REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie



Département du Génie Electrique

Projet de fin d'études de Master

Pour L'obtention D'un Diplôme Master En Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème :

Développement d'un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA)

Présenté par :

- SAHRAOUI YAHIA
- GACEM ISMAIL

Proposé et Dirigé par :

- Dr. KABECHE Nadir

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Nous remercions **Dieu** *de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

Nous remercions **Dr. KABECHE NADIR** *qui a suivi ce travail, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire, et tous les conseils qu'il nous a prodigués pendant toute la durée de ce travail malgré ses nombreuses occupations.*

Nous sommes reconnaissantes envers nos enseignants auxquels nous devons notre formation en électrotechnique.

Enfin, nous ne pourrons terminer ces remerciements sans oublier nos familles pour leur aide, compréhension, encouragement et soutien, qu'elles nous ont apportées durant nos études et à tous nos amis.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents mon **père** et ma **mère** pour leurs tendresse profonde,*

leurs patiences et leurs encouragements.

*Mes très chère **frères** et **sœurs***

*Toute ma grande **famille***

*A tout mes **amies.***

Ismail . yahia

ملخص

أصبحت الطاقات المتجددة، ولا سيما طاقة الرياح جهات فاعلة رئيسية في قطاع انتاج الكهرباء، نظرا لمزاياها العديدة، فإن المولد الحثي ذو التغذية المزدوجة (MADA) هو المولد الاكثر استخداما في أنظمة طاقة الرياح. ومع ذلك، فان التشغيل الفعال لهذا الجهاز يتطلب خوارزميات تحكم أكثر كفاءة للتعامل بشكل أفضل مع القيود المختلفة المتعلقة بالتحكم. بالإضافة الى مشكلة الديناميكيات اللاخطية المقترنة، يجب قياس او تقدير الإشارات الضرورية للتحكم، يقترح هذا العمل مخطط تحكم يعتمد على قوانين التحكم غير الخطية والتكييف لتحسين الأداء الديناميكي لـ MADA يتكون مخطط التحكم من جزأين:

- جزء التحكم : حيث يتم استخدام أداة التحكم backsteppinge استنادا الى وظيفة Lyapunov لمراقبة القوى النشطة والمتفاعلة لـ MADA.
- جزء التقدير : للتغلب على القيود والمضايقات المتعلقة باستخدام المستشعرات الميكانيكية، تم اقتراح مقدر غير خطي لتقدير السرعة الميكانيكية بناء على تيارات المولد، في الواقع يتم قياس وتقدير التيارات MADA وبناء على الخطأ بين التيارات المقاسة والمقدرة، تم تطوير آلية تكييف لتقدير السرعة المطلوبة اثناء التشغيل .

يتم استخدام بيئة Matlab/Simulink لاختبار قوانين التحكم المقترحة، النتائج التي تم الحصول عليها مرضية سواء للسيطرة او لمقدر السرعة.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، مولد الحثي مزدوج التغذية، تحكم backsteppinge، مقدر السرعة.

Résumé

Les énergies renouvelables, en particulier, les énergies éoliennes sont devenues des acteurs incontournables dans le secteur de la production d'énergie électrique. De par ses multiples avantages, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) représente la génératrice la plus utilisée dans les systèmes éoliens. Toutes fois, l'exploitation efficace de cette machine nécessite des algorithmes de commande plus performants pour mieux s'occuper des différentes contraintes liées à sa commande. En plus du problème de la dynamique non linéaire couplé, quelques signaux nécessaires à la commande doivent être mesurés ou estimés.

Le présent travail propose un schéma de commande basé sur les lois non linéaires de commande et d'adaptation pour améliorer les performances dynamiques de la MADA. Le schéma comporte deux parties.

- Une partie commande : Où la commande backstepping, basée sur la fonction de Lyapunov, est utilisée pour contrôler les puissances active et réactive de la machine.
- Une partie estimation : Pour éliminer les contraintes et les inconvénients liée à l'utilisation des capteurs mécanique, un estimateur non linéaire et proposé pour estimer la vitesse mécanique de la génératrice en utilisant les courants de la machines. En effet, les courants sont mesurés et estimés et, sur la base de l'erreur entre courants mesurés et

estimés, un mécanisme d'adaptation est développer pour l'estimation on ligne de la vitesse.

L'environnement Matlab/Simulink est utilisé pour testes les lois de commande développées. Les résultats obtenus sont satisfaisantes que ça soit pour la commande ou pour l'estimateur de vitesse.

Mots clés : Energie Eolienne, Générateur Asynchrone à Double Alimentation, commande par Backstepping, Estimateur de vitesse.

Abstract

Renewable energies, in particular wind energy, have become key players in the electricity production sector. Due to its many advantages, the doubly fed induction generator (DFIG) is the most widely used generator in wind power systems. However, the efficient operation of this machine requires more efficient control algorithms to better deal with the various constraints related to control. In addition to the problem of coupled nonlinear dynamics, some signals necessary for the control must be measured or estimated.

This work proposes a control scheme based on nonlinear control and adaptation laws to improve the dynamic performance of the DFIG. The control diagram has two parts:

- A control part: Where the backstepping control, based on the Lyapunov function, is used to monitoring the DFIG active and reactive powers.
- An estimation part: To overcome the constraints and inconveniences related to the use of mechanical sensors, a nonlinear estimator is proposed to estimate the mechanical speed based on generator currents. Indeed, the DFIG currents are measured and estimated and, based on the error between measured and estimated currents; an adaptation mechanism is developed for the on-line estimation of the needed speed.

The Matlab/Simulink environment is used to test the proposed control laws. The obtained results are satisfactory whether for the control or for the speed estimator.

Keywords: wind energy, doubly fed induction generator, backstepping control, speed estimator.

Notations et symboles

DFIG	Doubly Fed Induction Generator.
GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation.
MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
CLF	Fonctions de Lyapunov de commande.
FB	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
FBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
M.L.I	Modulation de largeur d'impulsions.
PWM	Pulse-Width Modulation.
a, b, c	Indice des trois phases a, b, c.
C_{em}	Couple électromagnétique. [N.m]
C_r	Couple résistant. [N.m]
d , q	Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature.
[P]	la matrice de Park.
[R]	la matrice de rotation.
[C]	la matrice de Concordia.
$\emptyset_s$	Respectivement flux stotorique rotorique. [Wb]
$\emptyset_r$	Les flux statorique directes et en quadrature. [Wb]
$\emptyset_{dq(s,r)}$	Le flux statorique et rotorique directes et en quadrature. [Wb]
Vsa,Vsb,Vsc	Tensions statoriques triphasées. [V]
Vra,Vrb,Vrc	Tensions rotoriques triphasées. [V]
I_{sa} I_{sb} I_{sc}	Courants triphasés statoriques. [A]
I_{ra} I_{rb} I_{rc}	Courants triphasés rotoriques. [A]
I_s I_r	Les courants de phase statorique et rotorique. [A]
I_{qs} I_{ds}	Les courants statoriques directe et en quadrature. [A]
I_{qr} I_{dr}	Les courants rotoriques directe et en quadrature. [A]
$I_{\alpha r}$ $I_{\beta r}$	Les courants rotoriques dans le repère de fixe. [A]
$I_{\alpha s}$ $I_{\beta s}$	Les courants statoriques dans le repère de fixe. [A]
L_s	Inductance propre d'une phase statorique. [H]
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique. [H]

Rs	Résistances statoriques par phase. [Ω]
Rr	Résistances rotoriques par phase. [Ω]
L_m	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor). [H]
σ	Coefficient de dispersion ou (de Blondel).
J	Moment d'inertie. [k.g.m^2]
f	Coefficient de frottements visqueux. [N.m.s/rad]
Ωs, Ωr	La vitesse de champ tournant. [rad/s]
ωs, ωr	Pulsation électrique des grandeurs statoriques et rotoriques. [rad/s]
ω	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation. [rad/s]
ω_m	La vitesse rotorique réelles ou idéales. [rad/s]
$\hat{\omega}_m$	La vitesse rotorique estimé. [rad/s]
$\Delta\omega$	L'erreur d'estimation de la vitesse de la GADA.
p	Nombre de paires de pôles.
ωg	Pulsation électrique de glissement. [rad/s]
g	Glissement de la vitesse de rotation.
$\hat{g}$	Glissement estimé de la vitesse de rotation.
fs	Fréquence électrique des grandeurs statoriques. [Hz]
fr	Fréquence électrique des grandeurs rotoriques. [Hz]
N	Vitesse mécanique de rotation. [tr/min]
Ps	la puissance active statorique. [W]
Qs	la puissance réactive statorique. [VAR]
P_s^*	la puissance active référence. [W]
Q_s^*	la puissance réactive référence. [VAR]
Ep	Erreurs de la puissance active. [W]
E_Q	Erreurs de la puissance réactive. [VAR]

Sommaire

Résumé ..... A
Introduction générale 1

Chapitre I Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

1.1 Introduction : 3
1.2 L'Aérogénérateur : 3
1.3 Types d'Eoliennes : 4
1.3.1 Les éoliennes à axe vertical 5
1.3.2 Les éoliennes à axe horizontal 5
1.4 Classement des éoliennes : 6
1.4.1 Les Eoliennes à vitesse Fixe 6
1.4.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable 7
1.5 Eolienne à Vitesse Variable à base de la Machine Asynchrone à Double 8
Alimentation (MADA) : 8
1.5.1 Mode de fonctionnement de la MADA 8
1.5.2 Modèle mathématique de la MADA dans le référentiel générale 9
1.5.3 Hypothèses et Conventions : 10
1.5.4 Equations de la MADA : 11
1.5.4.1 Equations Electriques : 11
1.5.4.2 Equations Magnétiques : 11
1.5.4.3 L'équation mécanique : 12
1.6 Passage de système triphasé au système biphasé : 12
1.6.1 Transformation de PARK 12
1.6.2 Transformation de Concordia 13
1.6.3 La Relation entre La Transformation de Concordia et de Park 14
1.7 Choix du Référentiel : 15
1.7.1 Référentiel Lié au Stator : 15
1.7.2 Référentiel Lié au Rotor : 15
1.7.3 Référentiel Lié au Champ Tournant : 16
1.8 Simulation de la MADA 17
1.8.1 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA) 17
1.8.2 Interprétations des résultats : 20

1.9 Conclusion 20

Chapitre II Commande par Backstepping d'une GADA

2.1 Introduction 21
2.2 Méthodes de Lyapunov 21
2.3 Application de la théorie de Lyapunov dans la commande des systèmes non-linéaires 22
2.3.1 Commande basée sur la fonction de Lyapunov 23
2.3.2 Principe de la commande par Backstepping 24
2.4 Application de la commande par fonction de Lyapunov sur le modèle de la GADA 25
2.5 Résultats de simulation 28
2.5.1 Interprétations des résultats : 30
2.6 Conclusion 30

Chapitre III Développement d'un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une GADA

3.1 Introduction 31
3.2 Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique 31
- ❖ Méthode à base d'estimateur 31
- ❖ Système adaptatif avec modèle de référence MRAS 32
- ❖ Méthode à base d'observateur 32
- ❖ Filtre de Kalman 32
- ❖ Estimation basée sur l'intelligence artificielle 32

3.3 Application d'un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une GADA 33
3.3.1 Estimation de la vitesse de la GADA en utilisant les courants rotoriques et statoriques 33
3.3.2 Estimation de la vitesse de la GADA en utilisant les courants rotoriques seulement 36
3.4 Simulation et interprétation de résultats 38
- ❖ Estimation de vitesse avec les courants statorique et rotorique 38
- ❖ Estimation de vitesse avec les courants rotorique Seulement 41

3.5 Conclusion 43
Conclusion générale 44
Références bibliographiques 45
Annexe 48

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent 4
Figure 1.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes 4
Figure 1.3 : Eolienne à axe vertical 5
Figure 1.4 : Aérogénérateur à axe horizontal 6
Figure 1.5 : Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage. 7
Figure 1.6 : Eolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage. 7
Figure 1.7 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA 8
Figure 1.8 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA 9
Figure 1.9 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA 9
Figure 1.10 : Passage de système triphasé au système biphasé. 13
Figure 1.11 : Transformations de Concordia ($\alpha\beta 0$) 14
Figure 1.12 : Passage du repère du Park vers le repère de Concordia 15
Figure 1.13 : Les composantes du Tensions statoriques et rotoriques triphasés. 18
Figure 1.14 : Les composantes du courant statoriques et rotoriques dans le repère fixe. 18
Figure 1.15 : Les composantes du flux statoriques et rotorique dans le repère fixe. 18
Figure 1.16 : Les composantes du courant statoriques et rotoriques dans le repère (d-q) 19
Figure 1.17 : Les composantes du flux statoriques et rotorique dans le repère (d-q) 19
Figure 1.18 : Les puissances actives et réactive statoriques. 19
Figure 1.19 : Couple électromagnétique et la puissance apparente 20

Chapitre II

Figure 2.1 : Strict-Feedback System 25
Figure 2.2 : Les puissances active et réactive statorique et sont références. 28
Figure 2.3 : Les composantes du courant rotorique et statorique 29
Figure 2.4 : Les composantes du flux rotorique et statorique. 29
Figure 2.5 : Couple électromagnétique et la puissance apparente. 30

Chapitre III

Figure 3.1 : Le schéma de la commande avec l'estimateur proposé 36
Figure 3.2 : La vitesse rotorique réelle et estimée 39
Figure 3.3 : Erreur de la vitesse estimée 39
Figure 3.4 : Les puissances active et réactive statorique et sont références. 40
Figure 3.5 : Les courants statorique dans le repère fixe avec zoom 40
Figure 3.6 : Les courants rotorique dans le repère fixe avec zoom 40
Figure 3.7 : La vitesse rotorique réelle et estimée 41
Figure 3.8 : Erreur de la vitesse estimée 42
Figure 3.9 : Les puissances active et réactive statorique et sont références. 42
Figure 3.10 : Les courants rotorique dans le repère (d . q) 43

Liste de tableau

Tableau 1.1 : mode opération de la MADA 8

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité est une condition préalable au développement socio-économique d'un pays. La révolution industrielle ces dernières décennies a conduit à d'énormes besoins planétaires en énergie électrique. Afin de limiter l'utilisation des centrales nucléaires et des centrales à base d'énergie fossile, le monde entier s'oriente de plus en plus vers l'électricité à base des énergies renouvelables. Cette tendance permet, d'une part, de réduire les émissions de gaz à effet le vent, le soleil, le géothermique, etc. Cette tendance permet, d'une part, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et, d'une autre part, d'exploiter les ressources naturelle renouvelable telles que le vent, le soleil, le géothermique, etc. Une grande importance est donnée à l'énergie éolienne, qui représente une forme d'énergie inépuisable, propre et directement exploitable. [1]

L'énergie éolienne vient des vents qui proviennent du réchauffement inégal de l'atmosphère par le soleil. Le flux de vent, ou énergie de mouvement, lorsqu'il est récolté par les éoliennes modernes, permettent de produire de l'électricité. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique à l'intérieur des éoliennes en énergie mécanique puis en énergie électrique via des machines électriques synchrones ou asynchrones. Dans ce cas, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage est la possibilité de fonctionner en vitesse variable ce qui permet de suivre le profil intermittent de l'énergie extraite du vent. [2]

Une exploitation efficace des MADA nécessite un schéma de commande adéquate. On peut distinguer différentes variantes de commande développées pour la MADA telles que la commande vectorielle, la commande directe de puissance, etc. En dépit de leur simplicité, ces techniques de commande souffrent de l'insuffisance des performances et la sensibilité aux variations paramétriques de la machine. [3]

Par conséquent, dans le présent travail nous avons exploité la puissance de la théorie de commande non linéaire pour établir des lois de commandes plus performantes pour la MADA. Le principe de la commande par backstepping est proposé pour commander les puissances active et réactive de la GADA.

D'autre part, la connaissance exacte de la vitesse mécanique de la GADA représente une condition indispensable pour établir le schéma de commande. L'utilisation des capteurs mécaniques pour mesurer cette vitesse s'accompagne de plusieurs inconvénients tels que le coût

supplémentaire, la complexité du système, la robustesse, les bruits et les perturbations de mesure. Pour surmonter ces contraintes, nous proposons un estimateur non linéaire pour estimer la valeur de la vitesse mécanique de la GADA. Le principe de l'estimateur repose sur une comparaison entre les valeurs mesurées et estimées des courants rotoriques. L'erreur enregistrée entre le courant mesuré et le courant estimé est utilisé avec une règle d'adaptation non linéaire pour estimer la vitesse mécanique ciblée.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres.

- Dans le premier chapitre, nous donnons, au premier lieu, un petit rappel sur les systèmes éoliens et leur place dans l'exploitation des énergies renouvelables tout en explicitant la structure et le principe de fonctionnement de la MADA qui est l'élément clé du système éolien. Ensuite, la modélisation de la MADA est abordée en se basant sur les équations électrique et mécanique qui régissent le comportement dynamique de la MADA et ses alimentations. Le modèle obtenu est validé par une étude de simulation dans l'environnement MATLAB/Simulink.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la théorie de la commande par Backstteping, en occurrence, toutes les relations concernant ce mode de commande. Nous aborderons ensuite la conception de l'algorithme de commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec ses différentes étapes. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.
- Dans le troisième chapitre, un bref état d'art sur les méthodes d'estimation de la vitesse de la machine est donné. Ensuite, nous aborderons la technique d'estimation de la vitesse de la MADA en utilisant la règle non linéaire d'adaptation « $\boldsymbol{e_1}$***-Modification*** ». L'efficacité et la robustesse de cet estimateur seront montrées par des résultats de simulation on logiciel *MATLAB/SIMULINK*.

Finalement ce travail sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

1.1 Introduction :

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable ; l'énergie éolienne est aujourd'hui celle la plus compétitive et qui a le taux de croissance le plus élevé. L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité.

