendre la fonction de transfert TBF(s) d'un système du second ordre, une approche consiste à réduire le problème en atténuant la variation brusque de la consigne de vitesse.

$$\frac{\Omega_{ref}}{\Omega^*} = \frac{1}{1+sT_f} \tag{III.25}$$

Ensuite, nous obtenons le schéma bloc illustré dans la figure III.10. Cette configuration de correction est connue sous le nom de correcteur IP.

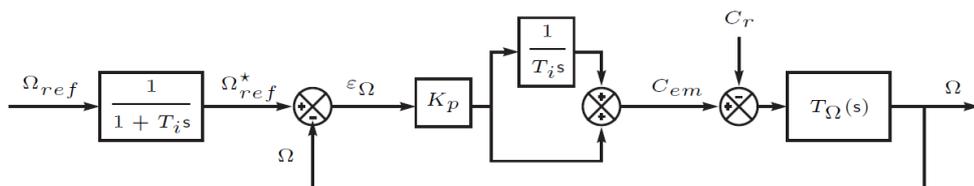


Figure III.10 : Boucle de régulation de vitesse avec correcteur IP [21].

III.4.5. Correcteur IP avec saturation dans la chaîne directe

Nous introduisons cette contrainte dans le schéma illustré dans la figure.

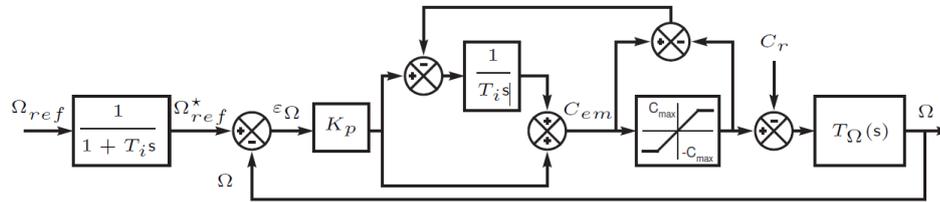


Figure III.11 : Boucle de régulation de vitesse avec correcteur IP et saturation du Couple [21].

III.4.5.1. Synthèse du correcteur IP de vitesse

L'équation mécanique de la MADA est de la forme :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (III.26)$$

Il est important de noter que notre commande utilise une approche de contrôle à flux rotorique orienté, ce qui signifie que :

$$C_{em} = \frac{PM\varphi_{dr}}{L_r} I_{qs} \quad (III.27)$$

Avant de mettre en œuvre une consigne de vitesse et afin d'exciter la machine, nous sommes autorisés à remplacer φ_{dr} par sa référence φ_{dr}^* dans la relation (II.). Ainsi, nous obtenons l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{PM\varphi_{dr}}{L_r} I_{qs} = \frac{PM\varphi_{dr}^*}{L_r} I_{qs} = K_{em} I_{qs} \quad (III.28)$$

$$\text{Et } J \frac{d\Omega}{dt} = K_{em} I_{qs} - f\Omega - C_r \quad (III.29)$$

En effectuant la transformation de Laplace sur cette équation, on obtient l'équation suivante

$$\Omega(s) = \frac{K_{em} K_m}{1+T_m s} I_{qs}(s) - \frac{K_m}{1+T_m s} C_r(s) \quad (III.30)$$

Avec : $K_m = \frac{p}{f}$ et $T_m = \frac{J}{f}$

$C_r(s)$ représente une perturbation d'entrée pour la vitesse, tandis que l'entrée principale est $I_{sq}(s)$. Par conséquent, le schéma bloc de la régulation sera conforme à celui présenté dans la figure (III.12).

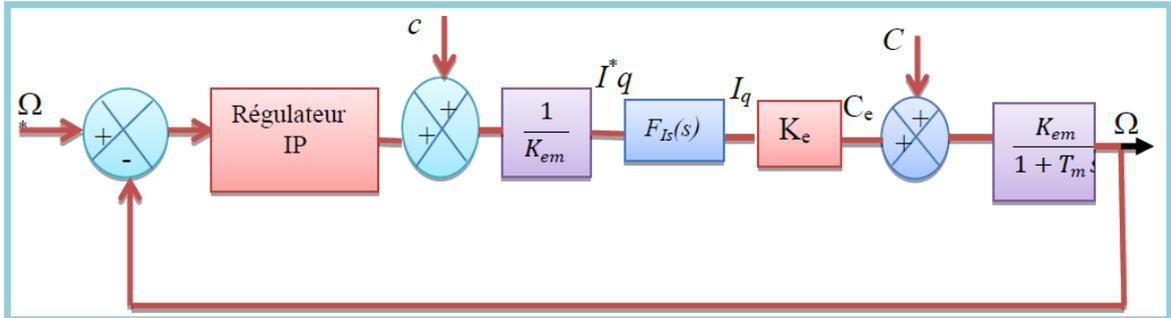


Figure III.12 : Chaîne de régulation de la vitesse [6].

La fonction de transfert en boucle ouverte de la vitesse corrigée est exprimée par :

$$G(s) = C_{\Omega}(s) \cdot H_{I_s}(s) \cdot \frac{K_{em}K_m}{1+T_m \cdot s} \tag{III.31}$$

Un correcteur de type PI (Proportionnel-Intégral) sera utilisé pour satisfaire les critères spécifiés dans le cahier des charges, en garantissant que :

$$C_{\Omega}(s) = K_{p\Omega} \left(1 + \frac{1}{K_{i\Omega}s} \right) \tag{III.32}$$

En utilisant le principe d'imposition des pôles en boucle fermée, les paramètres du correcteur PI sont déterminés de la manière suivante :

Tableau III.5 : Paramètres du correcteur IP de la vitesse.

	$K_{p\Omega}$	$K_{i\Omega}$
Correcteur IP	$(2\xi \cdot \omega_0 T_m - 1)/K_m$	$\omega_0^2 T_m / K_M$

III.5. Structure générale de la Commande vectorielle de la MADA

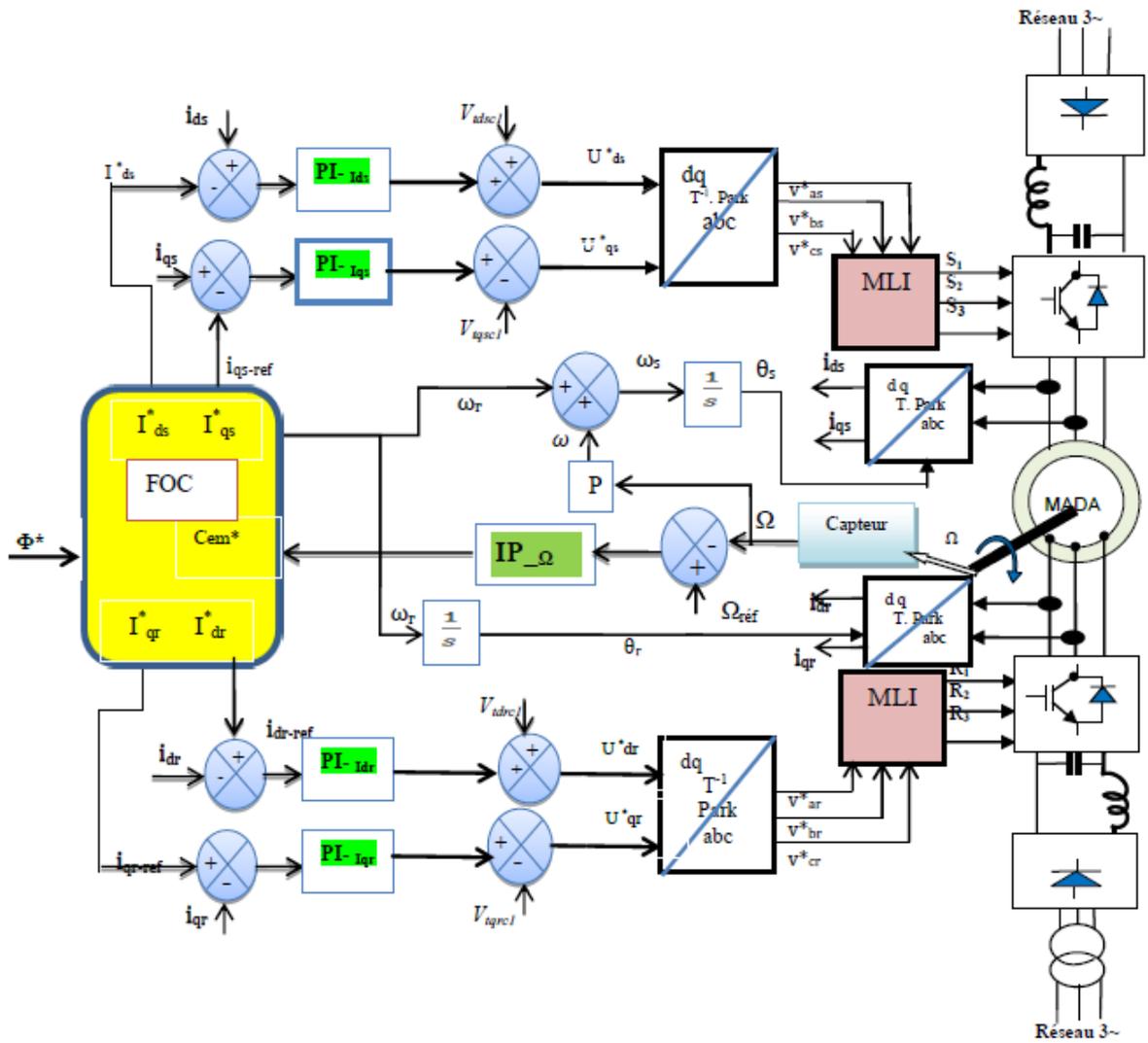


Figure III.13 : Schéma globale de la commande FOC d'une MADA [6].

