

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale Polytechnique

Département Automatique

Laboratoire des Commandes des Processus



Thèse de Doctorat en Automatique

Présenté par : Sami LABDAI

Intitulée

Commande robuste d'une turbo-éolienne associée à une MADA

Sous la Direction de

M. Boualem HEMICI

Professeur ENP

M. Lazhari NEZLI

Professeur ENP

M. Larbi CHRIFI-ALAOUI

MCA UPJV

Présenté et soutenue publiquement le 07/07/2023 devant le jury composé de :

Président M. BOUCHERIT Mohamed Seghir

Professeur ENP

Rapporteur M. Lazhari NEZLI

Professeur ENP

Examineur M. BOUDANA Djamel

Professeur ENP

Examineur M. LABIOD Salim

Professeur Université de Jijel

Examineur M. BOUCHHIDA Ouahid

Professeur Université de Médéa

ENP 2023

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale Polytechnique

Département Automatique

Laboratoire des Commandes des Processus



Thèse de Doctorat en Automatique

Présenté par : Sami LABDAI

Intitulée

Commande robuste d'une turbo-éolienne associée à une MADA

Sous la Direction de

M. Boualem HEMICI

Professeur ENP

M. Lazhari NEZLI

Professeur ENP

M. Larbi CHRIFI-ALAOUI

MCA UPJV

Présenté et soutenue publiquement le 07/07/2023 devant le jury composé de :

Président M. BOUCHERIT Mohamed Seghir

Professeur ENP

Rapporteur M. Lazhari NEZLI

Professeur ENP

Examineur M. BOUDANA Djamel

Professeur ENP

Examineur M. LABIOD Salim

Professeur Université de Jijel

Examineur M. BOUCHHIDA Ouahid

Professeur Université de Médéa

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة نمذجة وتحكم نظام تحويل الطاقة الريحية المعتمد على المولد غير المتزامن مزدوج التغذية ، حيث يتم توصيل الجزء الثابت مباشرة بالشبكة الكهربائية، بينما يُغذى الجزء الدوّار بواسطة محوّلين ثلاثي الطور يعملان بتقنية تعديل عرض النبضة . يبدأ العمل بدراسة شاملة حول أنظمة تحويل الطاقة الريحية. ولضمان استخراج أقصى قدرة ممكنة ورفع كمية الطاقة المحقونة في الشبكة، تم تطبيق استراتيجيات التحكم بتتبع نقطة القدرة العظمى . وقد أظهرت نتائج المحاكاة أن القدرة الميكانيكية المستخرجة من التوربين المحسّن قد ارتفعت بنحو 23٪ مقارنة بالتوربين الثلاثي الشفرات التقليدي. في الجزء الثاني من هذا العمل، تم تقديم منهجين للتحكم المستقل في القدرة الفعّالة والمتفاعلة للمولد، وهما: التحكم المتجهي المباشر وغير المباشر، وكلاهما يعتمد على منظمات الكلاسيكية. إلا أن هذه المنظمات حساسة للاضطرابات وضعيفة المتانة تجاه للاضطرابات. وللتغلب على هذه القيود، تم تطبيق استراتيجيات التحكم بأسلوب التحكم الرجعي للتحكم في القدرتين الفعّالة والمتفاعلة. وقد بينت النتائج فعالية هذه الطريقة من حيث الاستقرار وسرعة الاستجابة. ومع ذلك، يبقى التحكم التقليدي بالتحكم الرجعي يعاني من غياب المتانة أمام الاضطرابات الخارجية. ولحل هذه المشكلة، تم اقتراح استراتيجية تحكم هجينة تجمع بين الشبكات العصبية والتحكم الرجعي التكيفي. وثبتت نتائج المحاكاة في نهاية هذا العمل كفاءة الطريقة المقترحة، خاصة من حيث تعزيز المتانة وتحسين جودة الطاقة المورّدة إلى الشبكة.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الهوائية، مولدات لامتزامنة مزدوجة التغذية، التحكم الرجعي، الشبكات العصبية، النظام الرجعي التكيفي

بالشبكات العصبية

Abstract:

This thesis deals with the modelling and control of a wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator (DFIG) connected directly to the electrical network via the stator and the rotor is fed by two three-phase PWM converters. We are started our study on the state of the art systems for wind energy conversion system. Then, the MPPT control strategy is

applied, to provide the maximum power to the grid. The simulation results show that the extracted mechanical power of the augmented wind turbine has increased by 23% compared to that of three-bladed wind turbine. In the second part of this work, we are presented two types of independent control of active and reactive powers of the DFIG: the direct and indirect vector control, based on the classical PI regulators. However, the last controller is sensitive to the perturbations and less robust against parameter variations. To remedy these problems, the control of the active and reactive powers by the Backstepping is applied to the DFIG. The obtained results show the effectiveness of this strategy of control in terms of stability and fast tracking. However, the Backstepping controller presents a major disadvantage, which is the absence of robustness against perturbations. To resolve this problem, the hybrid control strategy is proposed. This strategy is based on the combination of neural network and the adaptive Backstepping controller. The simulation results presented at the end of this work show the effectiveness of the proposed method especially on the quality of the provided energy.

Key words:

Wind energy, Doubly fed induction generator, Backstepping, Adaptive control, Neural networks, neural adaptive backstopping.

Résumé :

Cette thèse traite la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) connectée directement au réseau électrique via le stator et elle est pilotée par son rotor par deux convertisseurs triphasés à MLI. J'ai commencé notre étude par un état de l'art sur les systèmes d'énergie éolienne. Ensuite, pour fournir le maximum de puissance produite au réseau électrique la stratégie de commande MPPT a été appliquée. Les résultats de simulation attestent que la puissance mécanique extraite du système turbo-éolien a augmenté d'environ de 23% par

rapport à celui du système éolien triphasé. Dans la deuxième partie de ce travail, j'ai présenté deux types de contrôle indépendant de la puissance active et réactive de la GADA : la commande vectorielle directe et indirecte, basées sur des régulateurs classiques PI. Cependant, ce dernier contrôleur est sensible aux perturbations et moins robuste vis-à-vis des variations paramétriques. Pour remédier ces problèmes, le contrôle des puissances active et réactive par le Backstepping a été appliqué à la GADA. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette stratégie de commande en termes de robustesse. Néanmoins, la commande par Backstepping a un inconvénient majeur, ce qui est sa robustesse face aux perturbations. Pour résoudre ce problème, la stratégie de contrôle hybride a été proposée. Cette stratégie est basée sur la combinaison entre les réseaux de neurones, et la commande Backstepping adaptative. Les résultats de simulations présentés à la fin de ce travail montrent l'efficacité de la commande proposée notamment sur la qualité de l'énergie fournie.

Mots clés :

Energie éolienne, Génératrice asynchrone à double alimentation, Commande Backstepping, Commande adaptative, Réseaux de neurones, Commande Backstepping adaptative neuronale.

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens tout particulièrement à exprimer tout ma gratitude et mes vifs remerciements à mes directeurs de recherche, Messieurs **Boualem HEMICI**, **Lazhari NEZLI** professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur **Larbi CHRIFI-ALAOUI** maître de conférences à l'université de Picardie Jules Verne pour leur confiance, leurs implications à la réalisation de ce travail de recherche et pour le support qu'ils m'ont apporté tout au long de ces années. Je tiens à les remercier pour leurs aides, leurs précieux conseils et surtout pour leurs qualités humaines et scientifiques. J'ai eu de la chance de travailler avec eux.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des membres du jury : Monsieur **Salim LABIOD** Professeur à l'université de Jijel, Monsieur **Djamel BOUDANA**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, Monsieur **Mohamed Seghir BOUCHERIT**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Monsieur **Ouahid BOUCHHIDA** Professeur à l'université de Médéa d'avoir accepté juger ce travail et d'en être les examinateurs. Aussi pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse ainsi que pour leurs précieuses remarques.

Je remercie également Monsieur **Abdelaali ALIBI** et Monsieur **Saïd DRID**, professeurs à l'Université de Batna, Monsieur **Abdesselem BOULKROUNE** et Monsieur **Naâman BOUNAR** Professeurs à l'Université de Jijel, Monsieur **Hachemi CHEKIREB** et Monsieur **Mohammed TADJINE** pour ceux qui j'ai côtoyé aux cours ces années à l'université de Jijel, à l'Ecole Nationale Polytechnique et à de Picardie Jules Verne, qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Un grand remerciement va à Monsieur **Larbi CHRIFI-ALAOUI** pour son accueil chaleureux à l'université de Picardie Jules Verne, ainsi que pour ses nombreuses remarques qui ont contribué au bon déroulement de cette recherche.

Un grand merci à mon père (**que Dieu lui fasse miséricorde**), ma chère mère, ma femme, mon frère et ma sœur; par leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien, m'ont permis d'aller de l'avant pour la réussite dans mes études, ils m'ont appris à surpasser les moments difficiles et ils m'ont supporté durant toutes mes années d'étude.