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour des faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées. [3]

Dans notre étude on a été choisi éolienne a vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Ce chapitre consacré aux généralités sur l'énergie éolienne, Dans un premier temps, nous expliquerons la définition de l'énergie éolienne et ces composants. Par la suite, les modes de fonctionnement en vitesse fixe et variable et les différents générateurs utilisés sont présentés et la modélisation du système sera étudiée.

1.2 L'Aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une Partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de Transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [4], qui est dans Notre cas un générateur asynchrone à double alimentation (GADA), (Fig 1.1).
Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories : [5]

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

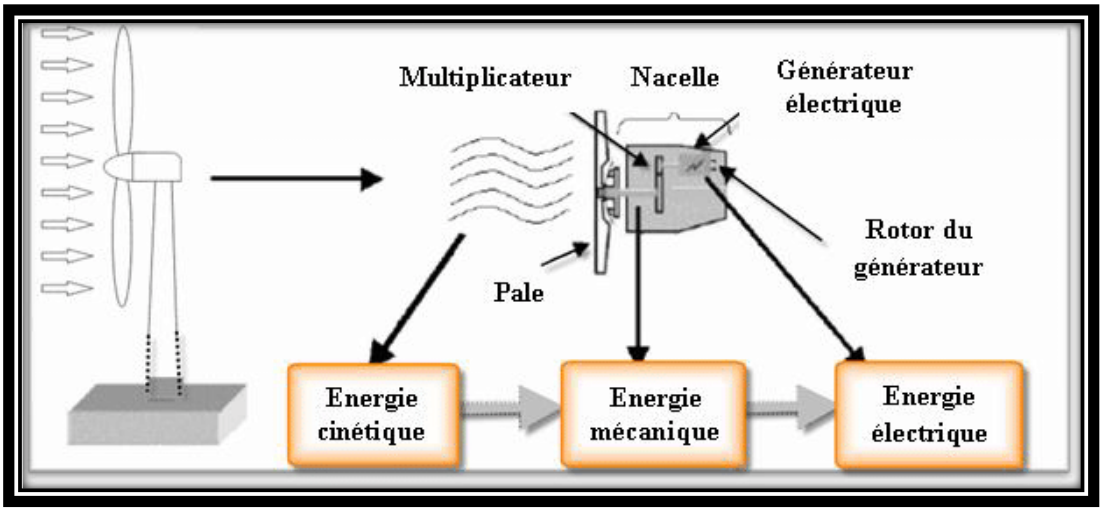


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

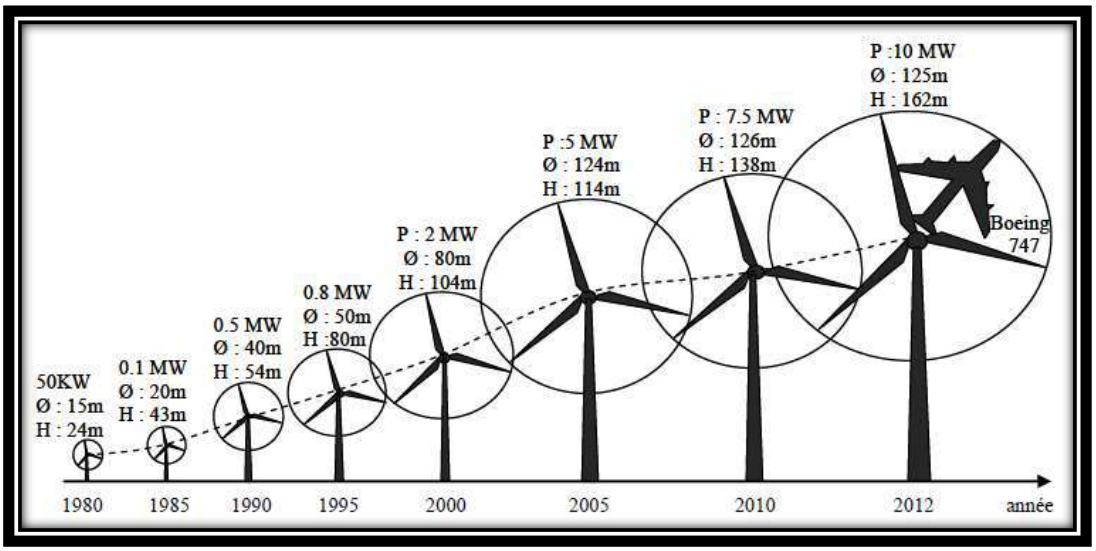


Figure 1.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.

1.3 Types d'Eoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice . Il existe principalement deux grandes familles : [6] [7]

- Eoliennes à axe vertical.
- Eoliennes à axe horizontal.

1.3.1 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement, en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ; donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis Les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais trois structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : Savonius, Darrieus et rotor de Musgrove prennent une forme 'H'
(Voir la figure 1.3).

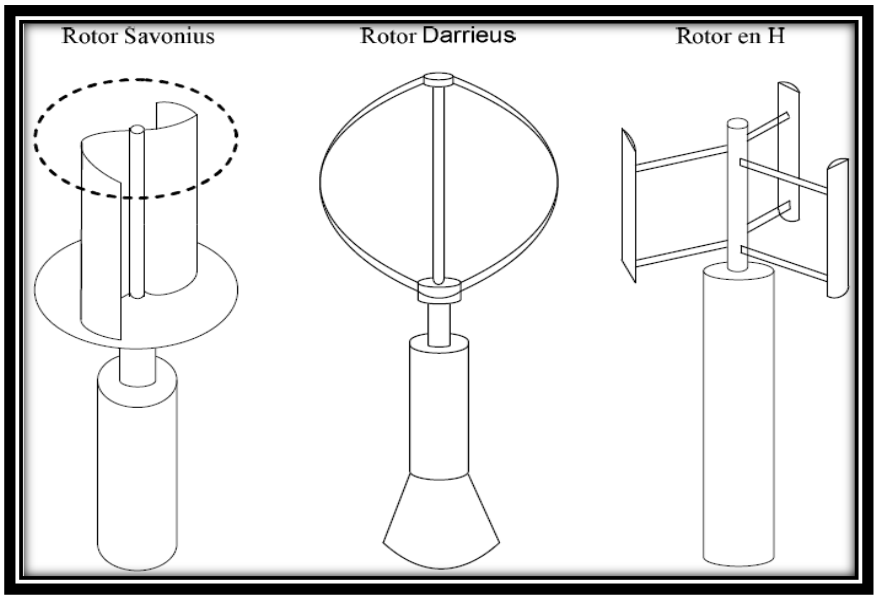


Figure 1.3 : Eolienne à axe vertical.

1.3.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (Figure 1.4) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [8]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [9].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.

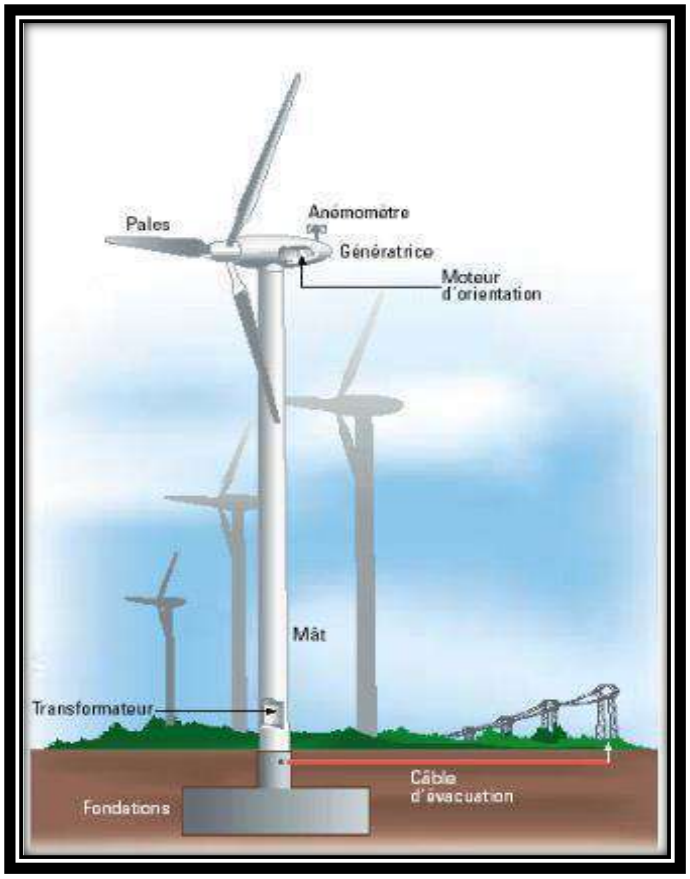


Figure 1.4 : Aérogénérateur à axe horizontal.

1.4 Classement des éoliennes :

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés.

1.4.1 Les Eoliennes à vitesse Fixe

Dans ce cas les éoliennes fonctionnent à une vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Ces éoliennes principalement reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statorique. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). [10]-[11]

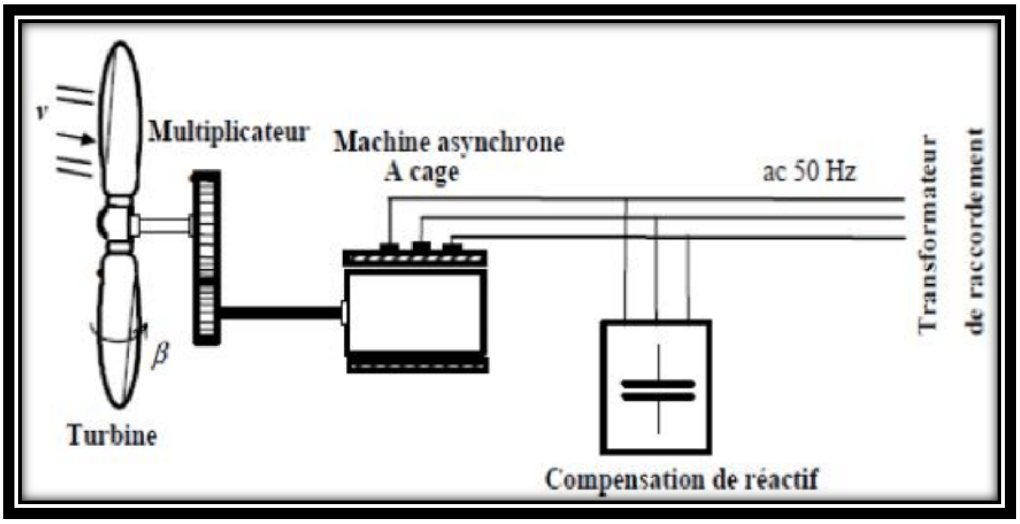


Figure 1.5 : Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

1.4.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable

A cause des inconvénients du système éolien a vitesse fixe, les industriels ont développé d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large, ces systèmes sont bases sur l'exploitation optimale de puissance extraite de l'énergie cinétique de vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle de vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaine globale de système à savoir : la turbine, le générateur et le convertisseur utilise qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générer par le générateur avec celles de réseau. [12]-[13]

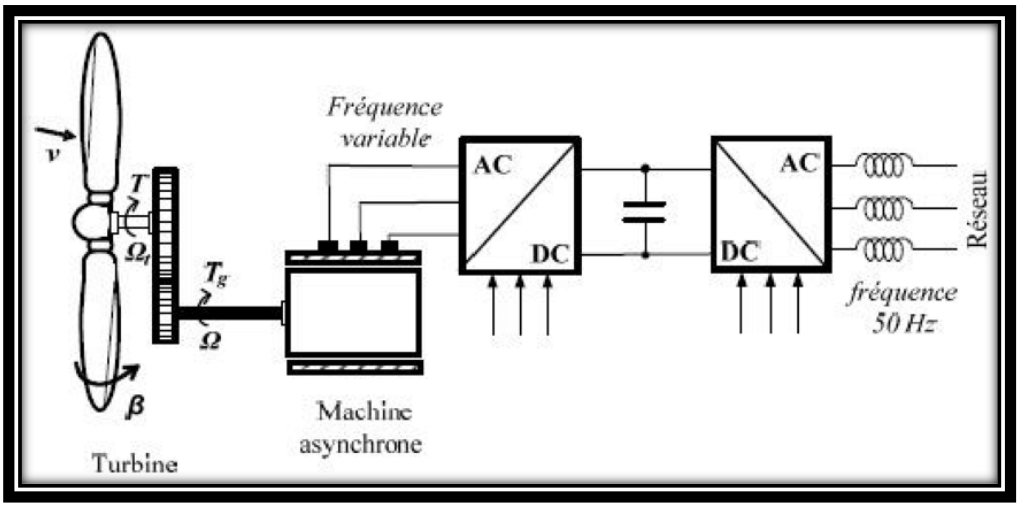


Figure 1.6 : Eolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à cage.

1.5 Eolienne à Vitesse Variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau).

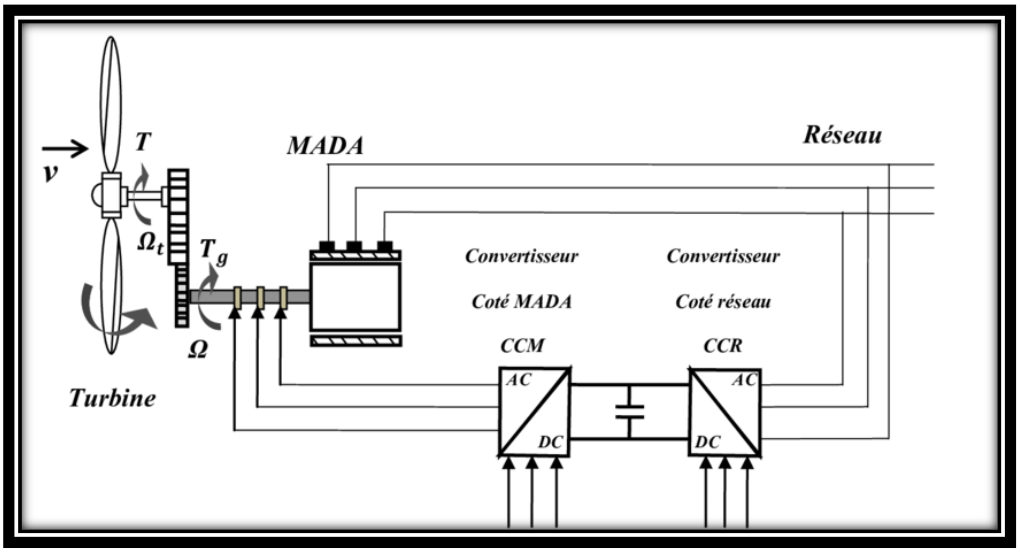


Figure 1.7 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

1.5.1 Mode de fonctionnement de la MADA

La MADA est parfaitement commandé si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine Dans cette dernière Ps, Pr et Pm désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique. [14]

		Modes	
		Moteur $P_m > 0$	Générateur $P_m < 0$
Régime	Hypo-synchrone $P_s = -(P_m - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r > 0$	$P_s > 0$ et $P_r < 0$
	Hyper-synchrone $P_m = -(P_s - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r < 0$	$P_s > 0$ et $P_r > 0$

Tableau 1.1 : mode opération de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

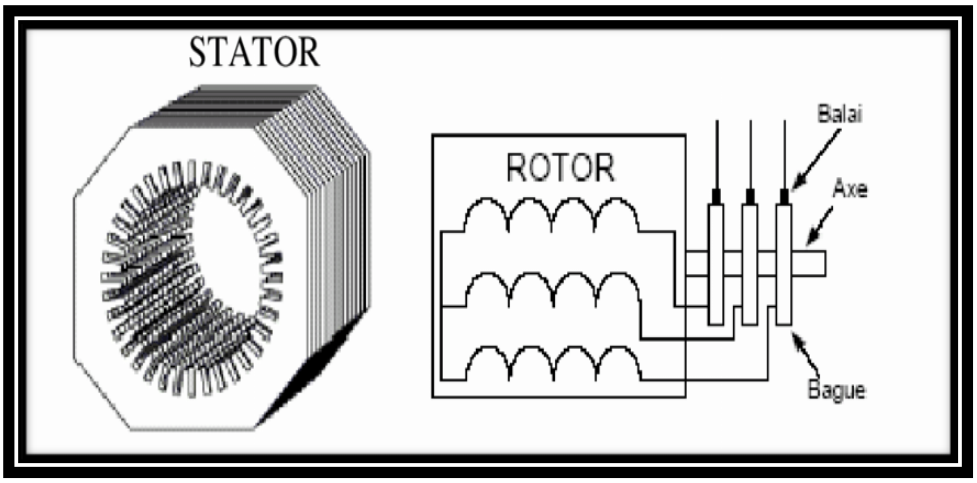


Figure 1.8 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

1.5.2 Modèle mathématique de la MADA dans le référentiel générale

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (**As ,Bs ,Cs**) décalées entres elles par un angle de **(2π/3)** et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator,(**Ar, Br , Cr**). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est **Ωs = ws/p**, ou ws désigne la pulsation de réseau d'alimentation et **P** le nombre de paires de pôles.[15]

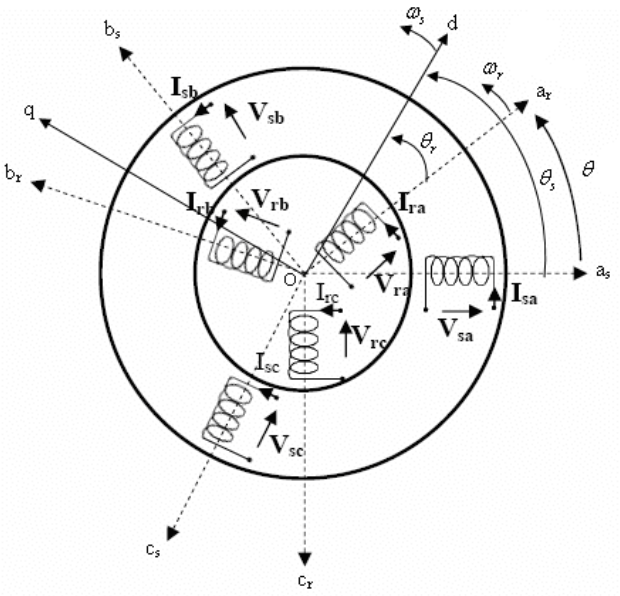


Figure 1.9 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.