III.6. Simulation de la commande vectorielle de la MADA

III.6.1. Profils de poursuite et de régulation

Afin de mettre en évidence les propriétés et les limites de la commande vectorielle, nous avons effectué plusieurs séries de simulations numériques. Dans ce chapitre, ces simulations visent trois objectifs principaux :

- Une évaluation des performances de l'association entre le moteur, son alimentation et la commande vectorielle est effectuée en utilisant des trajectoires de vitesse prédéfinies. Cette analyse permet de mesurer l'efficacité du système dans le suivi de ces trajectoires et d'identifier d'éventuelles améliorations à apporter.
- Analyse du comportement du processus à commander face aux variations des conditions de fonctionnement. En étudiant les réactions du système dans différentes situations, nous pouvons mieux comprendre sa sensibilité aux changements et identifier les mesures correctives appropriées.
- Vérification de la robustesse de la commande vectorielle par rapport aux variations des paramètres du moteur. Cette étape consiste à évaluer la capacité du système à maintenir ses performances malgré les fluctuations des paramètres, tels que la résistance, l'inductance ou les pertes mécaniques.

1-Dans le but d'analyser les performances de suivi pour différentes consignes de vitesse (voir **Figure II.15**)

Au moment ($t = 0.6s$), un couple de charge de 30 N.m est introduit. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes :

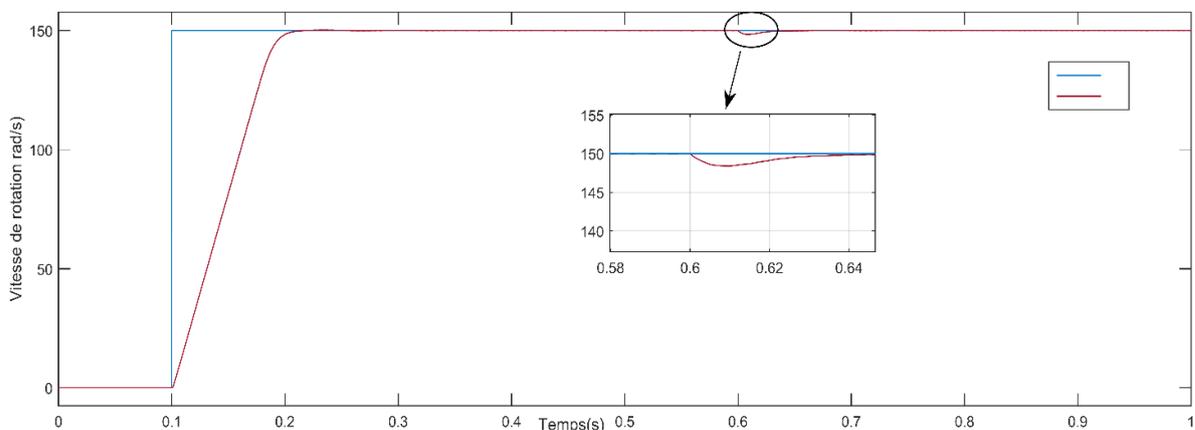


Figure III.14.a : Réponse de la vitesse pour la machine

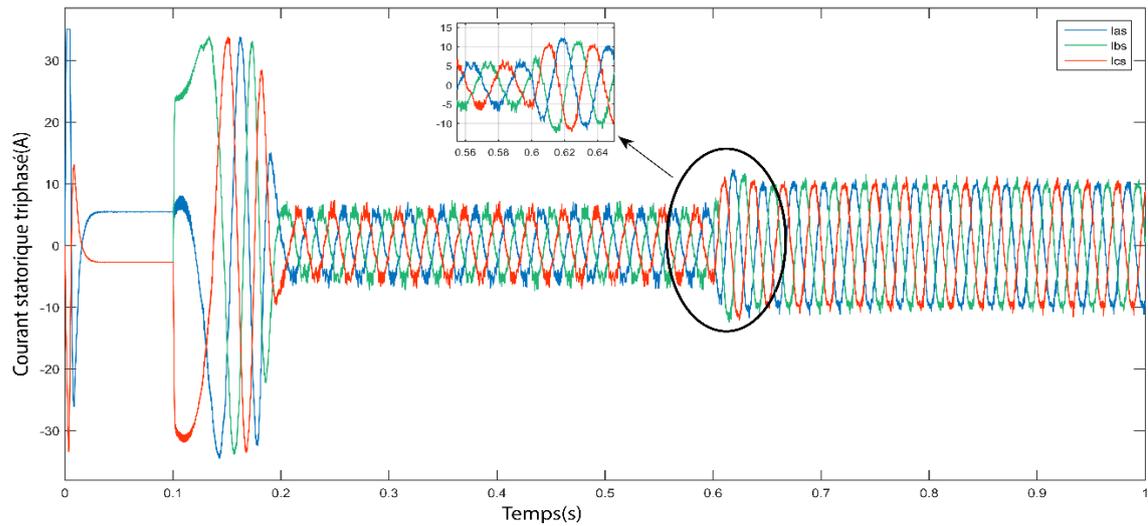


Figure III.14.b : Allure du courant statorique triphasé de la machine.

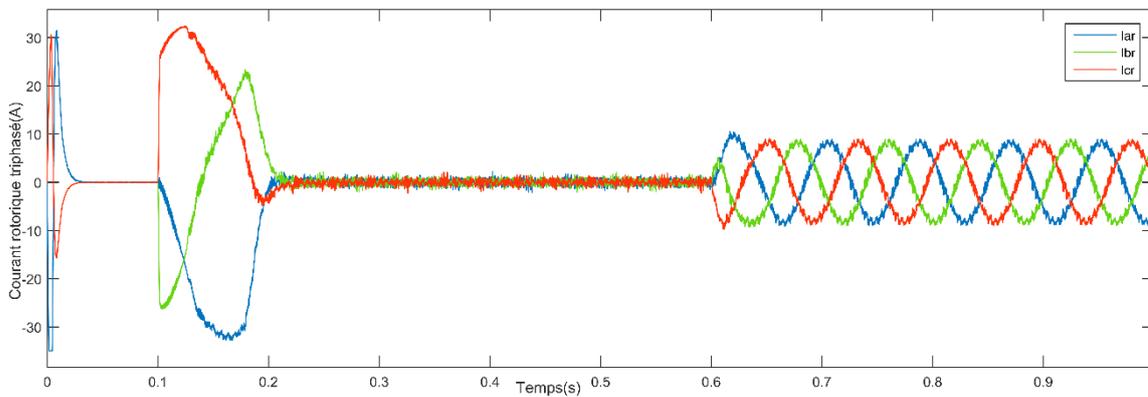


Figure III.14.c : Allure du courant rotorique triphasé de la machine.

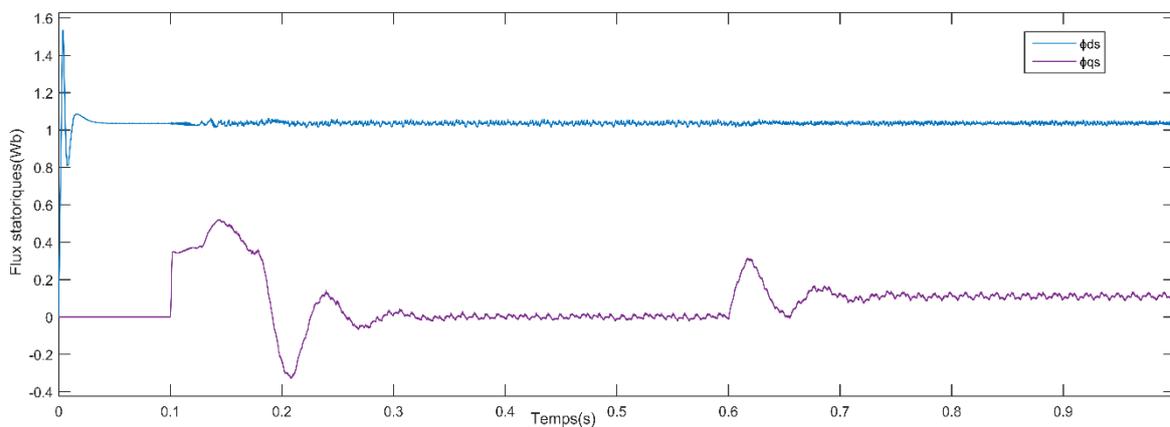


Figure III.14.d : Allure des flux statoriques en coordonnées dq .