Dédicaces

***A la mémoire de mon cher père,
A ma chère mère,
A ma femme et mes puces Razane et Layane
A mon frère, A ma sœur,
Je dédie cette thèse***

Tables des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale.....20

Chapitre I : Généralités sur les Aérogénérateurs

I.1. Introduction.....23

I.2. Énergie électrique éolienne.....23

I.2.1. Énergie éolienne dans le monde23

I.2.2. Énergie éolienne en Algérie24

I.3. Aérogénérateur.....25

I.3.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....25

I.3.2. Différents types d'éoliennes.....25

I.3.2.1. Selon l'axe de rotation25

I.3.2.2. Selon la puissance nominale26

I.3.2.3. Selon la vitesse de rotation27

I.4. Composition des éoliennes à axe horizontal.....28

I.4.1. Le mat ou la tour.....29

I.4.2. La nacelle.....29

I.4.3. Le rotor30

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne10

I.5.1. Avantages de l'éolien.....30

I.5.2. Inconvénients de l'éolien30

I.6. Turbo-éolienne.....31

I.6.1. Fonctionnement d'une Turbo-éolienne.....31

I.6.2. Composition des Turbo-éoliennes.....31

I.6.3. Avantages d'une Turbo-éolienne32

I.6.4. Coût d'une éolienne à turbine.....32

I.7. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne32

I.7.1. Machine synchrone (MS).....33

I.7.2. Machine asynchrone simple (MAS)33

I.7.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)34

I.8. Conclusion	37
-----------------------	----

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction	39
II.2. Modélisation du convertisseur éolienne	39
II.2.1. Modèle du vent.....	41
II.2.2. Loi de Betz	42
II.2.3. Carénage éoliennes Difuser Augmented Wind Turbines (DAWT)	42
II.2.4. Modèle de la turbine	46
II.2.4.1. Modèle des pales	46
II.2.4.2. Modèle du multiplicateur.....	48
II.2.4.3. Equation mécanique de l'arbre	48
II.3. Modélisation de la MADA	49
II.3.1. Présentation de la MADA.....	49
II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	49
II.3.3. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA).....	50
II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices	50
II.3.3.2. Modèle effectif de la MADA	50
II.4. MADA connecté au réseau.....	53
II.5. MADA autonome (isolé du réseau).....	55
II.5.1. Modélisation de la charge Inductive	55
II.5.2. Modélisation de la charge capacitive.....	56
II.5.3. Modèle de la MADA sous forme d'état	57
II.6. Simulation en Boucle Ouverte.....	57
II.6.1. Mode simple alimentation	58
II.6.2. Mode double alimentation (MADA)	60
II.7. Conclusion	63

Chapitre III : Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

III.1. Introduction	65
III.2. Objectives de la commande vectorielle de l'aérogénérateur.....	65
III.2.1. Génération des tensions et fréquence constantes pour les sites isolés	66
III.2.2 Optimisation du régime de conversion de l'éolienne pour les sites connectés	66
III.3. Architecture du dispositif de commande.....	66
III.3.1. Commande d'une turbine isolée à base de la MADA	67

III.3.2. Synchronisation au réseau d'une turbine à base de la MADA	68
III.3.3. Commande d'une turbine connectée à base de la MADA	68
III.4. Maximum Point Power Tracking (MPPT)	69
III.5. Synchronisation entre MADA et réseau.....	70
III.5.1. Modèle du réseau	71
III.5.2. Algorithme de synchronisation	71
III.6. Principe de la commande vectorielle de la GADA	71
III.6.1. Choix du référentiel dq	73
III.6.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	73
III.6.3. Génération des courants rotoriques de référence.....	76
III.6.3.1. III.6.3.1. Mode isolé	76
III.6.3.2. III.6.3.2. Mode de synchronisation	77
III.6.3.3. III.6.3.3. Mode connecté	77
III.6.4. Génération des tensions rotoriques de référence.....	78
III.6.5. Recapitulatifs des commandes et objectives.....	78
III.7. Résultats de simulation.....	81
III.7.1. Test sous les conditions nominales.....	82
III.7.2. Fonctionnement en régime hyper-synchrone	88
III.7.3. Test de robustesse.....	89
III.8. Conclusion.....	94