Telle que :

as, bs, cs : correspondent aux trois phases du stator.

ar, br, cr : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes Od et Oq, sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.

" Oas, Od = θ_s" , "Oar, Od = θ_r", "Oas, Oar = $\theta_s - \theta_r = \theta$

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \tag{1.1}$$

Avec : $\omega = P\,\Omega$

Ω : La vitesse de rotation angulaire mécanique.

P : Le nombre de paires de pôles.

1.5.3 Hypothèses et Conventions

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes : [16]

- Nous supposons que la machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.
- Nous supposons que l'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante.
- Nous négligeons la saturation du circuit magnétique ainsi que son hystérésis, ce qui permet de définir des inductances constantes.
- Nous supposons que l'induction dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale.
- Nous supposons que la composante homopolaire du courant est nulle.
- Nous tenons compte des fondamentaux des grandeurs alternatives seulement.
- Nous ne tenons compte que des pertes Joules dans la machine. Nous négligeons les pertes fer.

1.5.4 Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représenté schématiquement par la figure 1.9 et dont les phases sont repères respectivement as, bs, cs et ar, br, cr et l'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases ar et as choisis comme axes de référence. [17]

1.5.4.1 Equations Electriques

La MADA est représentée par les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{as} \\ \emptyset_{bs} \\ \emptyset_{cs} \end{bmatrix} \tag{1.2}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ar} \\ \emptyset_{br} \\ \emptyset_{cr} \end{bmatrix} \tag{1.3}$$

$[V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T$, $[V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T$, $[i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^T$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\emptyset_{as} \quad \emptyset_{bs} \quad \emptyset_{cs}]^T$, $[\emptyset_{ar} \quad \emptyset_{br} \quad \emptyset_{cr}]^T$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

R_s , R_r: sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

1.5.4.2 Equations Magnétiques

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{as} \\ \emptyset_{bs} \\ \emptyset_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [L_m] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \tag{1.4}$$

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{ar} \\ \emptyset_{br} \\ \emptyset_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [L_m] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

L_s : L_r : inductances propres statoriques et rotoriques.

M_s: Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r: Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

L_m: Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[L_m] = M_0.\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).

1.5.4.3 L'équation mécanique

$$C_e - C_r = j\frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad \Rightarrow \quad \dot{\omega} = \frac{1}{j}(C_e - C_r) - f\omega \quad (1.7)$$

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

f : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

ω : La vitesse de rotation.

j : L'inertie des parties tournantes.

1.6 Passage de système triphasé au système biphasé :

1.6.1 Transformation de PARK

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions, et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (Va) statorique et le système d'axe (d-q). [18] , elle est présenté par la figure (1.10), et définie par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

L'angle θ dans la matrice de Park [P] prend la valeur (θs) pour les grandeurs statoriques et (θs- θr) pour les grandeurs rotoriques.

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

D'autre part :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

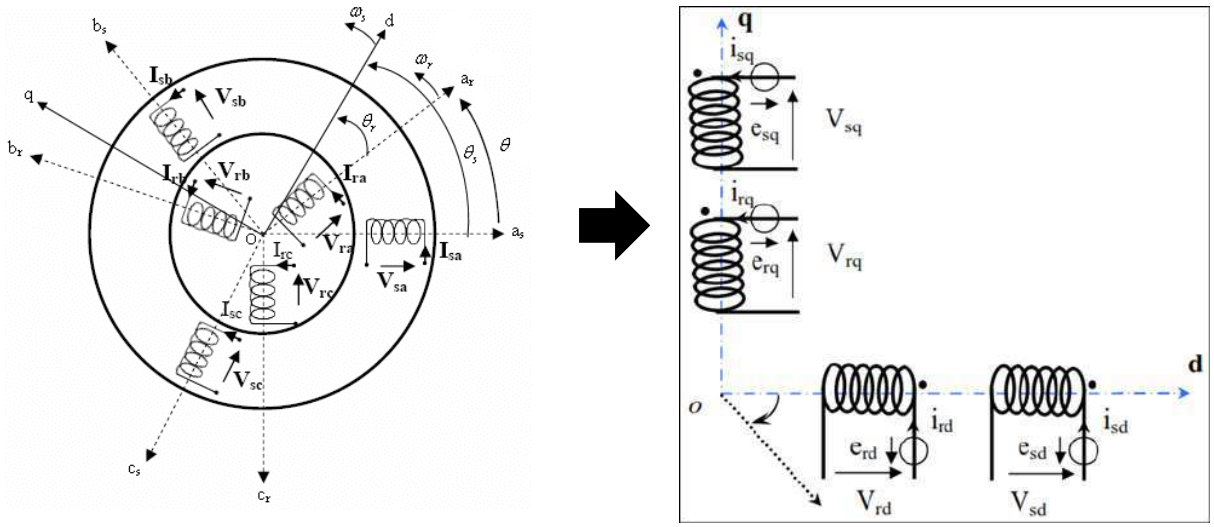


Figure 1.10 : Passage de système triphasé au système biphasé.

1.6.2 Transformation de Concordia

Cette transformation est un cas particulier de la transformation du Park, ou le repère de Park est fixe (lié au stator). Elle est connue par le repère (αβ0), cette transformation conserve la puissance et non pas les amplitudes. [18]

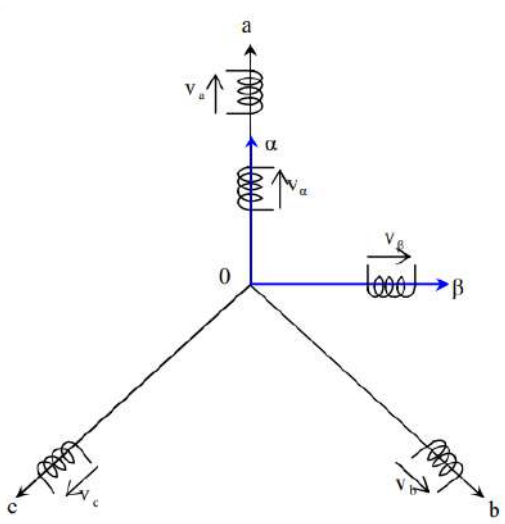


Figure 1.11 : Transformations de Concordia (αβ0).

La matrice condensée des tensions dans le repère (αβ0), est exprimée en fonction de la matrice condensée des tensions dans le repère (abc) par la relation (1.10).

$$[\boldsymbol{V_{\alpha\beta 0}}] = [\boldsymbol{C}][\boldsymbol{V_{abc}}] \tag{1.10}$$

Par conséquent les expressions des matrices, de Concordia et Concordia inverse, sont données respectivement par les relations (1.11).

$$[\boldsymbol{C}] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} & -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} & -\frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} \\ \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} & \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} & \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} \end{bmatrix}; \quad [\boldsymbol{C}]^{-\mathbf{1}} = [\boldsymbol{C}]^{\boldsymbol{T}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} \\ -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} & \frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} & \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} \\ -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} & -\frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} & \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}} \end{bmatrix} \tag{1.11}$$

1.6.3 La Relation entre La Transformation de Concordia et de Park

Lorsque l'angle θ prend la valeur zéro, la transformation de Park ainsi particulière, porte le nom de Concordia [C] et les axes seront nommés (αβ0). Le passage aux axes (dq0) s'effectue par une matrice de rotation R, sur la matrice de Concordia. [18]

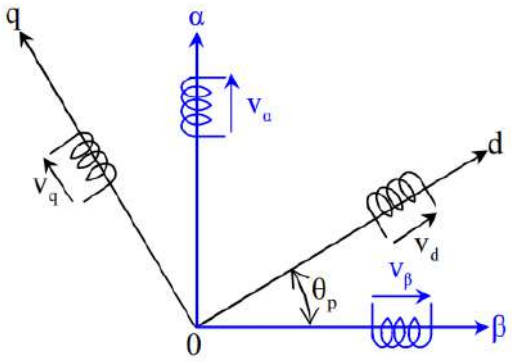


Figure 1.12 : Passage du repère du Park vers le repère de Concordia.

$$[P] = [R].[C] \tag{1.12}$$

[P] : la matrice de Park.

[R] : la matrice de rotation.

[C] : la matrice de Concordia.

$$[V_{dq0}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [V_{\alpha\beta 0}] \tag{1.13}$$

1.7 Choix du Référentiel :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) .
Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

1.7.1 Référentiel Lié au Stator

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coor} = 0$). Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

1.7.2 Référentiel Lié au Rotor

Dans ce référentiel, les axes (*d*,*q*) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc ($\omega_{coor} = \omega = P\,\Omega$). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

I.7.3 Référentiel Lié au Champ Tournant

Dans ce référentiel, les axes (*d*,*q*) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où ($\omega_{coor} = \omega_s$; ($\omega_r = \omega_s - \omega$)).

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

Dans notre travail, on utilise le référentiel Lié au Stator ($\omega_{coor} = 0$). pour la modélisation de la MADA.

Alors, le modèle électrique général de la machine asynchrone à double alimentation obtenue en utilisant la transformation de Concordia est donné par les équations suivantes :

Les tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s I_{\alpha s} + \frac{\mathrm{d}\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s I_{\beta s} + \frac{\mathrm{d}\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r I_{\alpha r} + \frac{\mathrm{d}\Phi_{\alpha r}}{dt} - \omega_m \Phi_{\beta r} \\ V_{\beta r} = R_r I_{\beta r} + \frac{\mathrm{d}\Phi_{\beta r}}{dt} + \omega_m \Phi_{\alpha r} \end{cases} \tag{1.14}$$

Les expressions des flux sont données par (I.15).

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s I_{\alpha s} + L_m I_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s I_{\beta s} + L_m I_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r I_{\alpha r} + L_m I_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r I_{\beta r} + L_m I_{\beta s} \end{cases} \tag{1.15}$$

En combinant (1.14) et (1.15), nous obtenons l'expression de l'équation d'état de la machine asynchrone à double alimentation présentée par (1.16).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{\alpha s} \\ \dot{I}_{\beta s} \\ \dot{I}_{\alpha r} \\ \dot{I}_{\beta r} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right) \left\{ \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 & R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ -\omega_m L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_m L_m L_r & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_m L_s L_r \\ \omega_m L_s L_m & R_s L_m & \omega_m L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \\ I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \\ V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} \right\} \quad (1.16)$$

Avec :

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$$

σ : Coefficient de dispersion.

1.8 Simulation de la MADA

La mise sous forme d'état du modèle de la machine asynchrone à double alimentation permet la simulation de la machine avec ces paramètres qui sont donnés en annexe.

L'objectif de l'étude réalisée dans ce chapitre est d'établir un schéma fonctionnel à partir des tensions d'alimentation nous permettent de déterminer les grandeurs électrique, électromagnétique et mécanique en fonction du temps en régime dynamique.

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour le type de fonctionnement générateur. Le modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Concordia dans le plan $(\alpha.\beta)$ lié aux Stator.

1.8.1 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

Les résultats de simulation présentée sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnement générateur "GADA", entraînée à une vitesse fixe égale à 1338 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de (220 V ; 100*pi rad/s ; 50 Hz) et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de (10V ; 5.4*2*pi rad/s ; 5.4Hz) et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

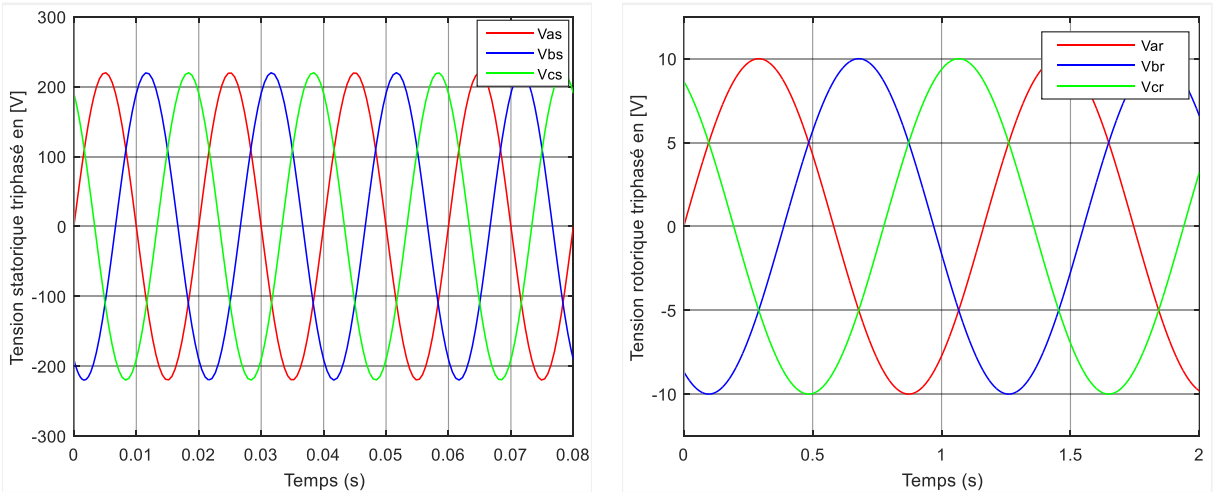


Figure 1.13 : Les composantes du Tensions statoriques et rotoriques triphasés.

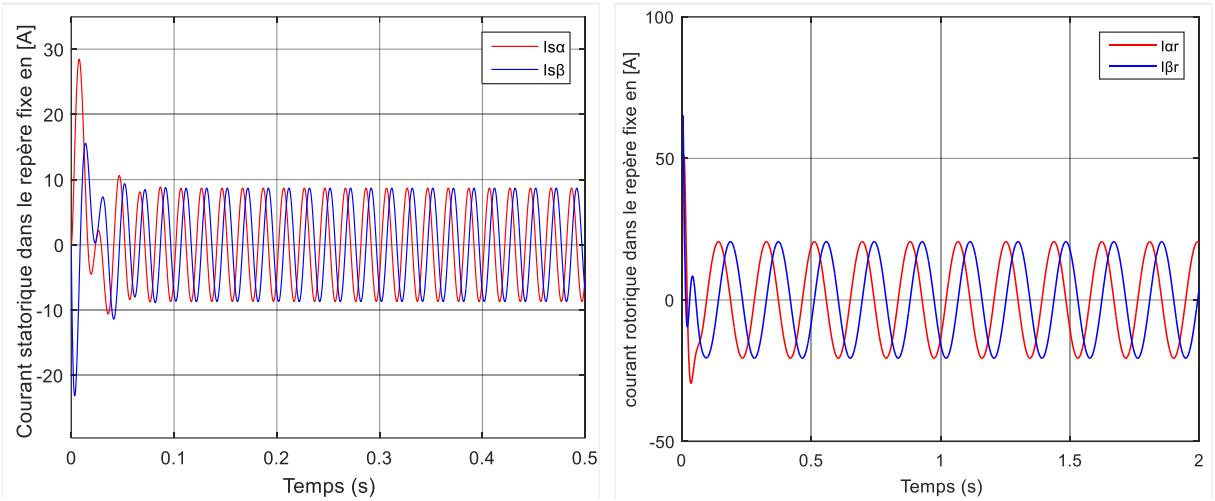


Figure 1.14 : Les composantes du courant statoriques et rotoriques dans le repère fixe.

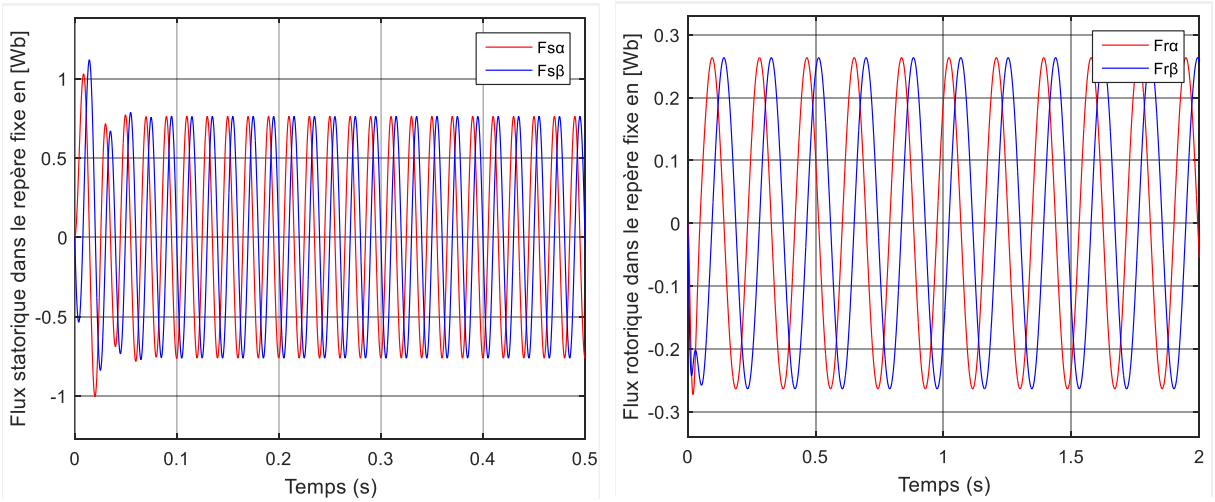


Figure 1.15 : Les composantes du flux statoriques et rotorique dans le repère fixe.