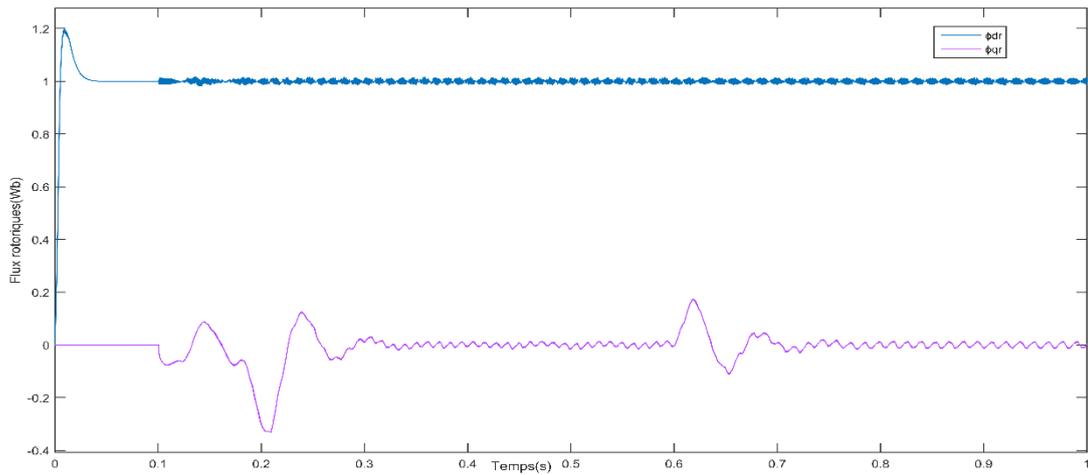


Figure III.14.e Allure des rotoriques en dq.

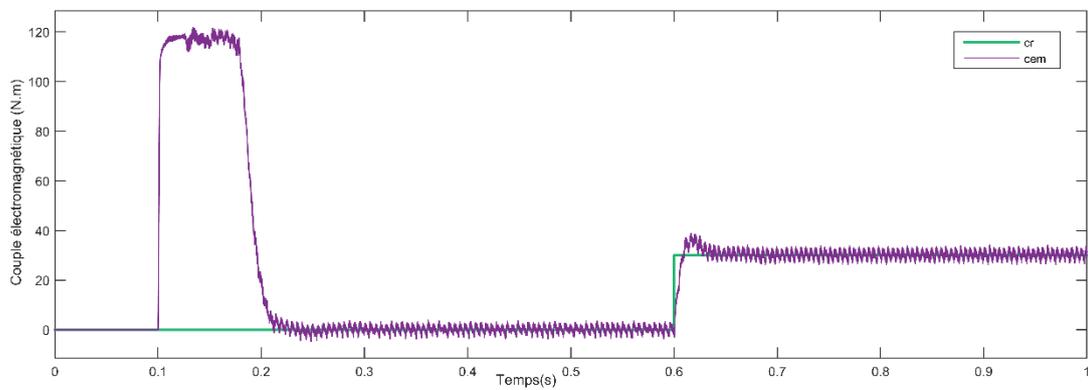


Figure III.14.f : Réponse de la Couple électromagnétique.

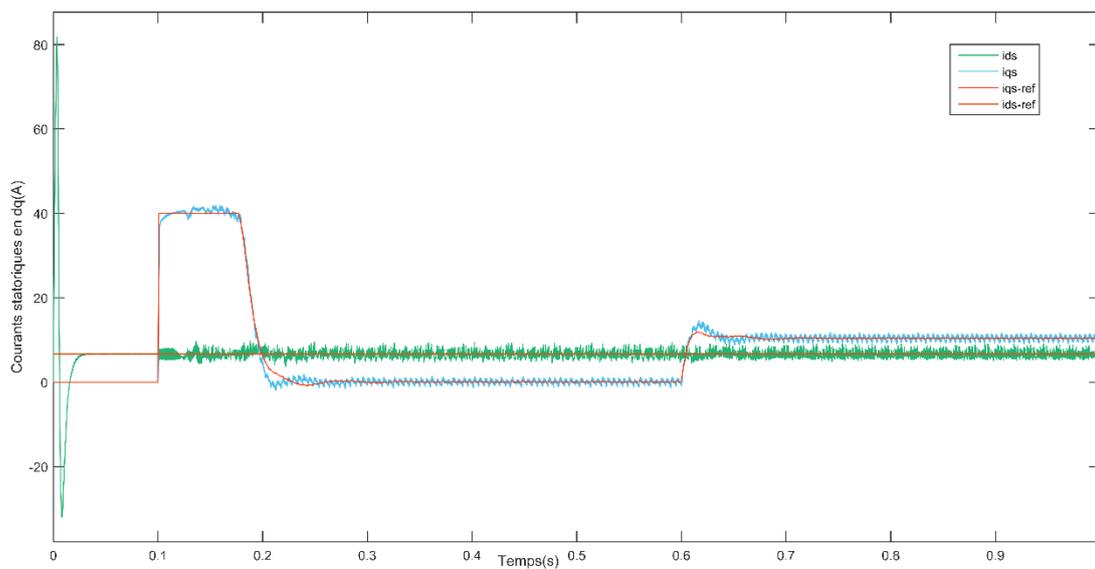


Figure III.14.g : Allure du courant statorique en dq.

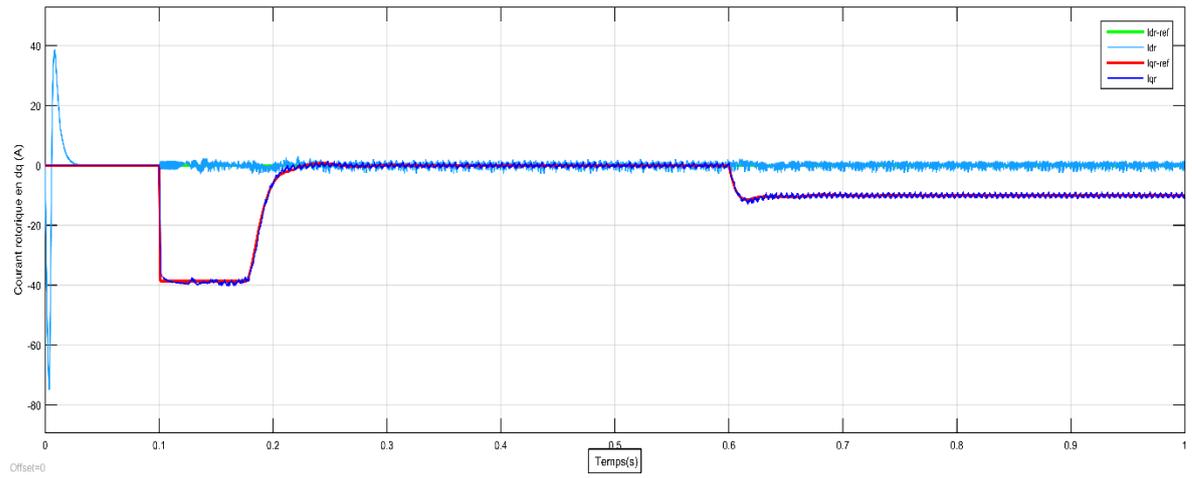


Figure III.14.h : Allure du courant rotorique en dq.

Figure II.14: Commande vectorielle d'une MADA à flux rotorique orienté

Il est observé une chute rapide immédiate après l'application de la charge, suivie d'une stabilisation à la valeur de référence de 150 (rd/min) pour la vitesse. De plus, le temps de réponse est remarquablement rapide, ne prenant que 0,1 seconde.

B- Une consigne rectangulaire a été utilisée, avec un changement brusque de vitesse de 150 tr/min à l'instant $t = 0$, suivi d'une inversion de sens de rotation à -150 tr/min à $t = 1.2s$. Cela est illustré dans la figure.

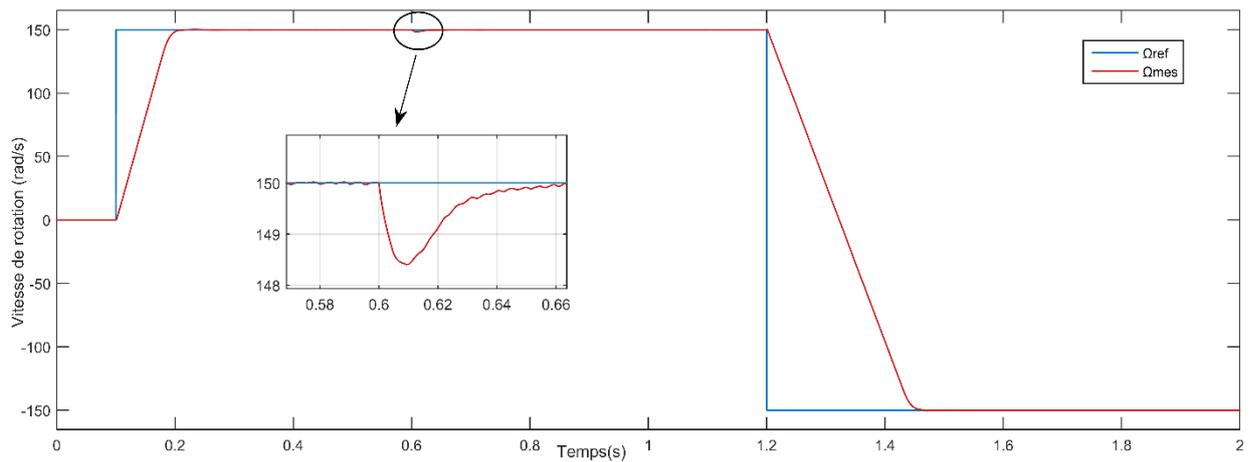


Figure III.15.a : Réponse de la vitesse pour la machine sens inversé.