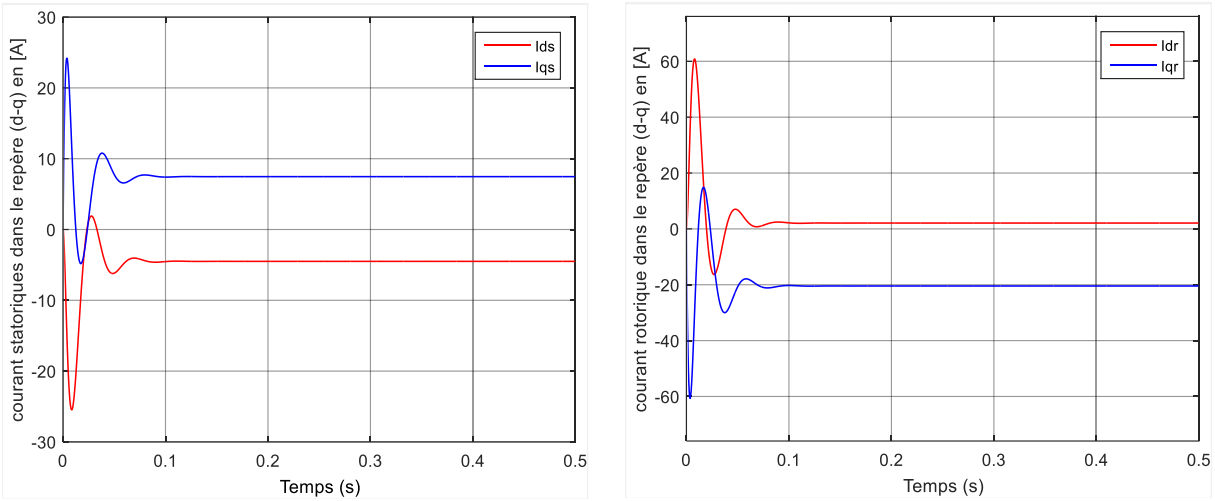


Figure 1.16 : Les composantes du courant statoriques et rotoriques dans le repère (d-q).

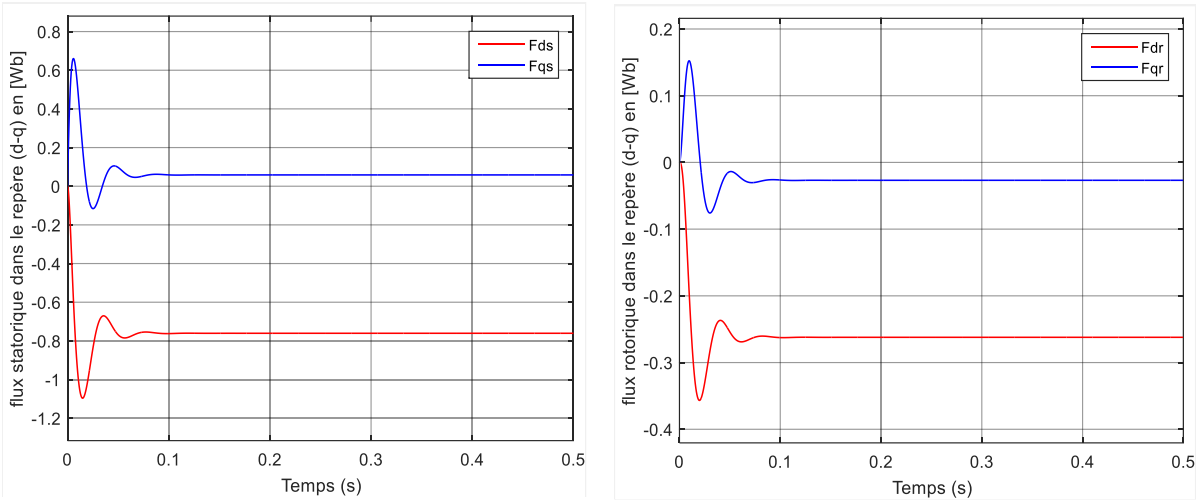


Figure 1.17 : Les composantes du flux statoriques et rotorique dans le repère (d-q).

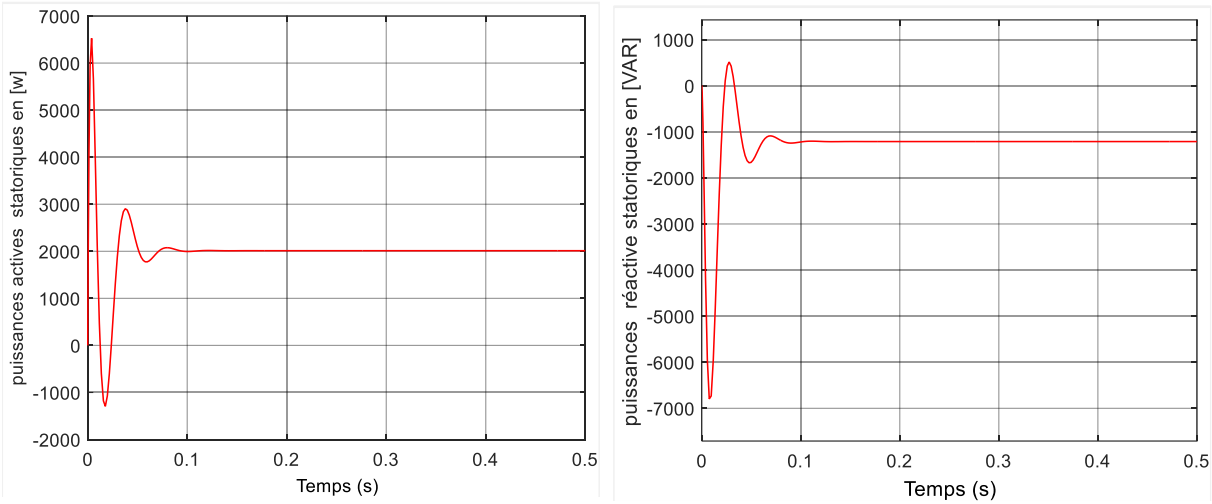


Figure 1.18 : Les puissances actives et réactive statoriques.

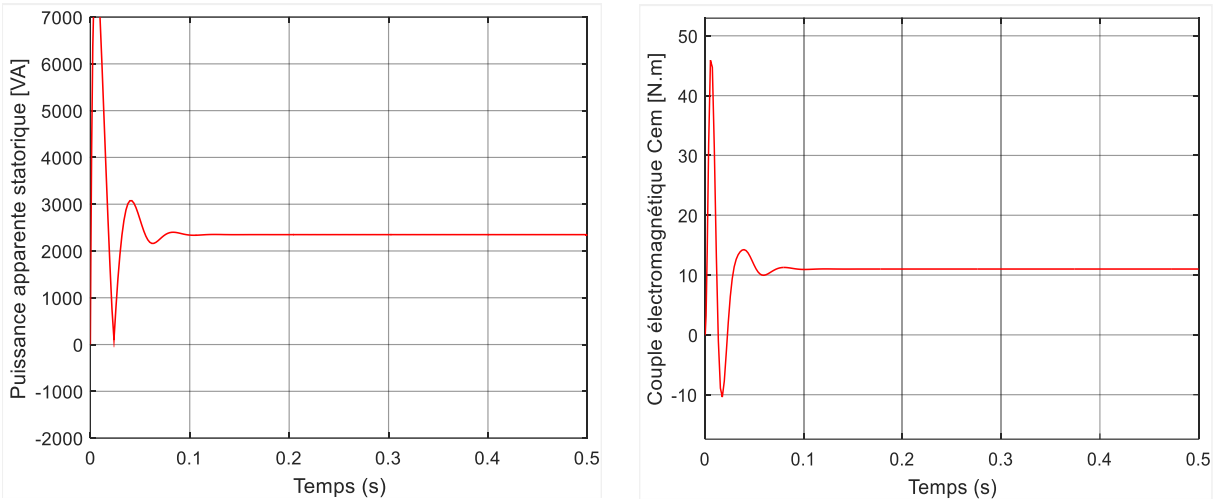


Figure 1.19 : Couple électromagnétique et la puissance apparente.

1.8.2 Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation obtenus montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 0.02 s, ils se stabilisent et prennent leurs formes contenu avec une fréquence de 50 Hz pour les courants statoriques. On remarque que l'augmentation au niveau de la tension rotorique implique d'augmentions au niveau des grandeurs de la machine, et on peut signaler aussi que la tension et la fréquence rotoriques influence sur les grandeurs de la génératrice, et influence sur la puissance au niveau de stator. Le couple électromagnétique est positive atteint au démarrage une valeur maximal (45 Nm).

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'état de l'art sur la conversion électromécanique en utilisant la MADA, où nous avons touché la description de la machine asynchrone à double alimentation et son principe de fonctionnement. Par la suite, on a établi le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en passant du système réel triphasé au système biphasé en utilisant les transformations de Park et de Concordia. Le modèle obtenu a été validé par simulation en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink. Ce modèle sera utilisé pour développer la commande proposée dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Commande par Backstepping d'une GADA

2.1 Introduction

Le souci constant d'améliorer les performances des systèmes de commandes exige des modélisations de plus en plus précises tout en assurant une large plage de fonctionnement pour le système. Il s'ajoute à tout ça le comportement dynamique de la plus part des systèmes physiques qui est naturellement non linéaire et couplé. Dans ce cas, les outils d'analyse et de synthèse des lois de commande, utilisés dans le domaine linéaire, deviennent insuffisants et incapables de réaliser les objectifs exigés pour une loi de commande. Le recours à la théorie de la commande non linéaire devient, par conséquent, indispensable.

Parmi les techniques de commande non linéaire qui ont prouvé leur efficacité, dans les dernières décennies, on trouve la commande par Backstepping qui peut s'appliquer à une large classe de systèmes non linéaires, indépendamment de leur ordre. C'est une méthode qui permet de construire récursivement la loi de commande en se basant sur la sélection d'un ensemble de fonction de Lyapunov. [19]

Ce chapitre, sera consacré à l'application de la commande par backstepping pour commander les puissances active et réactive d'une GADA. Les lois de commande visées seront développées et vérifiées par des tests de simulation.

2.2 Méthodes de Lyapunov

La condition de base sur un système commandé est qu'il doit converger vers un état que nous déterminons appelé point de fonctionnement ou point d'équilibre. La stabilité est considérée comme étant la qualité la plus recherché dans l'étude d'un système dynamique. L'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires a connu un développement très important depuis l'utilisation des résultats de la théorie de stabilité déduite des travaux de Lyapunov. Dans ce contexte, les deux méthodes de Lyapunov, connues sous les noms de la première et la seconde méthode représentent des outils analytiques puissants.

Pour la première méthode, appelée également méthode de linéarisation, il s'agit d'analyser la stabilité du système non linéaire au voisinage du point d'équilibre à travers une approximation linéaire. La mise en évidence de Cette méthode, permet l'utilisation des outils des systèmes linéaire.

Pour la deuxième méthode, appelée méthode directe et qui est plus générale, elle se base sur l'analyse du sens de variation de l'énergie total du système pour analyser sa stabilité. Lyapunov a pu décrire une fonction similaire ayant les propriétés de l'énergie, appelé fonction

de Lyapunov, pour laquelle l'analyse de la stabilité des systèmes non linéaire devient plus commode. [20]

Une fonction de Lyapunov est une fonction V (x) qui possède deux propriétés essentielles :

- La première est la qualité d'extremum au point d'équilibre(x = $x_{equilibre}$), à savoir s'il s'agit d'un maximum ou d'un minimum. Afin de forcer la présence d'un minimum au point d'équilibre, la fonction sera contrainte à être positive pour toute valeur différente de l'origine, autrement dite, elle doit être définie positive. Elle ne pourra s'annuler qu'à l'origine. Dans ce cas, la fonction est dite : fonction candidate de Lyapunov.

$$V(x)\ définie\ positive\ \rightarrow \begin{cases} x = x_{equilibre} \rightarrow V(x) = 0 \\ x \neq x_{equilibre} \rightarrow V(x) > 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

- La deuxième particularité de la fonction de Lyapunov est que, lors de la présence d'un système stable, elle a tendance à diminuer ou d'être conservée lors de l'évolution du système. En conséquence, la dérivée de la fonction candidate de Lyapunov doit être au minimum semi-définie négative :

$$\frac{dV(x)}{dt}\ semi-définie\ négative\ \rightarrow \begin{cases} x = x_{equilibre} \rightarrow \frac{dV(x)}{dt} = 0 \\ x \neq x_{equilibre} \rightarrow \frac{dV(x)}{dt} \leq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Si pour un système, on trouve une fonction qui vérifie les conditions (2.1) et (2.2), le point d'équilibre ($x = x_{equilibre}$) est stable. Si en plus $\frac{dV(x)}{dt}$ est strictement négative ($\frac{dV(x)}{dt} < 0$), le point d'équilibre devient asymptotiquement stable (le système converge obligatoirement vers son point d'équilibre ($x \rightarrow x_{equilibre}$) après un certain temps).

2.3 Application de la théorie de Lyapunov dans la commande des systèmes non-linéaires :

La fonction de Lyapunov introduite initialement pour analyser la stabilité des systèmes non-linéaires, a été transformée en un outil pour établir les lois de commande permettant la stabilité des systèmes dynamique par retour d'état. A cet effet, différentes approches de

commande ont été développés en exploitant les propriétés d'une fonction de Lyapunov pour renforcer les lois de commande [21], parmi lesquelles, on trouve :

- La commande par fonction de Lyapunov.
- La commande par Backstepping.

2.3.1 Commande basée sur la fonction de Lyapunov

La commande par fonction de Lyapunov représente une version simplifiée de la commande par Backstepping générale qui sera traité dans le paragraphe suivant. Pour comprendre le concept de cette commande, considérant le système mono-entrée/mono-sortie défini par la forme affine suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \tag{2.3}$$

Avec :

▪ $x \in R_n$: Le vecteur des variables d'état.

▪ u : L'entrée de commande.

▪ $f : R^n \rightarrow R^n$ $g_i : R^i \rightarrow R$: Des fonctions non linéaires de classe C^∞.

L'objective de la commande par retour d'état, pour le système (2.3), est de trouver une réaction d'état :

$$u = \phi\,(x) \tag{2.4}$$

Tel que le système en boucle fermée :

$$\dot{x} = f\,(x, \phi\,(x)) \tag{2.5}$$

Soit asymptotiquement stable par rapport au point d'équilibre ($x = x_{eq}$). Selon la deuxième méthode de Lyapunov (méthode directe), cela signifie qu'il existe une fonction V (x) satisfit les conditions d'une fonction de Lyapunov, les conditions données par (2.1) et (2.2). Soit la fonction définie positive V (x), condition (2.1) vérifiée, donnée par :

$$V(x) = \frac{1}{2}e^2 \;\; ; \;\; e = x - x_{eq} \tag{2.6}$$

La dérivée de V(x) peut être donnée par :

$$\frac{dV(x)}{dt} = \dot{V}(x) = e\frac{de}{dt} = e\frac{d(x-x_{eq})}{dt} = e\{f(x) - x_{eq} + g(x)u\} \quad (2.7)$$

Pour satisfaire la deuxième condition de la fonction de Lyapunov (condition 2.2), la dérivée de V (x) doit être définie négative. Pour satisfaire cette condition et, selon (2.7), une réaction d'état peut être sélectionnée comme suivant :

$$u = \phi\,(x) = \frac{-f(x) + \dot{x}_{eq} - Ke}{g(x)}\ ; \quad K > 0\ et\ g(x) \neq 0 \quad (2.8)$$

Avec la réaction d'état (2.7), $\frac{dV(x)}{dt} = -Ke^2 \leq 0$, donc $\frac{dV(x)}{dt}$ est définie négative et le point d'équilibre $x = x_{eq}$ est stable.

2.3.2 Principe de la commande par Backstepping

L'idée de la commande par Backstepping a été proposée aux années 80 du siècle passé par Petar Kokotović pour une catégorie de système appelée système de rétroaction strict « *Strict-Feedback System* », figure (2.1). Ce type de systèmes possède une forme d'état triangulaire inférieur donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})x_n \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})x_n \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)U \end{cases} \quad (2.9)$$

Avec :

- $x \in R_n$: Le vecteur des variables d'état.
- u : L'entrée de commande.
- $f : R^n \rightarrow R^n g_i : R^i \rightarrow R$: Des fonctions non linéaires de classe C^∞.
- $x_0 = x(t = 0)\ \epsilon\ R^n$; une condition initiale pour le système.
- $(x_{eq}, u = 0) \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \cdots = \dot{x}_n = 0$; Un point d'équilibre pour le système.

Le principe du backstepping consiste à décomposer la problématique de commande du système global en une séquence de sous-problèmes pour un ensemble de sous-systèmes et à utiliser récursivement certains états comme commandes intermédiaires ou «commandes virtuelles». Les lois de commandes intermédiaires sont sélectionnées, d'une manière récursive, en utilisant une série de fonctions de Lyapunov. Il s'agit de choisir au départ une

fonction de Lyapunov pour le premier sous-système et de l'augmenter, au fur et à mesure qu'on stabilise les différents sous-systèmes successifs, pour aboutir finalement à une fonction de Lyapunov globale qui stabilise le système complet.

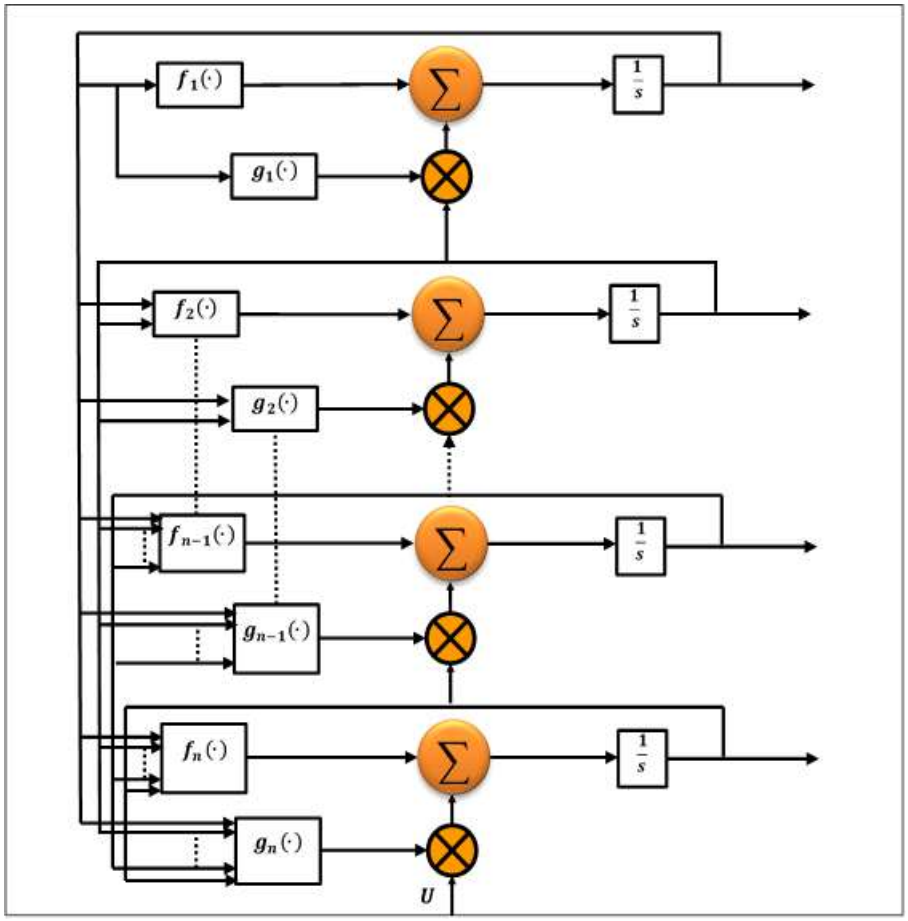


Figure 2.1 : Strict-Feedback System.