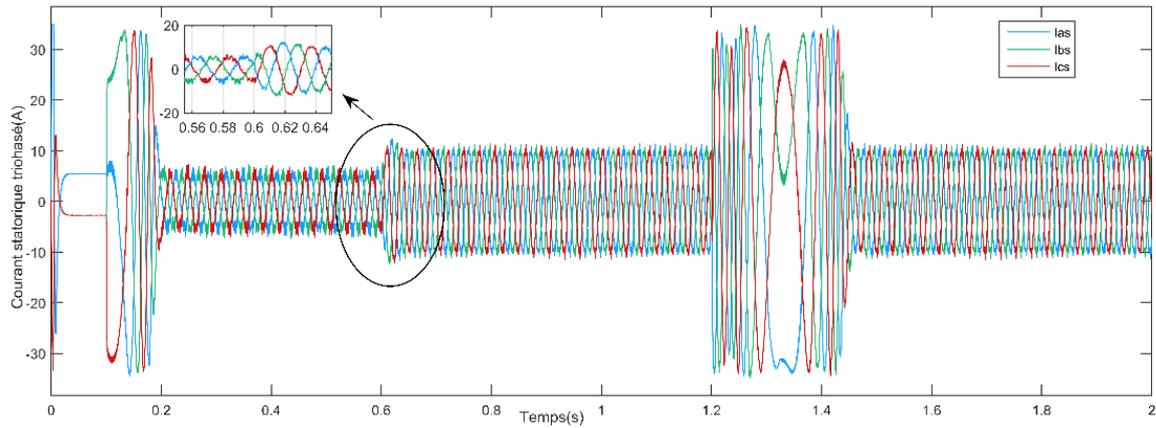


Figure III.15.b: Allure du courant statorique triphasé de la machine sens inversé.

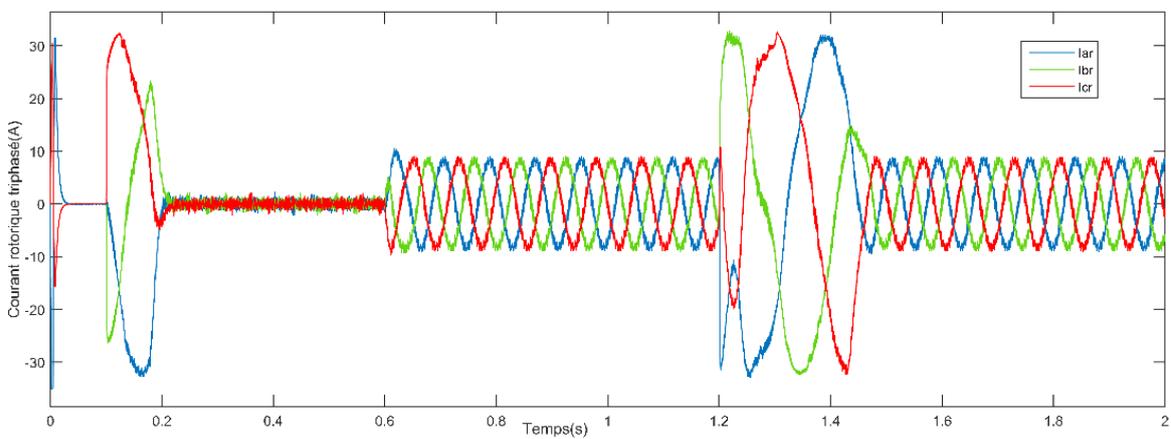


Figure III.15.c : Allure du courant rotorique triphasé de la machinesens inversé.

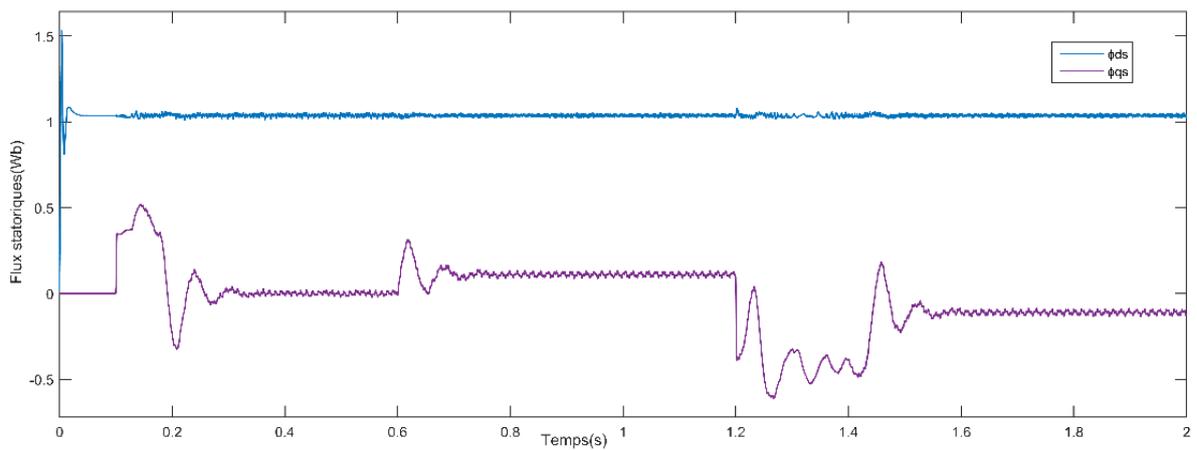


Figure III.15.d: Allure du flux statoriques en coordonnées dqsens inversé.

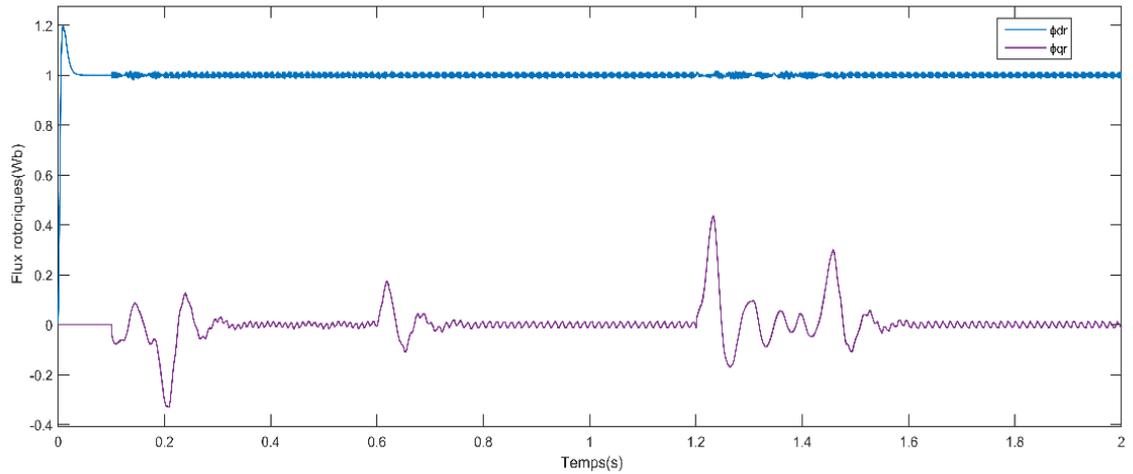


Figure III.15.e : Allure du rotoriques en dq sens inversé.

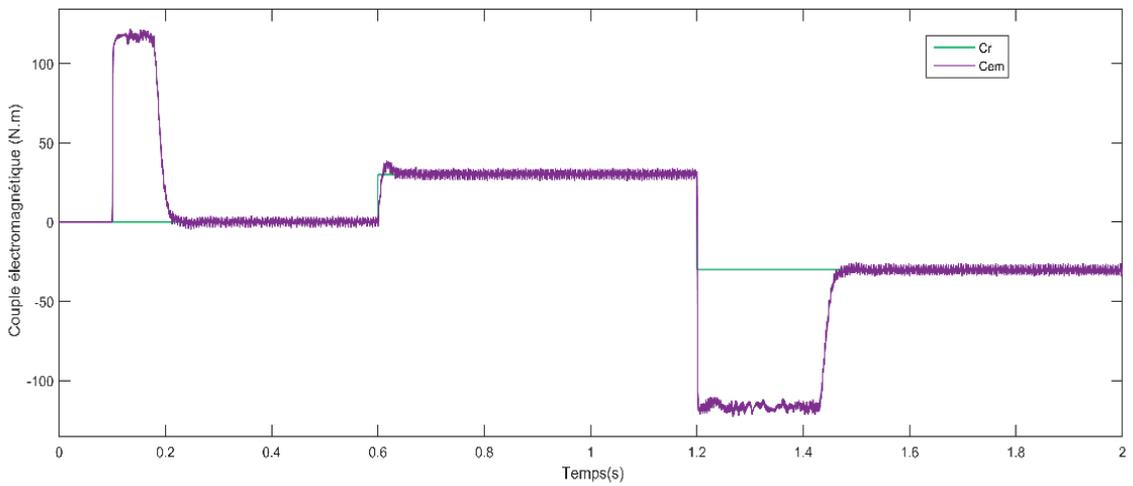


Figure III.15.f : Réponse du Couple électromagnétique de la machine sens inversé.

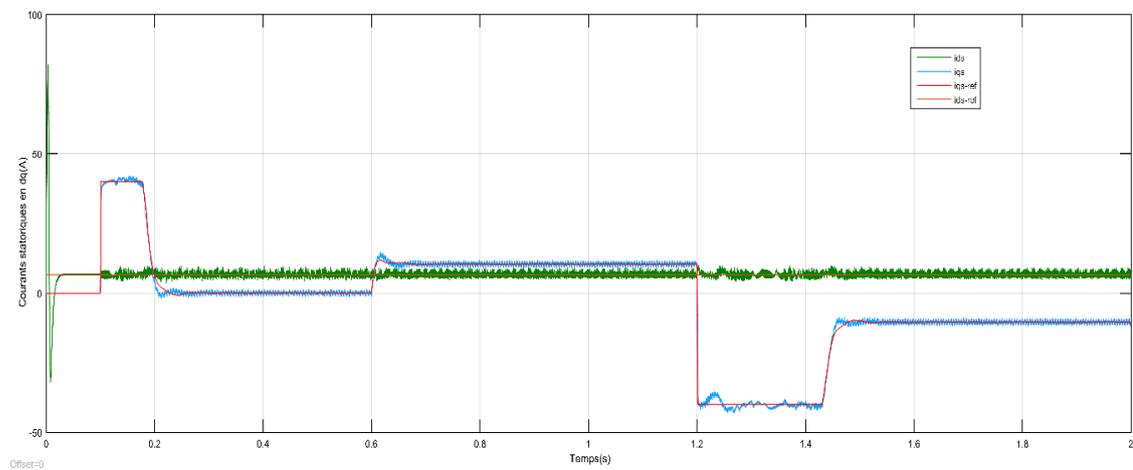


Figure III.15.g : Allure du courant statorique en dq sens inversé.

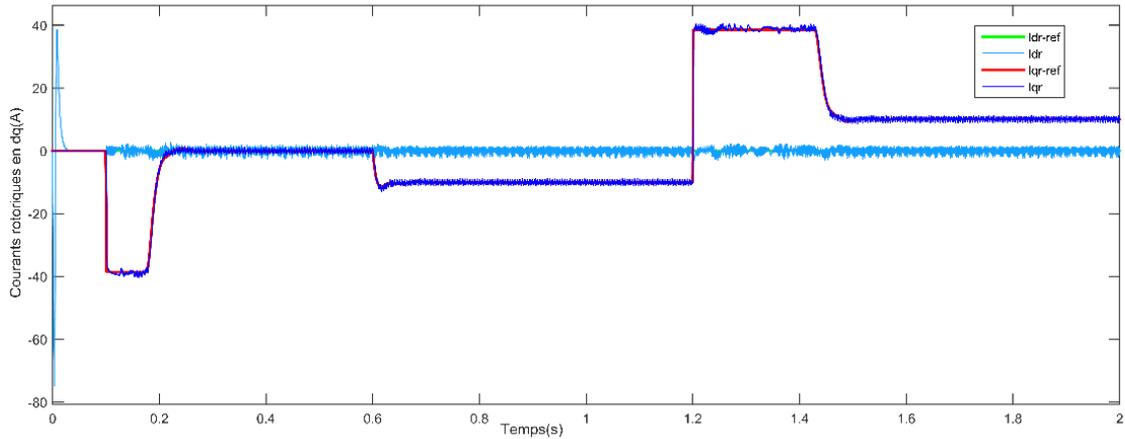


Figure III.15.h : Allure du courant rotorique en dq sens inversé.

Figure II.15: Résultats de simulation de la machine avec sens inversé.

Concernant la variation du couple, on remarque qu'après une période transitoire, il atteint une valeur qui compense le couple résistant appliqué. Le découplage entre le couple et le flux est maintenu, ce qui permet de les contrôler de manière indépendante.

III.6.2. Test de robustesse en basse vitesse et en haute vitesse :

Dans le but de mettre à l'épreuve la commande vectorielle d'une machine asynchrone face à des variations significatives de la référence de vitesse, une série de tests a été réalisée. Tout d'abord, nous avons effectué un changement de consigne de vitesse, passant de 0 à 50 rad/s en tant que basse vitesse, puis atteignant la vitesse nominale de 120 rad/s. Ensuite, nous avons poussé les limites en fixant une consigne de vitesse de 250 rad/s, correspondant à 147% de la vitesse Ω_n . Cette approche nous permet d'évaluer la capacité du système à maintenir des performances optimales même en présence de variations importantes de la référence de Vitesse .

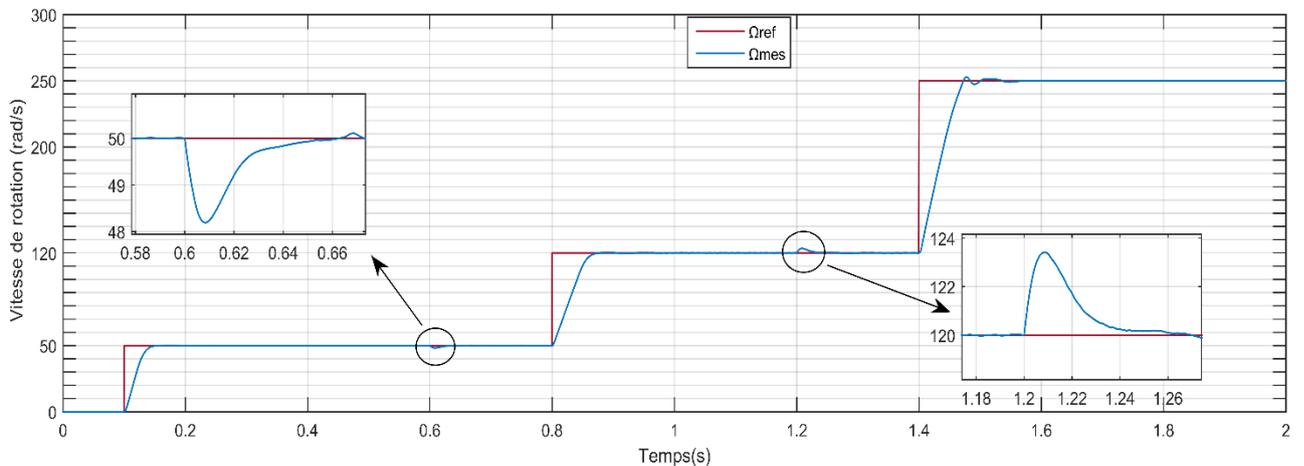


Figure II.16.a : Réponse de vitesse d'une machine en survitesse.

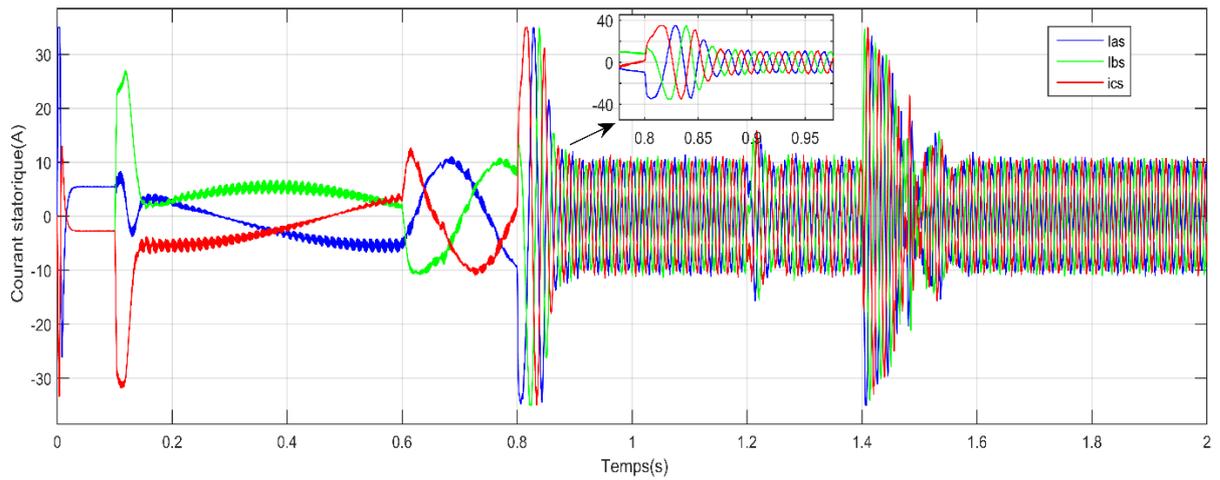


Figure III.16.b : Allure du courant statorique triphasé de la machine.