2.4 Application de la commande par fonction de Lyapunov sur le modèle de la GADA :

L'objectif de la commande consiste à commander l'évolution des puissances active et réactive de la GADA suivant les exigences d'utilisation. Etant donné le caractère non linéaire et couplé de la dynamique de la GADA, la commande de celle-ci n'est possible qu'après un découplage approprié entre les comportements dynamiques des puissances commandée. Pour avoir un tel découplage, le principe de l'orientation du champ est utilisé. [22]

Dans ce cas, le vecteur flux du stator ou rotor (selon utilisation) est aligné sur l'axe direct du repère tournant dont le flux devient égal à sa composante directe et la composante en quadrature est nulle.

Avec l'orientation du flux statorique, les composants du flux de statorique deviennent :

$$\Phi_{qs} = 0 \rightarrow \Phi_{ds} = \Phi_s \tag{2.10}$$

Par conséquent, les flux du stator et du rotor sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} = 0 \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \tag{2.11}$$

Pour la tension du stator et du rotor, ils sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = R_s I_{qs} + L_s \emptyset_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\emptyset_{dr}}{dt} - L_r \emptyset_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\emptyset_{qr}}{dt} - L_r \emptyset_{dr} \end{cases} \tag{2.12}$$

En utilisant les équations (2.11) et (2.12), la puissance active, la puissance réactive et le couple électromagnétique sont exprimés par :

$$P_s = -\frac{L_m V_s}{L_s} I_{qr} \tag{2.13}$$

$$Q_s = V_s \left(\frac{1}{L_s} \Phi_s - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \right) \tag{2.14}$$

$$T_{em} = \frac{P L_m}{L_s} I_{qr} \emptyset_s \tag{2.15}$$

Les tensions du rotor, qui sont les entrées du système à commander, deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_r (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \tag{2.16}$$

Avant d'entamer l'établissement des lois de commande pour les puissances active et réactive, considérant leurs erreurs de poursuivis exprimées par :

$$\begin{cases} E_P = P_s - P_s^* \\ E_Q = Q_s - Q_s^* \end{cases} \tag{2.17}$$

Pour la commande des puissances actives et réactives, considérons les fonctions candidates de Lyapunov suivantes :

$$\begin{cases} V_P = \frac{1}{2}E_P^2 \\ V_Q = \frac{1}{2}E_Q^2 \end{cases} \tag{2.18}$$

Les dérivées de ces fonctions se donnent par :

$$\begin{cases} \dot{V}_P = E_P\dot{E}_P = E_P(P_s - P_s^*) \\ \dot{V}_Q = E_Q\dot{E}_Q = E_Q(Q_s - Q_s^*) \end{cases} \tag{2.19}$$

En utilisant les équations (2.16), (2.17) et (2.19), on trouve :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = \underbrace{\left(\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)\left(-\frac{gL_m}{L_s}V_s - L_r\sigma\omega_g I_{dr} - R_r I_{qr}\right)}_{F_P} + \underbrace{\left(-\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)}_{G_P} V_{qr} \\ \dot{Q}_s = \underbrace{\left(\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)\left(-R_r I_{dr} + L_r\sigma\omega_g I_{qr}\right)}_{F_Q} + \underbrace{\left(-\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)}_{G_Q} V_{dr} \end{cases} \tag{2.20}$$

Avec l'utilisation de (2.18) et (2.19) dans (2.20), respectivement, les dérivées des fonctions V_P et V_Q deviennent :

$$\begin{cases} \dot{V}_P = E_P\dot{E}_P = E_P\left(F_P + G_P V_{qr} - \dot{P}_s^*\right) \\ \dot{V}_Q = E_Q\dot{E}_Q = E_Q\left(F_Q + G_Q V_{dr} - \dot{Q}_s^*\right) \end{cases} \tag{2.21}$$

Avec :

$$F_P = \left(\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)\left(-\frac{gL_m}{L_s}V_s - L_r\sigma\omega_g I_{dr} - R_r I_{qr}\right)$$

$$F_Q = \left(\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)\left(\frac{R_s L_m}{L_s V_s}Q_s - R_r I_{dr} + L_r\sigma\omega_g I_{qr}\right)$$

$$G_P = G_Q = \left(-\frac{L_m V_s}{L_s L_r \sigma}\right)$$

Pour que les puissances active et réactive poursuivre leur valeur de référence, c'est-à-dire les erreurs de poursuit converge zéro, il faut que les dérivées des fonctions de Lyapunov correspondantes (2.21) soient définie négative. Pour atteindre cet objectif, les tensions de commande V_{qr} et V_{dr} peuvent être données selon (2.20) par les réactions d'état suivantes :

$$\begin{cases} V_{qr} = \frac{-F_P + K_P E_P}{G_P} & K_P > 0 \\ V_{dr} = \frac{-F_Q + K_Q E_Q}{G_Q} & K_Q > 0 \end{cases} \tag{2.22}$$

L'utilisation des lois de commande (2.20) et (2. 21) dans (2.22) donne :

$$\begin{cases} \dot{V}_P = -K_P E_P^2 \\ \dot{V}_Q = -K_Q E_Q^2 \end{cases} \tag{2.23}$$

A partir de (2.23), il est clair que V_P et V_Q sont définies négatives donc les points d'équilibre $E_P = 0$ et $E_Q = 0$ sont stables ($E_P \to 0$ et $E_Q \to 0$). Par conséquent, les lois de commande (2.22) permettent aux puissances active (Ps) et réactive (Qs) de la GADA de poursuivre asymptotiquement leurs valeurs de référence (P^*) et (Q^*).

2.5 Résultats de simulation

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les Lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation.

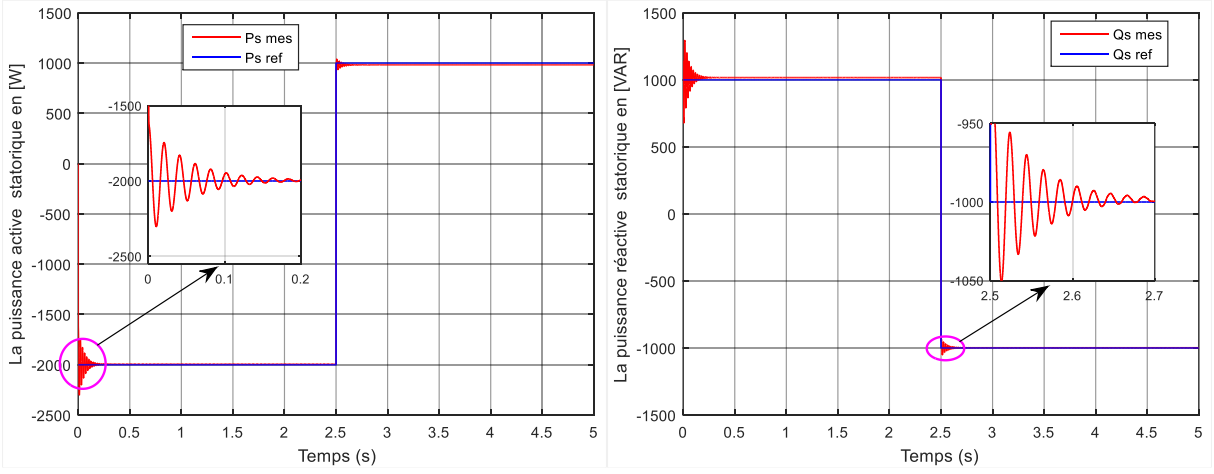


Figure 2.2 : Les puissances active et réactive statorique et sont références.

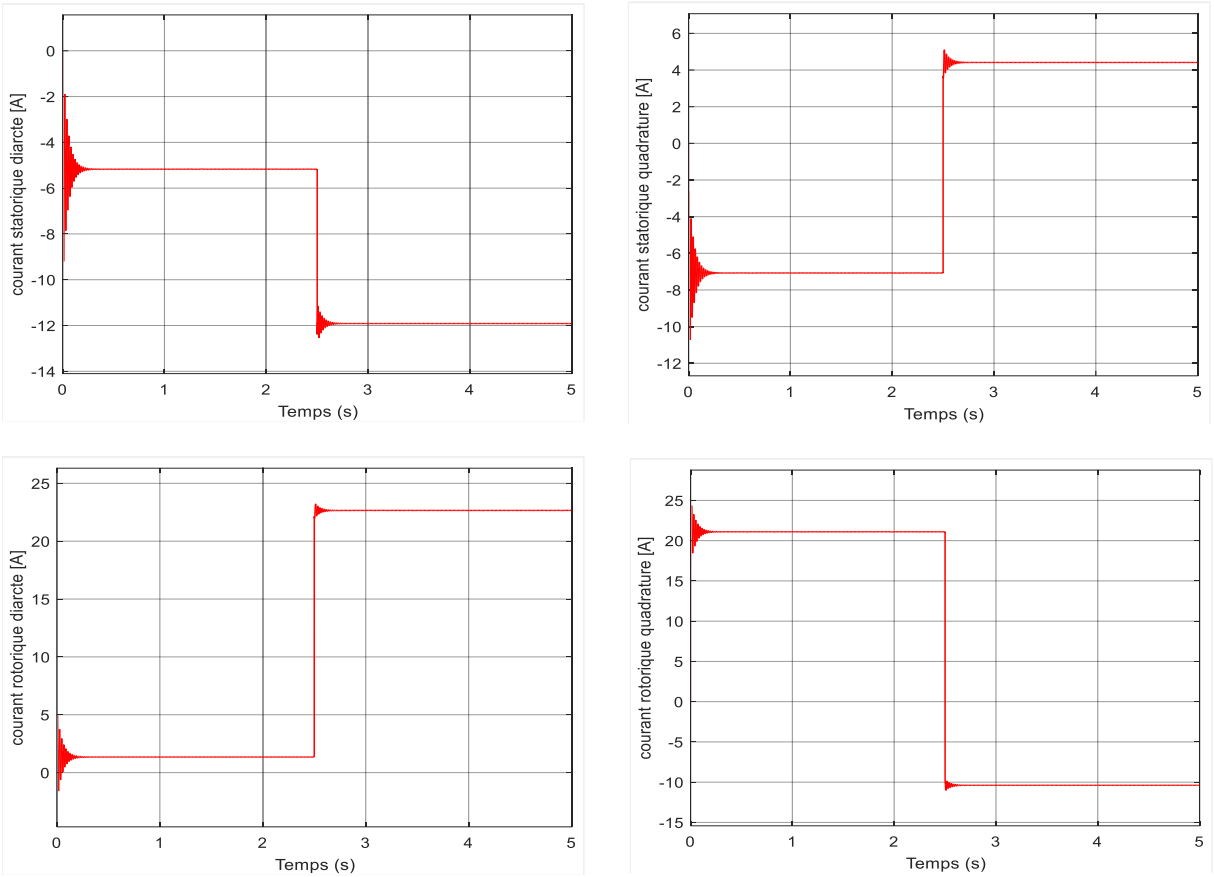


Figure 2.3 : Les composantes du courant rotorique et statorique.

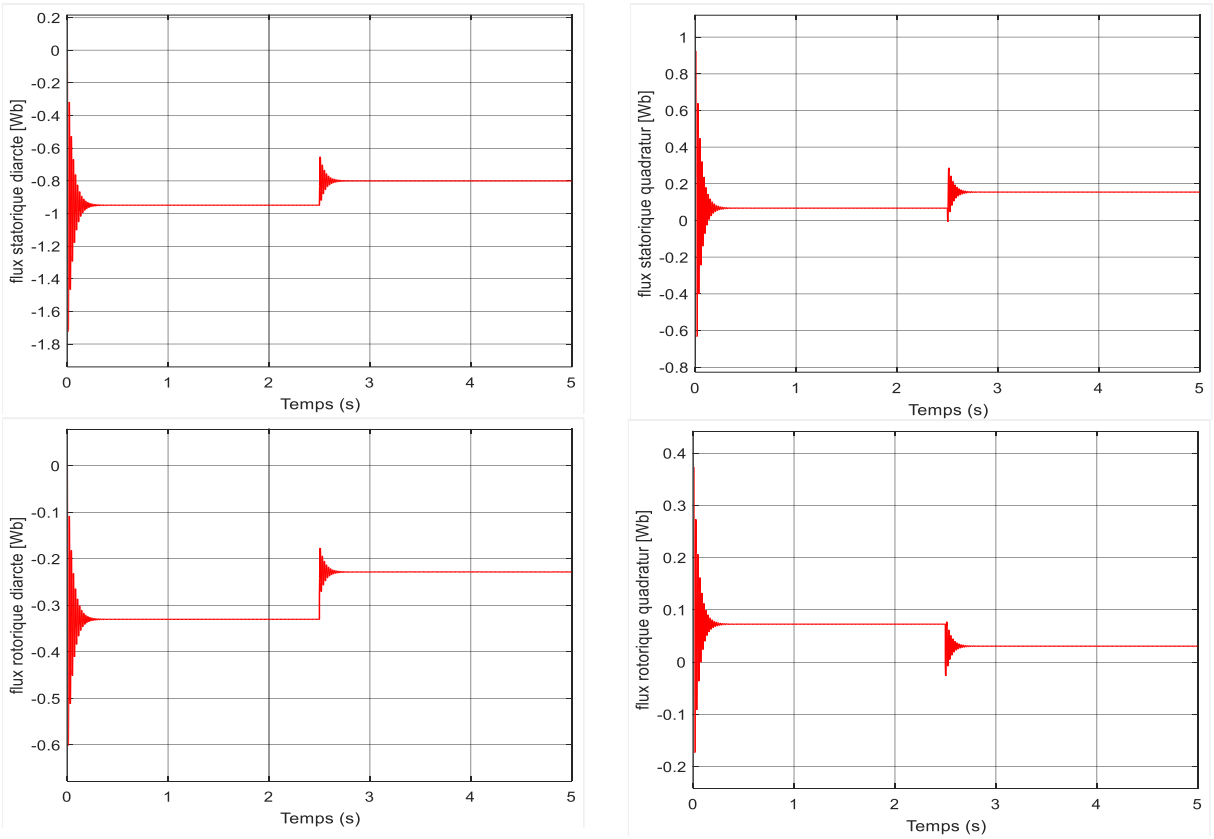


Figure 2.4 : Les composantes du flux rotorique et statorique.

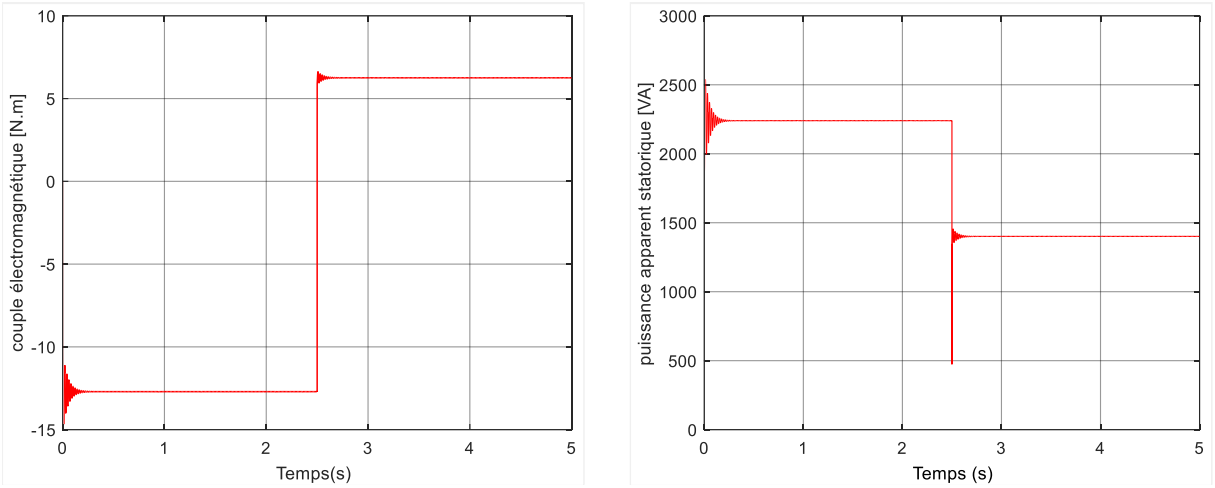


Figure 2.5 : Couple électromagnétique et la puissance apparente.

2.5.1 Interprétations des résultats :

Les figures ci-dessus représentent les différentes courbes obtenues par la commande par backstepping des puissances active et réactive de la GADA.

La figure 2.2 montre la fiabilité et la robustesse de cette commande qui est donnée une bonne poursuite des puissances active et réactive statoriques de leur valeurs de référence. En commande par backstepping les réponses sont sans dépassement, rapide en régime transitoire et l'erreur statique tend vers zéro.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté rappel sur les notions de stabilité au sens de Lyapunov. Ensuite, on a présenté les différentes techniques de commande par Backstepping basées sur la méthode directe de Lyapunov. On a constaté que la synthèse des lois de commande par cette technique récursive est systématique, et simple, tous en stabilisant notre système. Enfin, on a utilisé l'une des techniques de la commande par Backstepping qui la commande par fonction de Lyapunov pour établir la commande de la GADA. Les lois de commande établies visent la commande séparée des puissances active et réactive du côté stator de la GADA.

Les résultats de simulation obtenus ont montré clairement la capacité des lois commande proposées à contrôler les puissances active et réactive qui poursuivent fidèlement leurs références pour les différentes conditions de fonctionnement.

Chapitre III

Développement d'un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une GADA

3.1 Introduction

La commande de la GADA s'appuie sur la mesure de ses courants statoriques et rotoriques, la vitesse ou la position du rotor, gradeurs physiques qui doivent fournir information suffisantes en qualité et en quantité de l'état de la machine.

La position du rotor ainsi que sa vitesse sont généralement obtenues à l'aide d'un codeur incrémental. Ce capteur pose quelques problèmes, tels que :

- Un coût supplémentaire élevé pour le système.
- Pour ne pas avoir des erreurs de quantification importantes, le codeur doit être suffisamment précis.
- Pour pouvoir fonctionner dans des environnements hostiles, le codeur doit être protégé contre la poussière et les chocs mécaniques.
- Le codeur sera nécessairement logé entre la charge et l'arbre de la machine. Ceci va rendre le système plus fragile et induire un accouplement élastique plus long. De plus, il doit supporteur les à-coups des couples imposés par la machine.

Pour toutes ces raisons, il est intéressant d'étudier la suppression du capteur mécanique et de le remplacer par des estimateurs ou observateurs de la vitesse ou de la position basés sur la mesure des grandeurs électriques de la machine.

Par conséquent, nous proposons, dans ce chapitre, un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une GADA en utilisant une règle d'adaptation non linéaire appelée « $\boldsymbol{e_1}$***-Modification*** ». **[**32]

3.2 Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique :

Lors de l'asservissement des systèmes physiques et, Pour alléger les systèmes de commande et réduire les couts, on s'intéresse le plus souvent à substitué les capteurs physiques par des mécanismes d'estimation ou d'observation. Ces mécanismes permettent de reconstituer les valeurs des grandeurs ciblées en utilisant les signaux du système disponible pour la mesure directe. On peut distinguer différents approches pour la substitution des capteurs, entre autres, on trouve :

- **Méthode à base d'estimateur**

Les estimateurs connus longtemps, s'appuient sur la duplication de modèle d'état dans la partie de commande afin de reconstruire les variables internes inaccessibles sur le système

réel. Nombreuses sont les méthodes proposées dans la littérature qui traitent la commande sans capteur de vitesse de la machine. [24]

- **Système adaptatif avec modèle de référence MRAS**

Le Système Adaptatif à Modèle de Référence est basée sur la comparaison des sorties de deux estimateurs. Le premier, qui n'introduit pas la grandeur à estimer (la vitesse dans notre cas), est appelé modèle de référence et le deuxième est le modèle ajustable. L'erreur entre ces deux modèles pilote un mécanisme d'adaptation qui génère la vitesse. Cette dernière est utilisée dans le modèle ajustable. [25]

- **Méthode à base d'observateur**

Le problème posé par le traitement en boucle ouvert peut être évité en utilisant des observateurs afin de reconstituer l'état du système. En fait, un observateur n'est qu'un estimateur en boucle fermée qui introduit une matrice de gains pour corriger l'erreur sur l'estimation. Afin de pouvoir observer les grandeurs non mesurables de la machine, il est nécessaire que le système soit observable. Différentes structures d'observateurs d'état, ont été proposées en littérature. Elles sont très attractives et donnent de bonnes performances dans une gamme étendue de vitesse. [26]

- **Filtre de Kalman**

Une des méthodes utilisées pour l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone est le filtre de Kalman étendu (EKF) [27], Le filtre de Kalman est un observateur non linéaire en boucle fermée dont la matrice de gain est variable. A chaque pas de calcul, le filtre de Kalman prédit les nouvelles valeurs des variables d'état de la machine asynchrone (courant statoriques, flux rotorique et vitesse). Cette prédiction est effectuée soit en minimisant les effets de bruit et les erreurs de modélisation des paramètres ou des variables d'état soit par un algorithme génétique. Les bruits sont supposés blancs [28], Gaussiens et non corrélés avec les états estimés.

- **Estimation basée sur l'intelligence artificielle**

Les algorithmes génétiques, la logique floue et les réseaux neurones sont tous des techniques de calcul numérique à base d'intelligence artificielle, qui est populaire dans le domaine de l'informatique. Mais, de plus en plus, des applications à base de ces nouvelles approches de

calcul numérique se développent pour des applications pratiques dans les domaines de la science et de l'ingénierie . Les observateurs ou bien les estimateurs basés sur les techniques de l'intelligence artificielle amènent une meilleure dynamique, une meilleure précision et ils sont plus robustes, Leurs robustesses sont très bonnes même pour des variations importantes des paramètres de la machine. Néanmoins, le besoin de la connaissance parfaite du système à régler ou à estimer et le manque de l'expertise sur système limitent les applications actuelles à une gamme bien spécifique. [27]-[28]-[29]

3.3 Application d'un estimateur non linéaire pour la vitesse d'une GADA :

Dans le présent travail, nous proposant d'exploiter la puissance des règles d'adaptation non linéaires pour l'estimation de la vitesse de la GADA. Le principe de l'estimateur repose sur l'estimation et la mesure des courants rotoriques. Etant donné que les valeurs mesurées représentent les valeurs réelles des courants, alors, elles sont en liaison directe avec les valeurs réelles de la vitesse mécanique de la GADA. Par contre, la vitesse rotoriques est considérée inconnue dans le modèle utilisée pour estimer les courants rotoriques. Le mécanisme d'estimation est déduit en comparant les courants mesurés avec les courants estimés. Dans ce cas, un développement mathématique est effectué pour établir une relation directe entre les erreurs d'estimation des courants de la GADA et l'erreur d'estimation de la vitesse. En se basant sur cette relation, les règles d'adaptations non linéaires sont utilisées pour ressortir le mécanisme d'estimation de la vitesse. Pour notre cas, on propose d'utiliser la règle d'adaptation ***(e_1-Modification)*** développer par *K. S. Narendra.* [32]

Pour développer l'estimateur proposé, les suppositions suivantes sont adoptées :

- Le modèle mathématique est suffisamment précis pour reconstituer les courants de la machine.
- Les paramètres de la machine sont connus.
- Les courants mesurés sont considérés comme étant les valeurs idéales des courants.
- La vitesse est inconnue dans le modèle utilisé pour estimer les courants de la machine.

3.3.1. Estimation de la vitesse de la GADA en utilisant les courants rotoriques et statoriques

Pour commencer, si la vitesse réelle ou idéale de la GADA (ω_m) est parfaitement connue, à travers le model de la machine, il est possible de reconstituer les valeurs idéales des courants,

c'est-à-dire, les valeurs mesurées. Dans ce cas, les courants idéaux ou mesurés peuvent être obtenus, dans le repère $(\alpha\,.\beta)$ comme suivant :

$$\begin{cases} \dot{I}_{\alpha s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-R_s L_r I_{\alpha s} + \omega_m L_m^2 I_{\beta s} + R_r L_m I_{\alpha r} + \omega_m L_m L_r I_{\beta r} + L_r V_{\alpha s} - L_m V_{\alpha r}\right] \\ \dot{I}_{\beta s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-\omega_m L_m^2 I_{\alpha s} - R_s L_r I_{\beta s} - \omega_m L_m L_r I_{\alpha r} + R_r L_m I_{\beta r} + L_r V_{\beta s} - L_m V_{\beta r}\right] \\ \dot{I}_{\alpha r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[R_s L_m I_{\alpha s} - \omega_m L_s L_m I_{\beta s} - R_r L_s I_{\alpha r} - \omega_m L_s L_r I_{\beta r} - L_m V_{\alpha s} + L_s V_{\alpha r}\right] \\ \dot{I}_{\beta r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[\omega_m L_s L_m I_{\alpha s} + R_s L_m I_{\beta s} + \omega_m L_s L_r I_{\alpha r} - R_r L_s I_{\beta r} - L_m V_{\beta s} + L_s V_{\beta r}\right] \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

$\dot{I}_{\alpha s}$, $\dot{I}_{\beta s}$: Les courants statoriques réelles ou idéales dans le repère fixe$(\alpha\,.\beta)$.

$\dot{I}_{\alpha r}$, $\dot{I}_{\beta r}$: Les courants rotoriques réelles ou idéales dans le repère fixe$(\alpha\,.\beta)$.

ω_m : La vitesse rotorique réelles ou idéales.

Malheureusement, la vitesse de la GADA est inconnue, on ne dispose donc que de sa valeur estimée $(\hat{\omega}_m)$ dans le côté commande. En utilisant la valeur estimée de la vitesse, les valeurs estimées des courants de la machine peuvent être obtenues par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{I}}_{\alpha s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-R_s L_r \hat{I}_{\alpha s} + \hat{\omega}_m L_m^2 \hat{I}_{\beta s} + R_r L_m \hat{I}_{\alpha r} + \hat{\omega}_m L_m L_r \hat{I}_{\beta r} + L_r V_{\alpha s} - L_m V_{\alpha r}\right] \\ \dot{\hat{I}}_{\beta s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-\hat{\omega}_m L_m^2 \hat{I}_{\alpha s} - R_s L_r \hat{I}_{\beta s} - \hat{\omega}_m L_m L_r \hat{I}_{\alpha r} + R_r L_m \hat{I}_{\beta r} + L_r V_{\beta s} - L_m V_{\beta r}\right] \\ \dot{\hat{I}}_{\alpha r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[R_s L_m \hat{I}_{\alpha s} - \hat{\omega}_m L_s L_m \hat{I}_{\beta s} - R_r L_s \hat{I}_{\alpha r} - \hat{\omega}_m L_s L_r \hat{I}_{\beta r} - L_m V_{\alpha s} + L_s V_{\alpha r}\right] \\ \dot{\hat{I}}_{\beta r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[\hat{\omega}_m L_s L_m \hat{I}_{\alpha s} + R_s L_m \hat{I}_{\beta s} + \hat{\omega}_m L_s L_r \hat{I}_{\alpha r} - R_r L_s \hat{I}_{\beta r} - L_m V_{\beta s} + L_s V_{\beta r}\right] \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec :

$\dot{\hat{I}}_{\alpha s}$, $\dot{\hat{I}}_{\beta s}$: Les courants statoriques estimé dans le repère fixe$(\alpha\,.\beta)$.

$\dot{\hat{I}}_{\alpha r}$, $\dot{\hat{I}}_{\alpha r}$: Les courants rotoriques estimé dans le repère fixe$(\alpha\,.\beta)$.

$\hat{\omega}_m$: La vitesse rotorique estimé.

En utilisant (3.1) et (3.2), l'erreur d'estimation entre les valeurs mesurées ou idéales des courants (3.1) et leurs valeurs estimées (3.2) est exprimée par :

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_{\alpha s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-R_s L_r \Delta I_{\alpha s} + L_m^2 \hat{\omega}_m \Delta I_{\beta s} + R_r L_m \Delta I_{\alpha r} + L_m L_r \hat{\omega}_m \Delta I_{\beta r} + \left(L_m^2 I_{\beta s} + L_m L_r I_{\beta r}\right)\Delta\omega\right] \\ \Delta\dot{I}_{\beta s} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[-L_m^2 \hat{\omega}_m \Delta I_{\alpha s} - R_s L_r \Delta I_{\beta s} - L_m L_r \hat{\omega}_m \Delta I_{\alpha r} + R_r L_m \Delta I_{\beta r} + \left(-L_m^2 I_{\alpha s} - L_m L_r I_{\alpha r}\right)\Delta\omega\right] \\ \Delta\dot{I}_{\alpha r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[R_s L_m \Delta I_{\alpha s} - L_s L_m \hat{\omega}_m \Delta I_{\beta s} - R_r L_s \Delta I_{\alpha r} - L_s L_r \hat{\omega}_m \Delta I_{\beta r} + \left(-L_s L_m I_{\beta s} - L_s L_r I_{\beta r}\right)\Delta\omega\right] \\ \Delta\dot{I}_{\beta r} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\left[L_s L_m \hat{\omega}_m \Delta I_{\alpha s} + R_s L_m \Delta I_{\beta s} + L_s L_r \hat{\omega}_m \Delta I_{\alpha r} - R_r L_s \Delta I_{\beta r} + \left(L_s L_m I_{\alpha s} + L_s L_r I_{\alpha r}\right)\Delta\omega\right] \end{cases} \quad (3.3)$$

En utilisant la forme matricielle, l'équation (3.3) peut être arrangée comme suite :

$$\Delta\dot{I} = A.\Delta I + B.\Delta\omega \quad (3.4)$$

Avec :

$$A = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\begin{bmatrix} -R_s L_r & L_m^2\hat{\omega}_m & R_r L_m & L_m L_r \hat{\omega}_m \\ -L_m^2\hat{\omega}_m & -R_s L_r & -L_m L_r \hat{\omega}_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -L_s L_m \hat{\omega}_m & -R_r L_s & -L_s L_r \hat{\omega}_m \\ L_s L_m \hat{\omega}_m & R_s L_m & L_s L_r \hat{\omega}_m & -R_r L_s \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_s L_r \sigma}\right)\begin{bmatrix} L_m^2 I_{\beta s} + L_m L_r I_{\beta r} \\ -L_m^2 I_{\alpha s} - L_m L_r I_{\alpha r} \\ -L_s L_m I_{\beta s} - L_s L_r I_{\beta r} \\ L_s L_m I_{\alpha s} + L_s L_r I_{\alpha r} \end{bmatrix}; \Delta\dot{I} = \begin{bmatrix} \Delta\dot{I}_{\alpha s} \\ \Delta\dot{I}_{\beta s} \\ \Delta\dot{I}_{\alpha r} \\ \Delta\dot{I}_{\beta r} \end{bmatrix}; \Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_{\alpha s} \\ \Delta I_{\beta s} \\ \Delta I_{\alpha r} \\ \Delta I_{\beta r} \end{bmatrix}$$

Avec :

$\Delta\dot{I}_{\alpha s}$, $\Delta\dot{I}_{\beta s}$, $\Delta\dot{I}_{\alpha r}$, $\Delta\dot{I}_{\beta r}$: La différence entre les courants réelle et estimé de la GADA.

$\Delta\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m$: L'erreur d'estimation de la vitesse de la GADA (la différence entre la vitesse réelle et estimé de la GADA).

A partir de (3.4), on peut constater que l'erreur d'estimation de la vitesse de la GADA est devenue en relation avec l'erreur d'estimation des courants de la GADA. Dans ce cas et, en utilisant la d'adaptation « e_1-Modification » [32], la vitesse de la GADA peut être estimée à la base de (3.5) comme suivant :

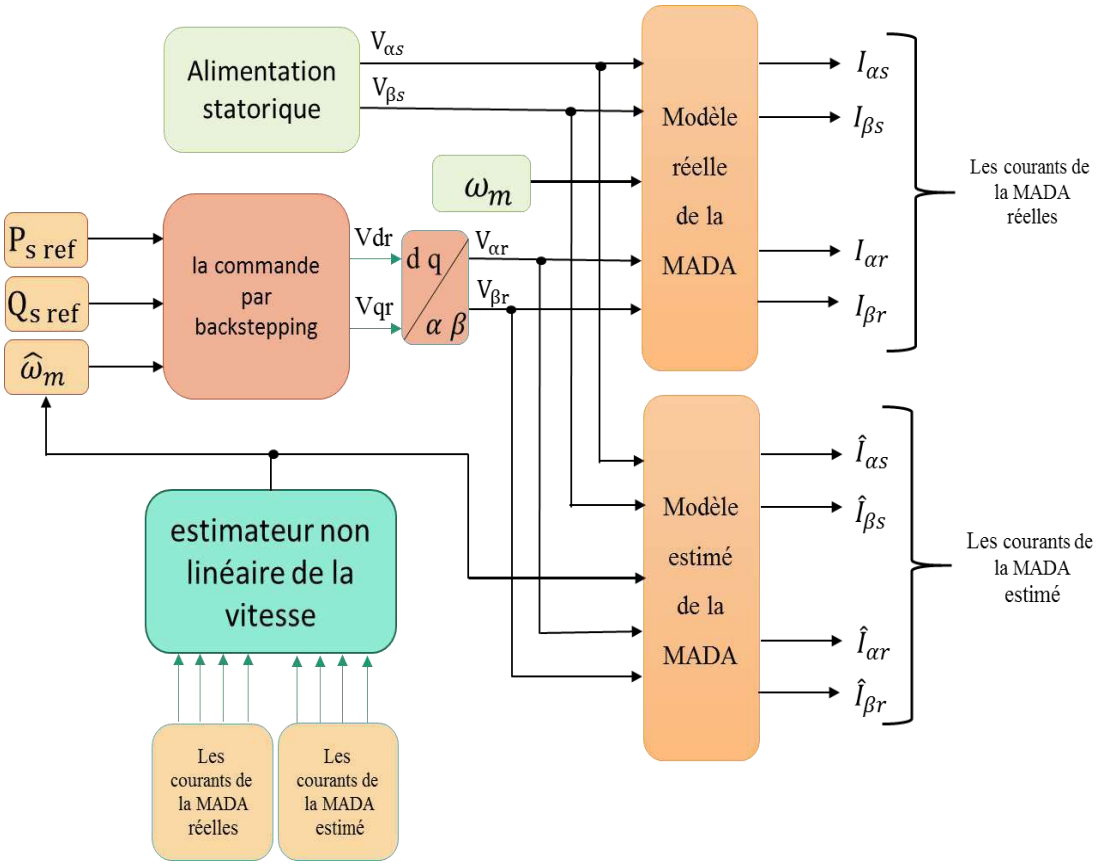
$$\Delta\dot{\hat{\omega}} = K.B^T.\Delta I \quad (3.5)$$

Avec :

K : C'est une constante positive utilisée pour ajuster le comportement de convergence de l'estimateur proposé.