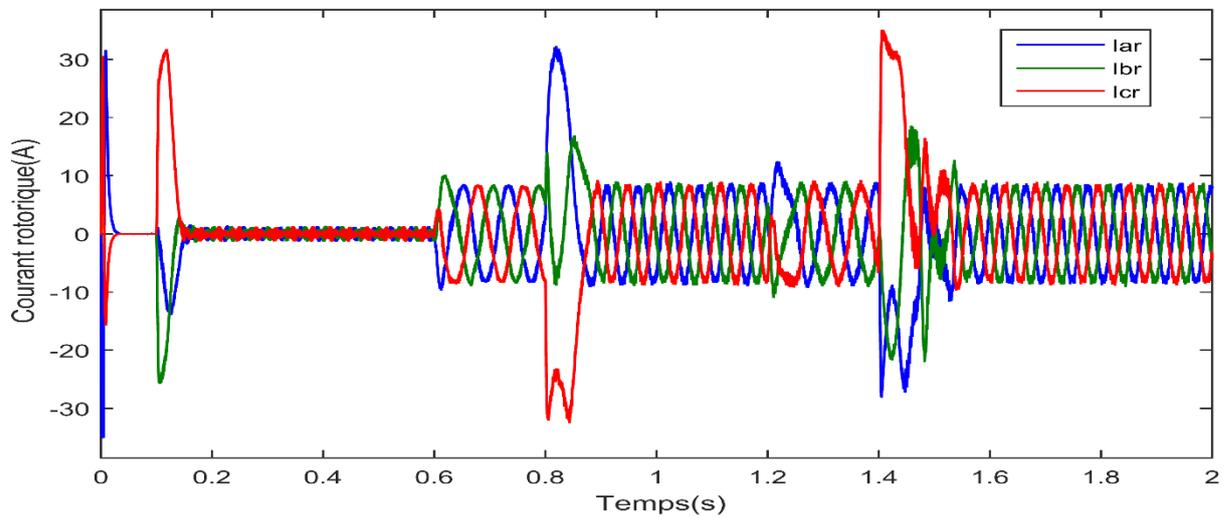


Figure III.16.c : Allure du courant rotorique triphasé de la machine.

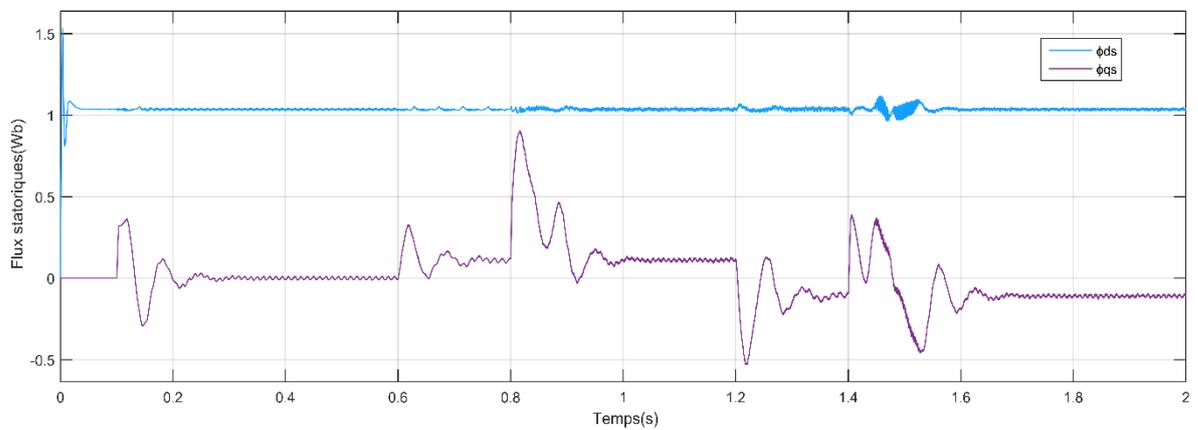


Figure III.16.d : Allure du flux statoriques en coordonnées dq.

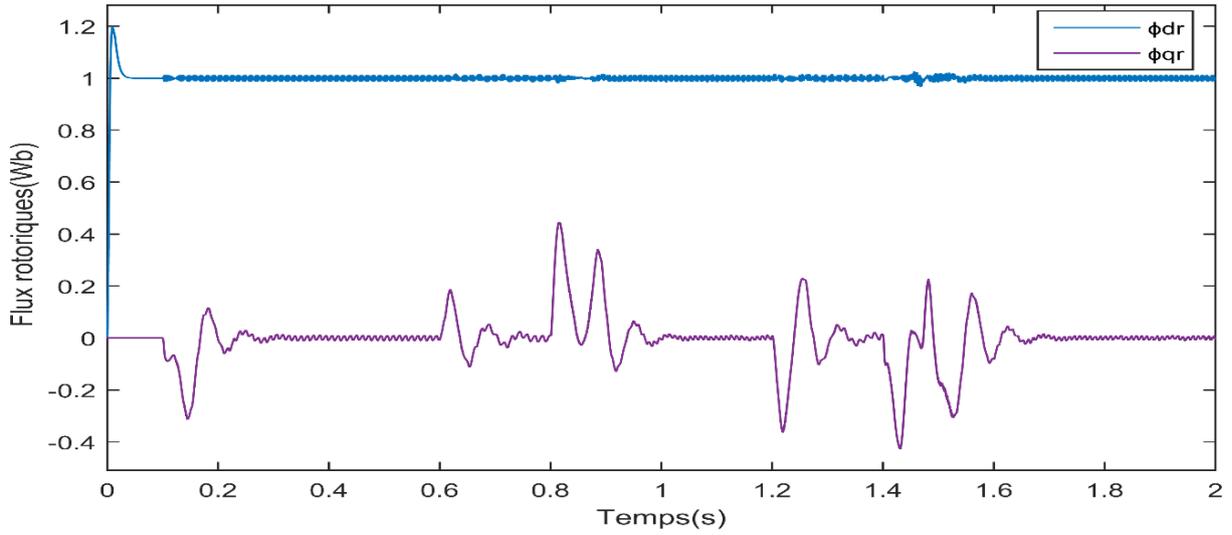


Figure III.16.e : Allure du rotoriques en dq.

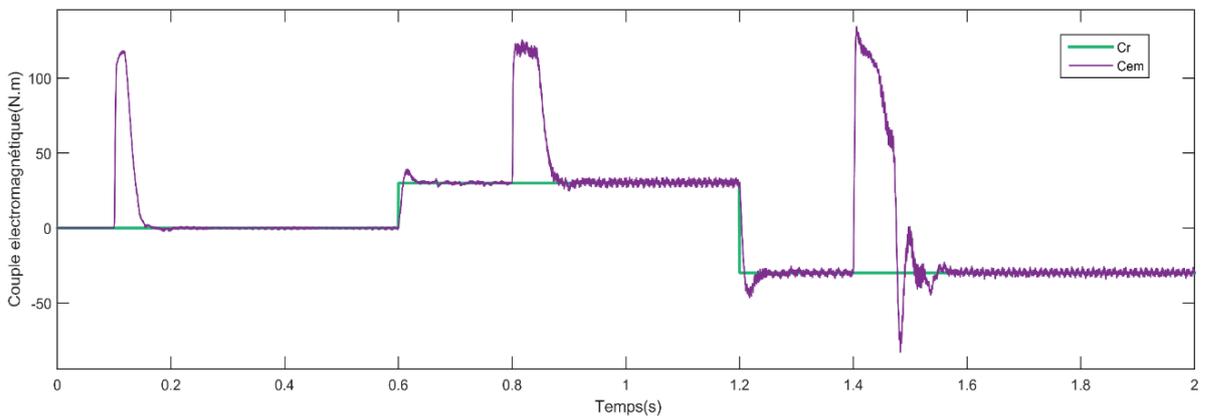


Figure II.16.f : Allure du couple d'une machine en survitesse.