$\Delta I =$ La différence entre les courants réelle et estimé de la MADA.

Le schéma de la commande avec l'estimateur proposé est illustré sur la figure (3.1).



La Figure 3.1 : Le schéma de la commande avec l'estimateur proposé.

3.3.2. Estimation de la vitesse de la GADA en utilisant les courants rotoriques seulement

Afin de simplifier l'estimateur proposé, une deuxième version est proposée pour l'estimateur. En effet et, comme constaté dans le chapitre précédent, la réalisation de la commande par backstepping de la GADA peut être rendue dépendant seulement des courants rotoriques. A cet effet, la version modifiée pour l'estimateur est développée en utilisant seulement les courants rotorique dans le repère lié au champ tournant comme suivant :

$$\begin{cases} \dot{I}_{dr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)I_{dr} + \left(L_r\sigma g\omega_s + \frac{R_s^2 L_m^2}{\omega_s L_s^3}\right)I_{qr} + \frac{R_s L_m}{\omega_s L_s^2}V_s + V_{dr}\right\} \\ \dot{I}_{qr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\left(g\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)I_{qr} - gL_r\sigma\omega_s I_{dr} - g\frac{L_m}{L_s}V_s + V_{qr}\right\} \end{cases} \quad (3.6)$$

Avec :

$\dot{I}_{dr}$, $\dot{I}_{qr}$: Les courants rotoriques idéales dans le repère (d,q).

g : Le glissement réelle ou idéale.

Malheureusement, la vitesse de la GADA est inconnue, on ne dispose donc que de sa valeur estimée $(\hat{g})$ dans le côté commande. En utilisant la valeur estimée de glissement, les valeurs estimées des courants de la machine peuvent être obtenues par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{I}}_{dr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)\hat{I}_{dr} + \left(L_r\sigma\hat{g}\omega_s + \frac{R_s^2L_m^2}{\omega_s L_s^3}\right)\hat{I}_{qr} + \frac{R_sL_m}{\omega_s L_s^2}V_s + V_{dr}\right\} \\ \dot{\hat{I}}_{qr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\left(\hat{g}\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)\hat{I}_{qr} - \hat{g}L_r\sigma\omega_s I_{dr} - \hat{g}\frac{L_m}{L_s}V_s + V_{qr}\right\} \end{cases} \quad (3.7)$$

Avec :

$\dot{\hat{I}}_{dr}$, $\dot{\hat{I}}_{qr}$: Les courants rotoriques estimé dans le repère (d,q).

$\hat{g}$: Le glissement estimé.

En utilisant (3.6) et (3.7), l'erreur d'estimation entre les valeurs mesurées ou idéales des courants (3.6) et leurs valeurs estimées (3.7) est exprimée par :

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_{dr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)\Delta I_{dr} + \left(\frac{R_s^2L_m^2}{\omega_s L_s^3} + L_r\sigma\hat{g}\omega_s\right)\Delta I_{qr} + L_r\sigma\omega_s I_{qr}\Delta g\right\} \\ \Delta\dot{I}_{qr} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\left\{-\hat{g}L_r\sigma\omega_s\Delta I_{dr} - \left(\hat{g}\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right)\Delta I_{qr} - \left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_sI_{qr} + L_r\sigma\omega_s I_{dr} + \frac{L_m}{L_s}V_s\right)\Delta g\right\} \end{cases} \quad (3.8)$$

En utilisant la forme matricielle, l'équation (3.8) peut être arrangée comme suite :

$$\Delta\dot{I} = A.\Delta I + B.\Delta g \quad (3.9)$$

Avec ;

$$A = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\begin{bmatrix} -\left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right) & \left(\frac{R_s^2L_m^2}{\omega_s L_s^3} + L_r\sigma\hat{g}\omega_s\right) \\ -\hat{g}L_r\sigma\omega_s & -\left(\hat{g}\frac{L_m^2}{L_s^2}R_s + R_r\right) \end{bmatrix} \qquad \Delta I = \begin{bmatrix}\Delta I_{dr} \\ \Delta I_{qr}\end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix}B_1 \\ B_2\end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_r\sigma}\right)\begin{bmatrix} L_r\sigma\omega_s I_{qr} \\ -\left(\frac{L_m^2}{L_s^2}R_sI_{qr} + L_r\sigma\omega_s I_{dr} + \frac{L_m}{L_s}V_s\right)\end{bmatrix} \qquad \Delta\dot{I} = \begin{bmatrix}\Delta\dot{I}_{dr} \\ \Delta\dot{I}_{qr}\end{bmatrix}$$

$\Delta g = g - \hat{g}$: L'erreur d'estimation de glissement de la GADA (la différence entre le glissement réelle et estimé de la GADA).

A partir de (3.9), on peut constater que l'erreur d'estimation de la vitesse de la GADA est devenue en relation avec l'erreur d'estimation des courants de la GADA. Dans ce cas et, en utilisant la d'adaptation « e_1-Modification » [32], le glissement de la GADA peut être estimée à la base de (3.10) comme suivant :

$$\Delta\dot{\hat{g}} = K.B^T.\Delta I \tag{3.10}$$

Avec :

K : C'est une constante positive utilisée pour ajuster le comportement de convergence de l'estimateur proposé.

$\Delta I =$ La différence entre les courants réelle et estimé de la MADA.

Et la relation entre le glissement estimé et la vitesse estimé est exprimée par :

$$\hat{\omega}_m = (1 - \hat{g})\,\omega_s \tag{3.11}$$

ω_s : Pulsation statorique.

3.4 Simulation et interprétation de résultats

Afin de valider l'estimateur proposé, il a été utilisé avec la commande Backstepping développée dans le chapitre précédent pour la GADA. Pour s'approcher de la réalité, L'estimateur a été testée avec une vitesse de référence ayant un profile variant correspondant à un profil de vent réel (Fig. 3.2).

❖ Estimation de vitesse en utilisant les courants rotoriques et statoriques

A partir de la figure (3.2), on constate clairement que la vitesse estimée suit fidèlement la vitesse de référence et l'erreur d'estimation de la vitesse est presque nulle (Fig. 3.3). Ces résultats prouvent les capacités de l'estimateur proposé.

En ce concerne le coté commande, les résultats de simulation pour les puissances active et réactive de la GADA (Fig. 3.4) montrent que ces dernières suivent correctement leur valeur de référence. Les figures (3.5) et (3.6) présentent l'évolution des courants statoriques et rotoriques de la GADA.

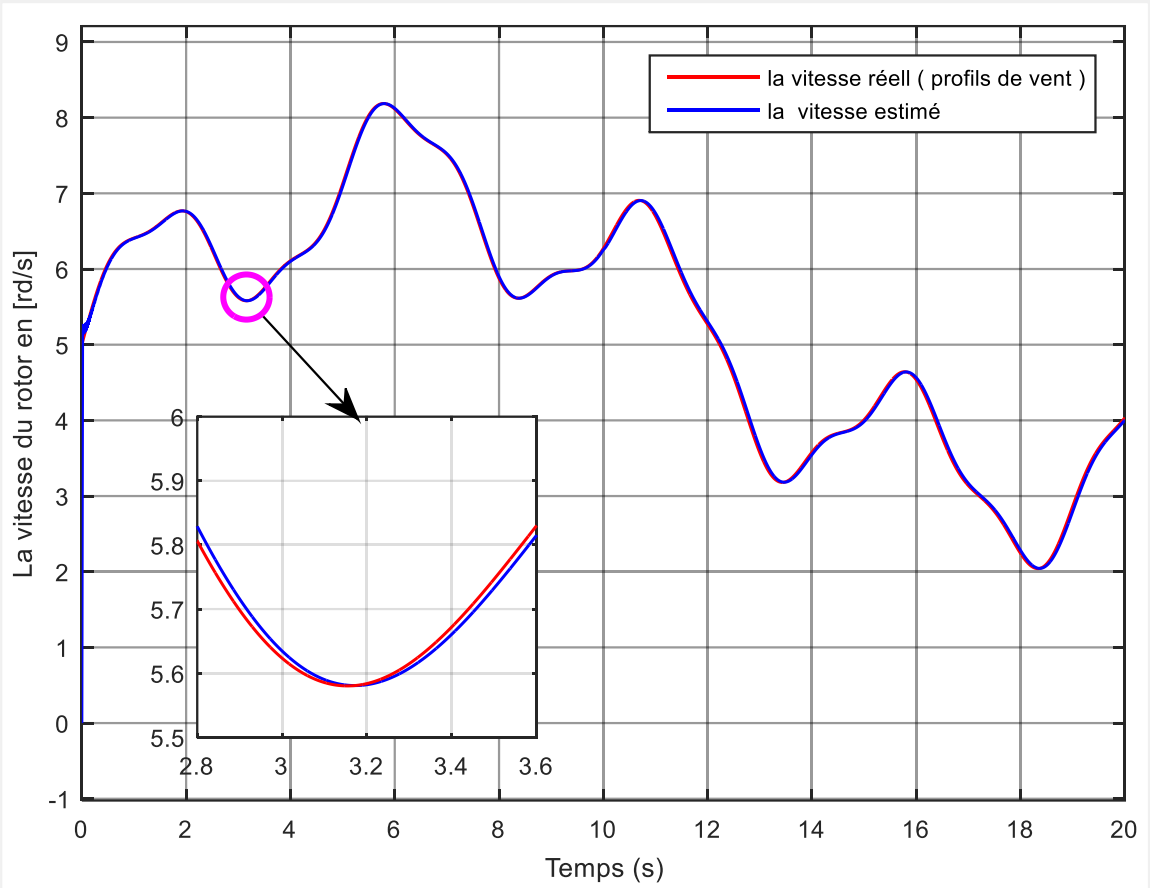


Figure 3.2 : La vitesse rotorique réelle et la vitesse estimée.

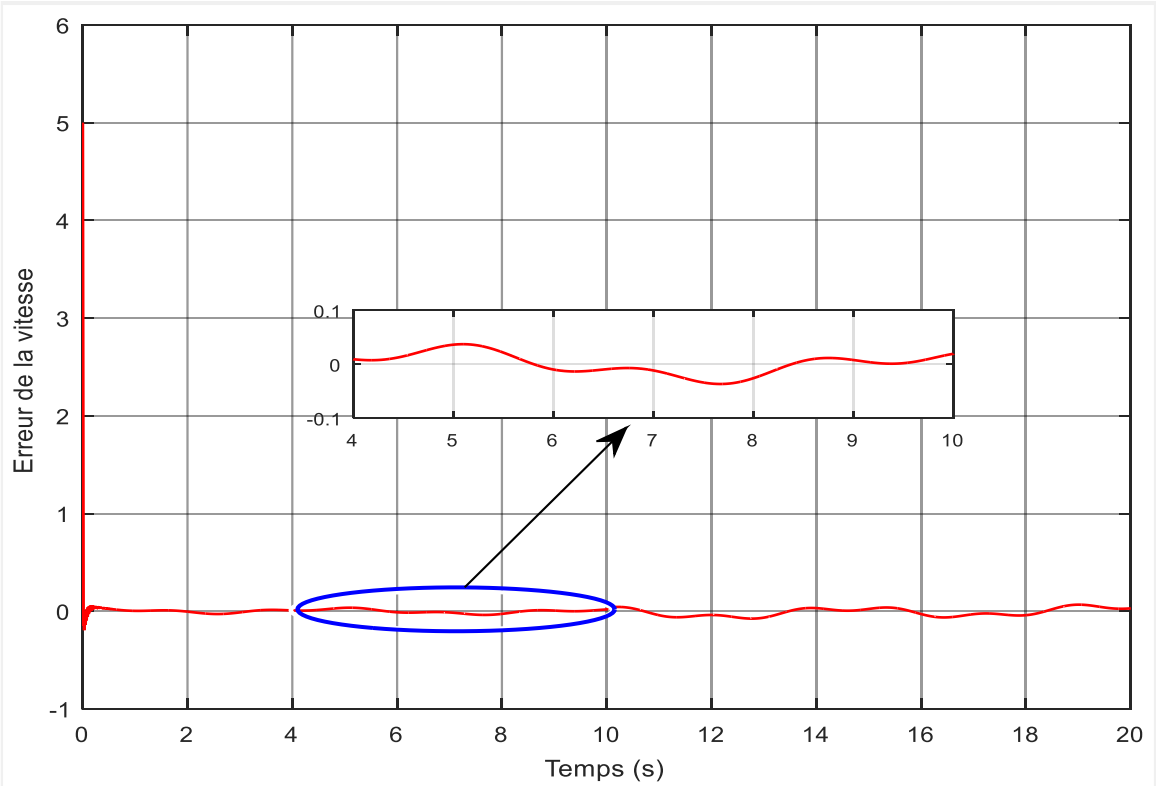


Figure 3.3 : Erreur de la vitesse estimée.

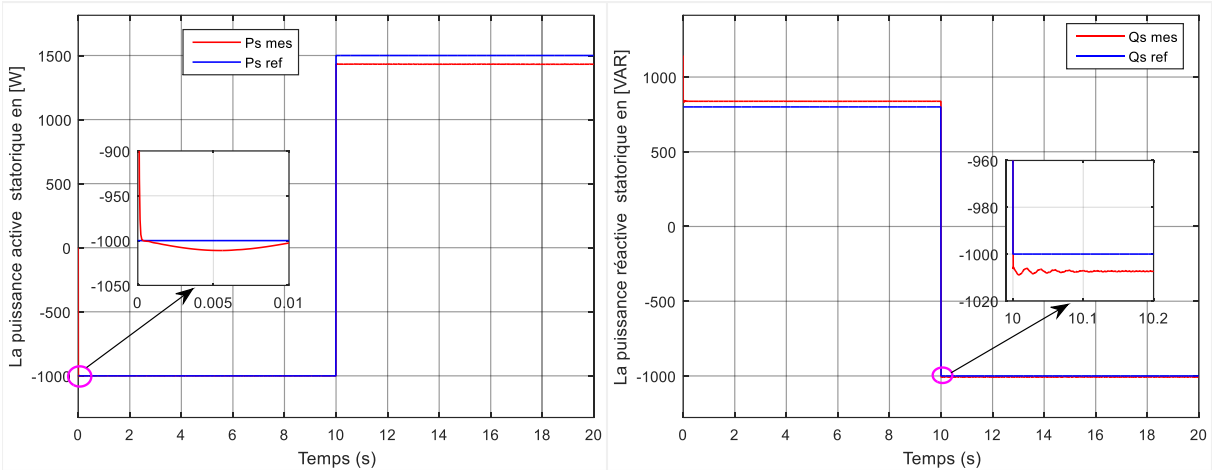


Figure 3.4 : Les puissances active et réactive statorique et sont références.

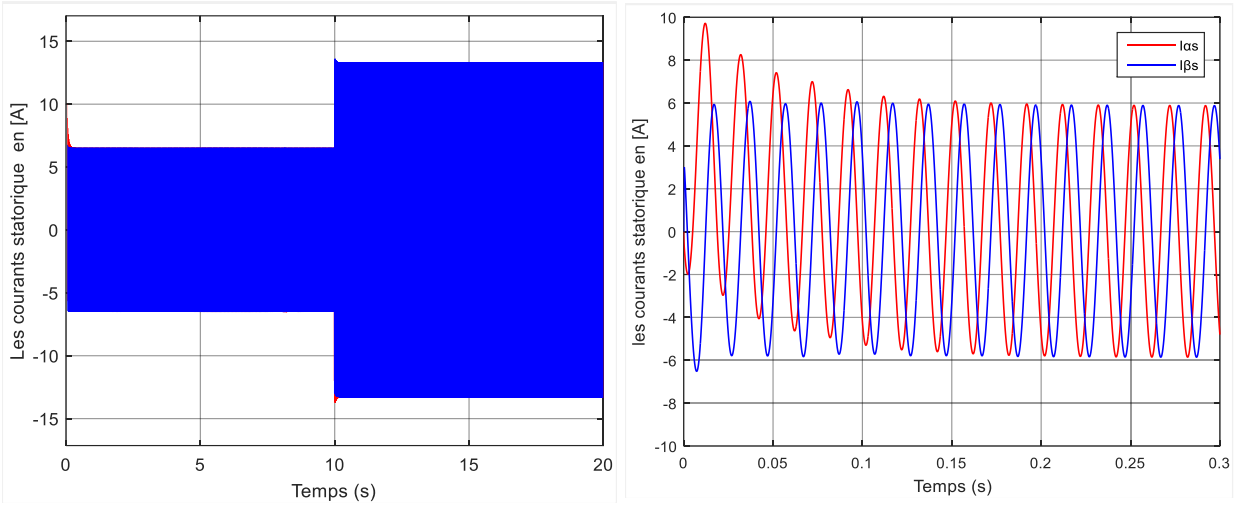


Figure 3.5 : Les courants statorique dans le repère fixe avec zoom.