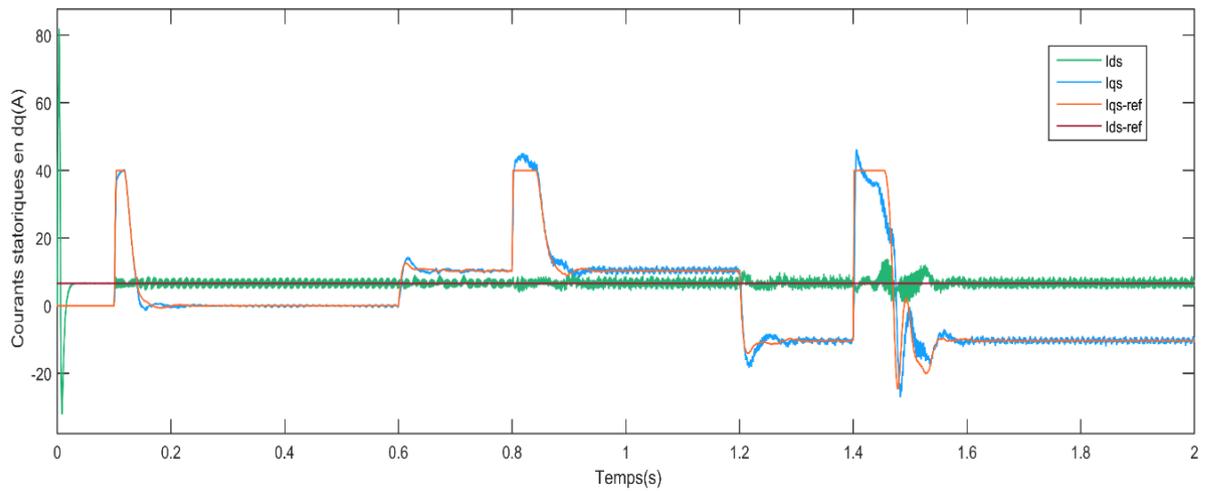


Figure III.16.g : Allure du courant statorique triphasé de la machine.

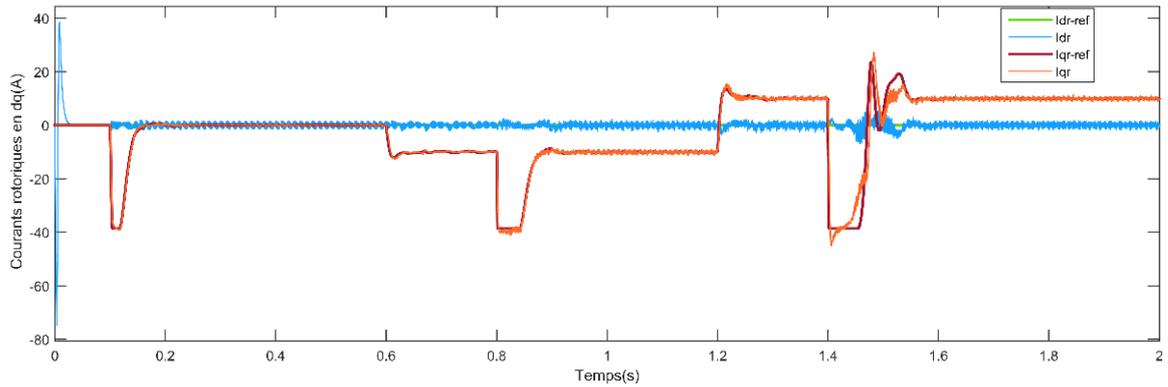


Figure III.16.h Allure du courant rotorique en dq.

Figure III.16 : Simulation de commande FOC d'une MADA en basse et haute vitesse (avec défluxage)

La Figure III.17 montre que le couple électromagnétique et le flux rotorique présentent des pics lors des changements de consigne de vitesse, puis se stabilisent en régime permanent. Cela démontre la robustesse de la commande vectorielle de la machine asynchrone face à de larges variations de vitesse. Cependant, il est important de noter que cette commande n'est pas robuste en cas de variations paramétriques, en particulier les paramètres rotoriques. Par exemple, si la résistance rotorique varie de 140% de la résistance R_r en raison d'une température élevée, les résultats de simulation obtenus montrent les effets suivants :

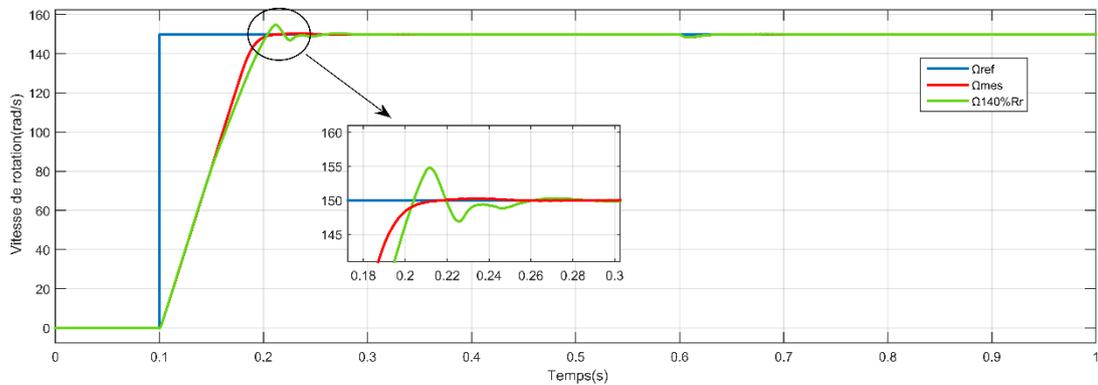


Figure III.17.a Réponse de vitesse d'une machine avec variation de R_r .

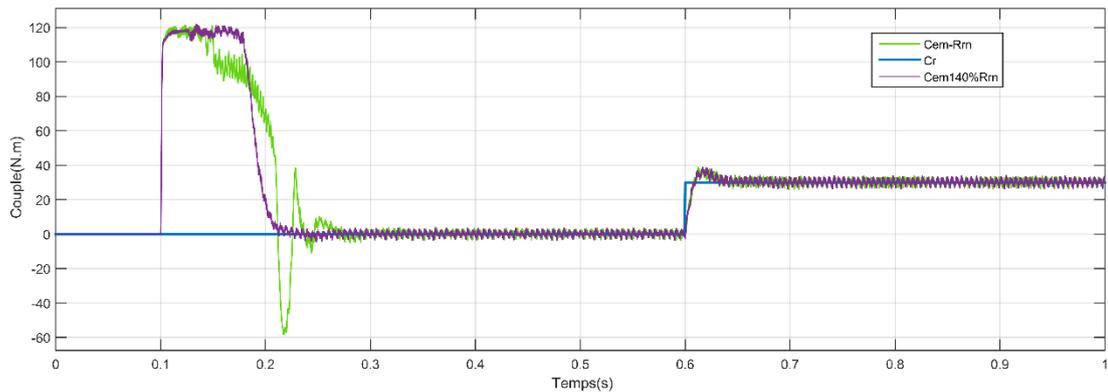


Figure III.17.b: Réponse de couple d'une machine avec variation de R_r .

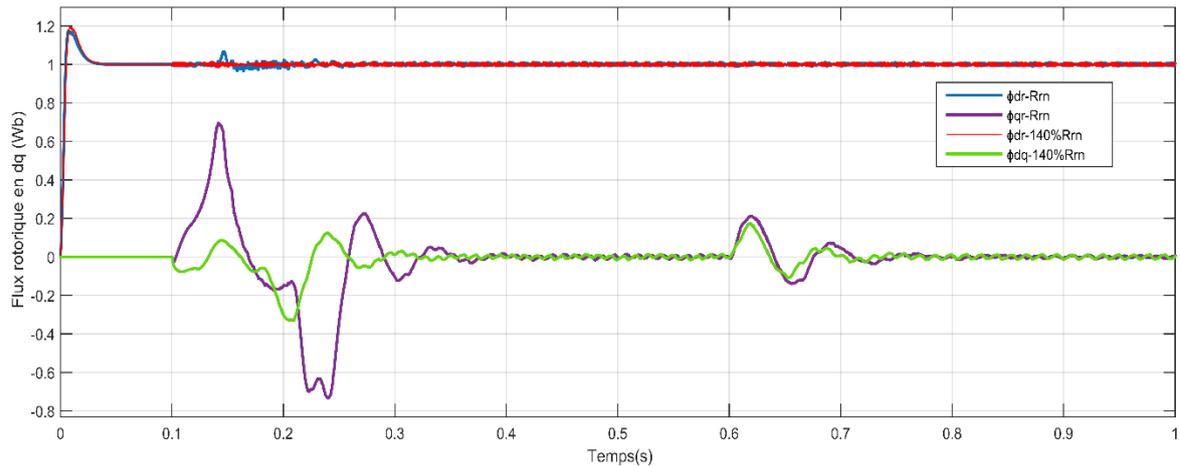


Figure III.17.c: Flux rotoriques en dq d'une machine avec variation de R_r .

Figure III.17 : Simulation d'une MADA avec une variation de R_r (Test de robustesse)

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux de la commande vectorielle appliquée à la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Voici quelques aspects importants de cette machine :

- Facilité de reconstitution du flux et du couple électromagnétique.
- Possibilité de mesurer les courants statoriques et rotoriques.
- Utilisation de boucles de régulation simples avec des régulateurs de type PI (Proportionnel-Intégral) et IP (Intégral-Proportionnel).
- Le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté présente de nombreux avantages, notamment une excellente réponse en vitesse sur une large plage de réglage, une faible erreur de poursuite, ainsi qu'un bon contrôle du couple, du courant statorique et du courant rotorique.

Nous avons validé le modèle de la commande vectorielle à flux rotorique orienté en utilisant l'environnement Matlab/Simulink, ce qui nous a permis de réaliser des simulations pour évaluer les performances de cette technique en termes de poursuite et de régulation. Dans ce but, nous avons également synthétisé un contrôleur de vitesse conventionnel de type IP.