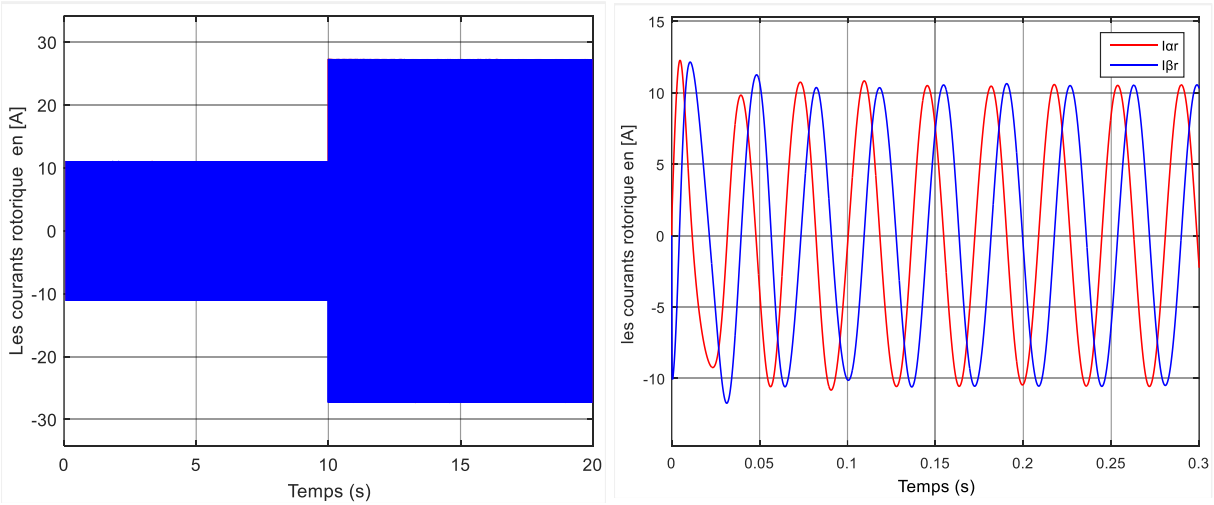


Figure 3.6 : Les courants rotorique dans le repère fixe avec zoom.

❖ Estimation de vitesse avec les courants rotoriques Seulement

Même avec la simplification de l'estimateur, les figures (3.1) montrent que l'estimateur fonctionne correctement. Par conséquent, l'estimateur devient plus efficace, plus simple, moins encombrant et moins chère.

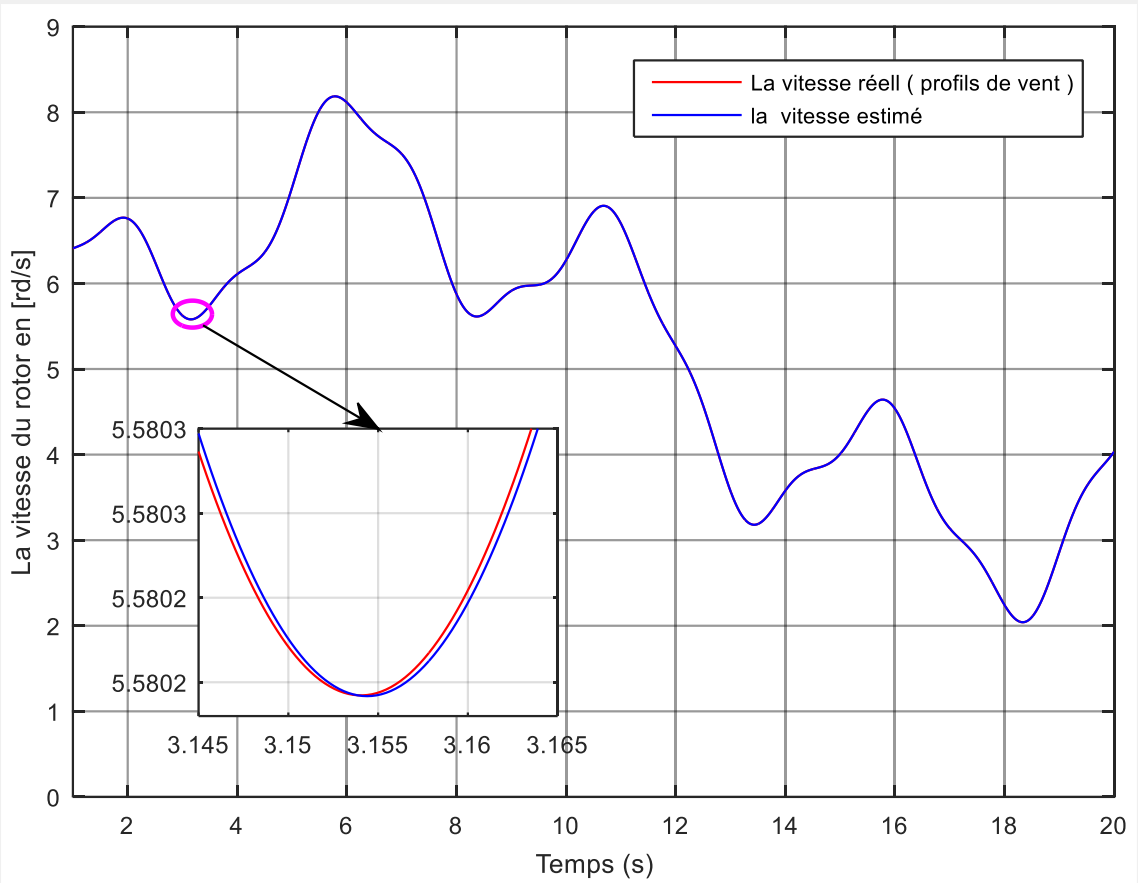


Figure 3.7 : La vitesse rotorique réelle et la vitesse estimée.

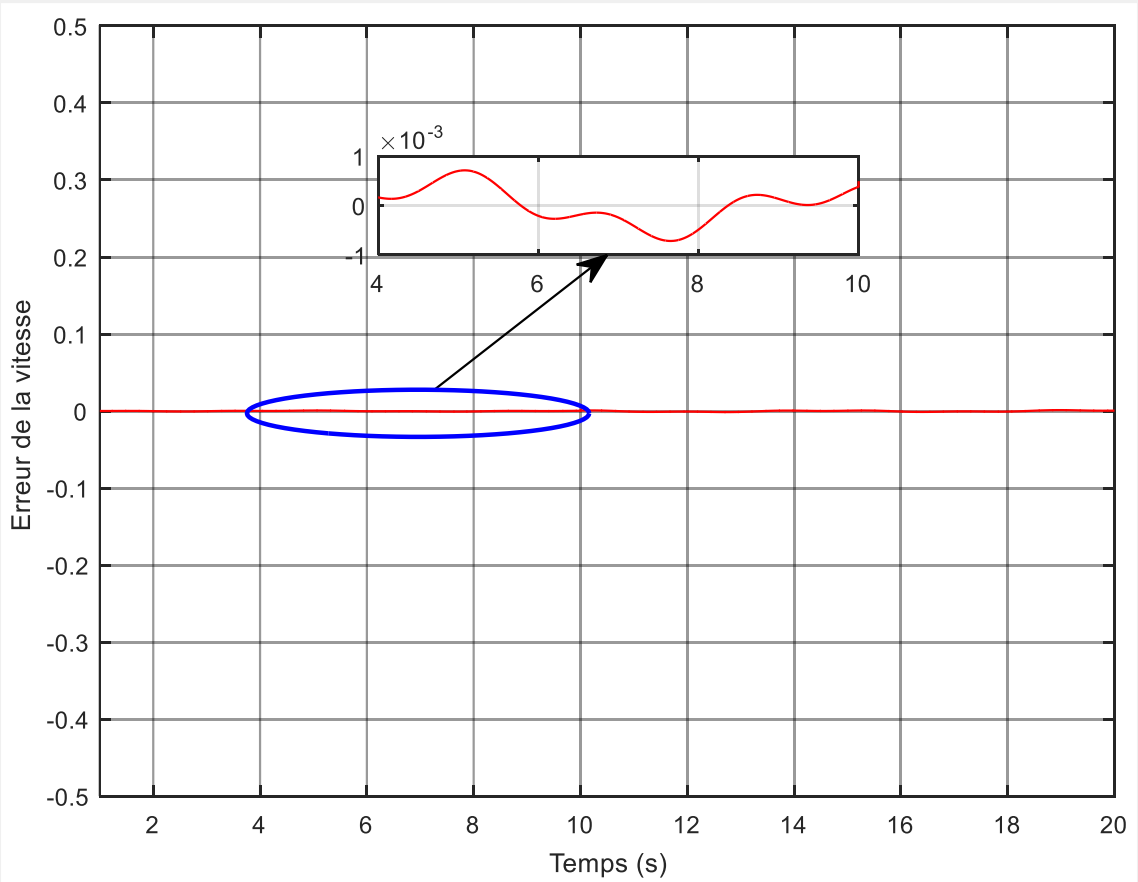


Figure 3.8 : Erreur de la vitesse estimée.

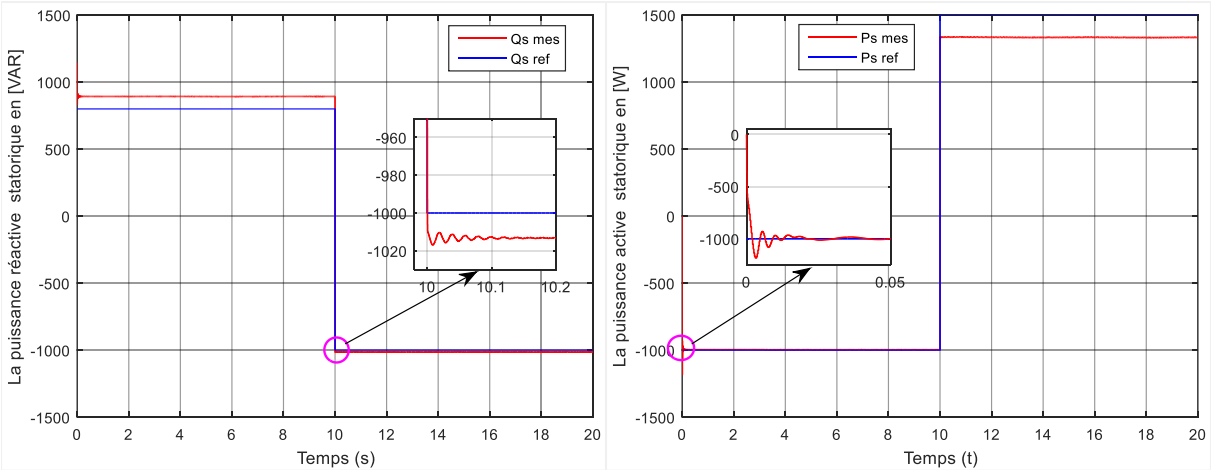


Figure 3.9 : Les puissances active et réactive statorique et sont références.

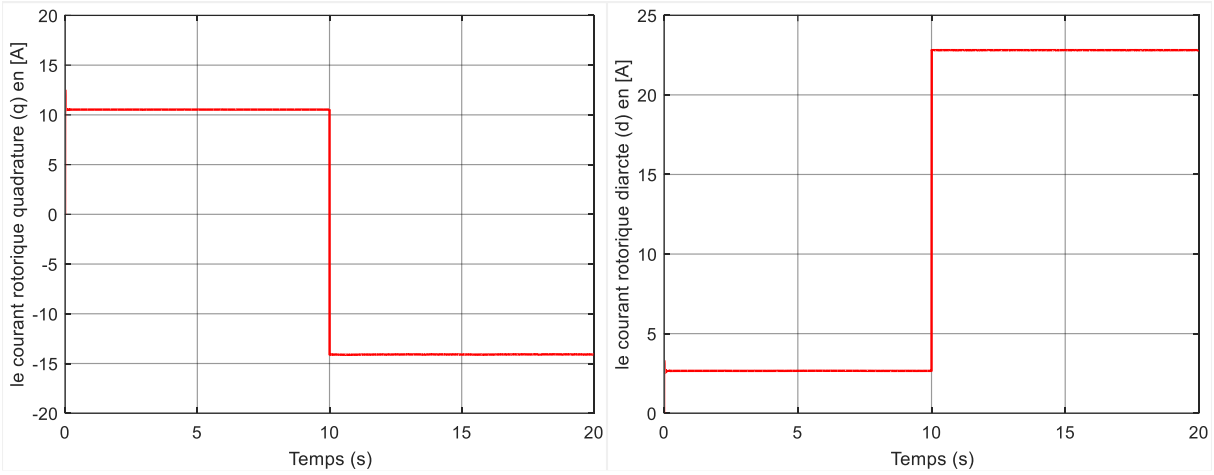


Figure 3.10 : Les courants rotoriques dans le repère (d-q).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la théorie de la commande non linéaire adaptative pour développer un estimateur pour la vitesse mécanique d'une GADA. L'estimateur proposé se base seulement sur les courants de la machine qui sont directement accessible à la mesure directe. Deux versions ont été proposées pour l'estimateur, une avec les courants statoriques et rotoriques de la machine et l'autre avec seulement les courants rotoriques. Pour les deux versions, l'estimateur a donné des résultats très satisfaisant pour l'estimateur de la vitesse de la GADA pour différentes conditions e fonctionnement.D'autre part, l'estimateur proposé possède un caractère universel lui permettant d'être utilisé avec n'importe quel type de commande.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire porte sur l'utilisation des lois de commande et d'adaptation non-linéaires pour améliorer les performances de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en mode génératrice dans un système éolien.

En premier, pour remédier aux insuffisances des lois de commande linéaires, la commande backstepping ou à base de fonction de Lyapunov a été proposée et appliquée pour contrôler les puissances active et réactive délivrées par la machine. Par principe, cette commande est établis sur la base des notions de stabilité ce qui l'offre un atout très important.

En deuxième lieu, un estimateur non linéaire a été proposé pour estimer la vitesse mécanique de la machine pour remplacer le rôle d'un encodeur standard. Il est clair que l'introduction de tel estimateur permettra d'améliorer le système de différents points de vue tels le cout, la robustesse, la simplicité du circuit de commande, etc.

Les résultats de simulations obtenus, pour l'ensemble commande backstepping-estimateur non linéaire, sont satisfaisantes pour tous les régimes de fonctionnement de la machine. L'estimateur a permet de reconstituer les valeurs de la vitesse de la machine avec une grande précision ce qui montre sa puissance et son efficacité.

Finalement et, comme perspectif pour continuer ce travail, on suggère une étape d'implémentation de l'estimateur proposé pour le valider expérimentalement.

Références bibliographiques

[1] MAAMRI Abdel ouahab « commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation ». Mastre Electrotechnique Université d'EL-Oued 2020/2021

[2] Youcef BEKAKRA "Contribution à l'Etude et à la Commande Robusted'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, * Université Mohamed Khider – Biskra* ,2014

[3] Fateh MEHAZZEM «Contribution à la Commande d'un Moteur Asynchrone destiné à la Traction électrique», thèse de doctorat. Université de Constantine, Algérie 2010.

[4] A. Medjber, A. Mouldia, A. Mellit, M.A. Guessoum, "Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien," Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 4, pp. 316-322, 2012.

[5] B. Multon, "Energie électrique : les enjeux," Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.

[6] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed,"Aérogénérateurs électriques," Techniques de l'Ingénieur, D3960, 2004.

[7] B. Paluch, "Introduction à l'énergie éolienne," Revue REE, No. 5, pp. 35-50, Mai 2005.

[8] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau," Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[9] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.

[10] M. Kassa IDJDARENE, "Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira- Béjaia et Lille 1(France), 23 Mai 2010.*

[11] A. DAVIGNY, "Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie," *Thèse Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.*

[12] P. Monjean, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales àénergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu ». Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2012.

[13] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multi-source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique". Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, le 20 novembre 2008

[14] N. HAMDI, "« Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur," UNIVERSITÉ MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.

[15] D.Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie, 2013.

[16] G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.

[17] M. Laamayad Tahar, "Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue," Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2008.

[18] Tifour Samy Imed «Commande Vectorielle d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation Couplée au Réseau (Implémentation sous une carte dSPACE 1104) » Mémoire de Mastre de Université Constantine 1, 2014.

[19] Khalil, H.k., «Non linear Systems », Prentice Hall, 1996.

[20] Abder Rezak Benaskeur, « Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires », Thèse PhD, Université de Laval, 2000.

[21] FahedEshbair, " modélisation et commande d'un système multi-motor par la technique de commande Backstepping ", Université du Québec,Aout 2005.

[22] L. BENALIA, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentations », thèse de doctorat. Université de Batna, Algérie 2010.

[23] M.Hallouz, N.Kabache, et S.Moulahom, « DTC Backstepping Based control of Double Fed Induction Generator ». in 2019 Progress in applied Electrical Enggineering(PAEE), 2019,p.16.

[24] A. bouhedda,"contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "thème de magister d'université Mouloud Mammeri, tizi-ouzou,2011

[25] F.Merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007

[26] L. BAGHLI, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.

[27] A BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés àla Qualité de l'Energie Electrique", thèse de magister, université de Constantine, 2009

[28] A GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", thèse de doctorat de l'Ecole Henri Poincaré, 2010

[29] Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani '' Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind GeneratorBased on MRAS Observer'' World Academy of Science, Engineering &Technology; Aug2011, Vol. 80, p 920

[30] A.S.Belfodhal,"modélisation et commande d'une chaine éolienne avec intégration des stockage Inertiel ",thèse de magister ,Ecole militaire polytechnique

[31] M.Bouaraki "Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbin éolienne àvitesse variable :Application sur un site à TINDOUF",thèse de magister de l'université M'hamedbougara,boumardas,2011

[32] KS_Narendra_{Disturbance generated bifurcation in a prototype adaptive system with e1_modification_law} ieee transactions on automatic control, vol. 33, no. 10, october 1988

Annexe

Les paramètres de la machine utilisés pour la simulation sont donnés par :

Vsn=220	Tension nominale du stator en [V].
Fsn = 50	Fréquence en [Hz].
P = 2	Nombre de paires de pôles.
Nsn = Fsn*60 /P	Vitesse de synchronisme.
Nn = 1338	Vitesse du rotor. [tr/min]
Wmn=Nn*2*pi/60	Pulsation du rotor. [rd/s]
gn = (Nsn-Nn)/Nsn	glissement nominal.
Frn = Fsn*gn	Fréquence rotor en [Hz].
Pn = 2.5e3	Puissance nominale en [W].
Isn = 3.8	Courant nominal du stator en [A].
Irn = 13.5	Courant nominal du rotorique. [A].
Rs = 4.08	Résistance statorique en [ohm].
Rr = 0.435	Résistance rotorique en [ohm].
Ls = 0.202	Inductance cyclique statorique en [H].
Lr = 0.0272	Inductance cyclique rotorique en [H].
Lm = 0.0709	Inductance magnétisante en [H].
J = 0.0361	Moment d'inertie en [Kg/m2].
Kf = 0.00843	Coefficient de frottement. [Nm/rad/s]