Cependant, nous avons constaté que la commande en vitesse de la machine n'était pas satisfaisante face aux variations des paramètres de la machine, notamment les paramètres rotoriques tels que L_r , R_r et M .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire présente le comportement dynamique de la machine asynchrone à double alimentation. L'étude se concentre sur l'utilisation du système composé d'un onduleur de tension et d'une machine asynchrone à double alimentation, en prenant en compte les différents scénarios possibles pour le système, l'onduleur et sa commande.

Une analyse approfondie de la machine à double alimentation est abordée, en examinant ses divers modes de fonctionnement, ses avantages, ses inconvénients et les domaines d'application pertinents pour son utilisation en tant que moteur ou générateur.

Une analyse détaillée de la modélisation est entreprise, en prenant en considération certaines hypothèses simplificatrices. Une étude de simulation est réalisée sur l'ensemble onduleur-machine. Les résultats obtenus révèlent la présence de nombreuses perturbations. L'utilisation de la commande vectorielle est essentielle pour améliorer les résultats obtenus. Cette constatation met en évidence l'importance de mettre en œuvre la commande vectorielle afin d'obtenir des performances améliorées.

Le dernier volet se concentre sur la commande vectorielle de la machine asynchrone, mettant en avant l'orientation du flux rotorique. Cette approche permet de séparer la commande du flux de celle du couple, similaire à la configuration d'une machine à courant continu à excitation séparée. La méthode directe d'orientation du flux a été développée pour le réglage traditionnel de la vitesse. Les résultats de simulation obtenus ont démontré un bon comportement dans différents tests. Cependant, certaines limites ont été observées, notamment en ce qui concerne la sensibilité aux perturbations du couple de charge et leur temps de rejet, ainsi que sa faible robustesse face aux variations du moment d'inertie et de l'inductance rotorique.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives de recherche et de réalisation pratique intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter la machine sont envisageables, telles que :

- Remplacement des onduleurs de tension de deux niveaux par des onduleurs de trois ou de multi-niveaux.

- Application d'autres techniques de commande robuste, telles que la commande directe du couple (DTC).
- Étude expérimentale de chaque voie de recherche.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] "R.ABDESSEMED, M.Kadjouj;"Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna, Algérie,1997."
- [2]"G.A.Smith,K.A.Nigim,"Wind-energy,Recovery.by.a.Static.Scherbius InductionGenerator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324."
- [3]"Y. BEKAKRA "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ", Thèse de doctorat, université de Biskra 2014 ."
- [4]"Paul-EtienneVidal,«commande non-linéaire d'une machine asynchrone à doubleAlimentation », thèse doctorat de L'institut National Polytechnique de Toulouse ,2004."
- [5] "A. CHAIBA,"Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle", thèse de doctorat, université de Batna, 2010. "
- [6]" DJELLOULI Tahar," Commande sans capteur d'une machine asynchrone en mode sain et en mode dégradé", thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2022 ."
- [7]G. SALLOUM « contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de toulouse.2007."
- [8]"J. CHATELAIN « Machines électriques tournantes ». Edition Dunod, tome1, 1983. "
- [9]" Zineb Tamindjoute et Amel Touati, « étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)»,mémoire de master de l'université A/Mira de Bejaia, 2016/2017."
- [10]"L. BAGHLI" Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone ". IUFM de Lorraine - UHP. 2003 / 2004 "
- [11] "M. Bouharkat, "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique," Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2006."
- [12]"GUELLAADEM Abla et KERBOUB Sirine, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) », mémoire de master de l'université Université de Ghardaïa, 2018/2019."
- [13] "S. ABDELMALEK, " Contribution au Diagnostic et commandes Tolérantes aux Défauts d'une MADA ", Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, Alger, le 15/12/2016."

- [14] "Y. DJERIRI, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle" Thèse de Doctorat en Electro technique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, le 05 /11/2015 "
- [15]"F. MALRAIT,"Problèmes d'Identification et d'Observabilité du Moteur à Induction pour la Variation de Vitesse Industrielle sans Capteur", Thèse de Doctorat en Mathématique et Automatique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2001."
- [16]"G. GRELLET et G. Clerc, "*Actionneurs Electriques : Principes, Modèles, Commande*", Deuxième Tirage, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997. "
- [17] "SALLOUM Georges,"Contribution à La Commande Robuste De La Machine Asynchrone A Double Aliment", Thèse de Doctorat de L'Institut national polytechnique de Toulouse, 13 Mars 2007."
- [18] "BOUDJEMAA Zine Laabidine, "Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par régulateur pi-flou", Mémoire de Magister del'école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009."
- [19] "Sejir KHOJET EL KHIL,«commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », thèses de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2006. "
- [20] "K. LOUKAL "Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux" thèses de doctorat Univ- Mohamed Boudiaf de M'sila, le 22/04/2017."
- [21] "AMOUCHAS Nabil, BOUTALEB Amine, « commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée par régulateur PI», Mémoire de master, Université M'Hamed Bougera, Boumerdes, Algérie, 2015/2016 ."

ANNEXES

ANNEXE : Paramètres de la machine utilisée

Puissance utile nominale P_u	4Kw
Tension statorique nominale	220/380V-50 Hz
Tension rotoriques nominale	3x 100V ~
Vitesse nominale n	1440 Tr/min
Couple de charge nominale C_r	30 N.m
Resistance rotorique	1.8 Ω
Resistance statorique	1.2 Ω
Inductance cycle rotorique L_r	0.1568 H
Inductance cycle statorique L_s	0.1554 H
Inductance mutuelle M	0.15 H
Moment d'inertie J	0.07 $kg.m^2$
Nombre de paires de pôles P	2
Coefficient de frottement visqueux f_v	0.001 $kg.m^2/s$

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بدراسة "تحكم شعاعي في آلة لاتزامنية مزدوجة التغذية" حيث بدأنا بتناول عموميات حول هذه الآلة مركزين على تكوينها وخصائصها، مبدأ التشغيل، و على أهميتها وتطبيقاتها في مجالات متنوعة، بعد ذلك، قمنا بنمذجة ثلاثية الطور للآلة ثم ثنائية الطور من خلال تحويل Park متبوعاً بدراسة مصدر التغذية الخاص بها من جهة الدوار من خلال منوب الجهد الذي يتم التحكم فيه بواسطة تقنية MLI. في الفصل الأخير، طبقنا التحكم الشعاعي للمحرك، بدءاً من مبدأ التحكم الخاص به، لجعل سلوك الآلة مشابهاً لسلوك التحكم في محرك التيار المستمر (MCC) من خلال توجيه تدفق الجزء الدوار حيث يتم ضبط السرعة بواسطة مصحح IP. للتحقق من إستراتيجية التحكم الخاصة المطبقة (عزم الدوران، السرعة والتيار)، استخدمنا برنامج محاكاة MATLAB / SIMULINK الذي أعطانا نتائج جيدة ومعتبرة.

الكلمات المفتاحية:

تحكم شعاعي، آلة لا المتزامنة مزدوجة التغذية، تحويل Park، تقنية PWM، محرك التيار المستمر، مصحح IP، محاكاة MATLAB / SIMULINK

Résumé

Dans ce mémoire, On a étudié une "commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation(MADA)". On a commencé par des généralités sur cette machine, en mettant l'accent sur sa configuration, ses caractéristiques et son principe de fonctionnement. On a souligné l'importance et les applications potentielles de ce type de machine dans divers domaines. Ensuite, on a effectué la modélisation en triphasé et en biphasé de la MADA par la transformation de Park suivi par son alimentation coté rotor à travers d'un onduleur de tension contrôlé par la technique MLI.

Au dernier chapitre, on a appliqué la commande vectorielle à la MADA, commençant par son principe de contrôle, faire le découplage et rendre le comportement de la MADA similaire à une machine à courant continu MCC par orientation du flux rotorique. le réglage de la vitesse est fait par un correcteur IP.

Pour valider notre stratégie de commande (couple, vitesse et courant), nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK qui nous a donné des bons résultats de simulation.

Mots clés:

Commande vectorielle, Machine asynchrone à double alimentation, MADA, Park, MLI, MCC, correcteur IP, MATLAB/SIMULINK

Abstract

In this thesis, we studied a "Vector control of a Dual -Fed Induction Machine (DFIM)". We started with general information about this machine, emphasizing its configuration, its characteristics and its principle of operation. On emphasized the importance and potential applications of this type of machine in various fields. Then, we carried out the three-phase and two-phase modeling of the DFIM by the Park transformation followed by its power supply on the rotor side through a voltage inverter controlled by the PWM technique.

In the last chapter, we applied the vector control to the DFIM, starting with its control principle, to make the decoupling and to make the behavior of the DFIM similar to a Direct Current Machine DCM by orientation of the rotor flux. the speed adjustment is made by an IP corrector

To validate our control strategy (torque, speed and current), we used the MATLAB/SIMULINK software which gave us good simulation results.

Keywords : Vector control, Dual-Fed Induction Machine, DFIM, Park, PWM, DCM, IP corrector, MATLAB/SIMULINK