Chapitre IV : Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

IV.1. Introduction	97
IV.2. Stabilité des systèmes non linéaires	97
IV.2.1. Définitions	97
IV.2.2 Méthode d'analyse de la stabilité	98
IV .3.Commande Backstepping	99
IV.3.1. Bref historique sur la commande par Backstepping	100
IV.3.2 Principe de la commande par Backstepping.....	100
IV.4. Stratégie de commande de l'aérogénérateur	104
IV.5.Application de la commande par backstepping à l'aérogénérateur	106
IV.5.1. Résultats de simulation	110
IV.5.2.Test sous les conditions nominales	111
IV.5.3.Test de robustesse	115
IV.6. Conclusion	121

Chapitre V : Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la MADA

V.1. Introduction	123
V.2. . La commande par modes glissants Les réseaux de Neurones.....	123
V.2.1. <i>Principe de la commande par modes glissants</i>	123
V.2.2. <i>Synthèse de la loi de commande</i>	124
V.2.3 . <i>Le broutement (chattering)</i>	125
V.3. La commande adaptative.....	126
V.3.1. <i>Introduction à la commande adaptative</i>	126
V.3.2. <i>Principe de la commande adaptative</i>	128
V.3.3. <i>Exemple sur la commande adaptative</i>	128
V.4. La commande par réseaux de Neurones	130
V.4.1. <i>Neurone biologique</i>	130
V.4.2. <i>Neurone formel</i>	130
V.4.3. <i>Réseau de neurones artificiels</i>	133
V.5. Types de réseaux de neurones artificiels.....	134
V.5.1. <i>Réseau perceptron multicouches (MLP)</i>	134
V.5.2. <i>Réseaux de neurones à fonctions de base radiale (RBF)</i>	135
V.6. Apprentissage des réseaux de neurones	136
V.6.1. <i>Algorithme de rétro-propagation à base de gradient</i>	137
V.6.2. <i>Théorème d'approximation universelle</i>	138
V.7. Commande Backstepping adaptative neuronale de la MADA	138
V.7.1. <i>Conception de la commande backstepping adaptative neuronale</i>	139
V.7.2. <i>Application de la commande Backstepping neuronale</i>	140
V.8. Résultats de simulation.....	144
V.8.1. <i>Test sous les conditions nominales</i>	144
V.8.2. <i>Test de robustesse</i>	149
V.9. Etude comparative	154
V.9.1. <i>Comparaison numérique</i>	155
V.9.2. <i>Comparaison graphique</i>	156
V.10. Conclusion.....	159

Chapitre VI : Validation Expérimentale

VI.1. Introduction	161
--------------------------	-----

VI.2. Description du banc d'essai expérimental	161
<i>VI.2.1. Système d'entraînement</i>	162
<i>VI.2.2. Machine Asynchrone Doublement Alimentée</i>	163
<i>VI.2.3. Partie électronique de puissance</i>	164
<i>VI.2.4. Unité de mesure et d'acquisition</i>	165
<i>VI.2.4. 1 Capteur courant</i>	166
<i>VI.2.4. 2. Capteur Tension</i>	166
<i>VI.2.4. 3. Carte dSpace 1104</i>	167
VI.3. Identification de la machine asynchrone à double alimentation	167
<i>VI.3.1. Technique d'identification</i>	167
<i>VI.3.2. Identification par essaim particulière</i>	168
<i>VI.3.3. Résultats de l'identification par essaim particulière</i>	169
VI.4. Description des essais expérimentaux.....	171
<i>V.4.1. Présentation des résultats expérimentaux</i>	173
V5. Conclusion	180
Conclusion général	182
Bibliographie	185
Annexes	193

List des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance	27
Tableau I.2 : Comparatif Vitesse fixe vs vitesse variable	28
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des générateurs synchrones.....	33
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des générateurs asynchrones	34
Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation	35

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Pôles et zéros de la MADA	62
--	----

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Résumé d'objectives de commande	79
---	----

CHAPITRE V

Tableau V.1 : Fonctions d'activations.....	132
Tableau V.2 : Etude comparative entre les commandes présentées.....	154
Tableau V.3 : Comparaison par l'erreur quadratique entre les commandes présentées.	155

CHAPITRE VI

Tableau VI.1 : Paramètres du constructeur.	170
Tableau VI.2 : Paramètres de la MADA.....	170

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Statistiques Mondiales de GWPC en 2020: (a) Capacité éolienne installée en MW entre 2001 et 2020, (b) Les leaders mondiaux de l'énergie éolienne.....	24
Figure I.2 : Carte préliminaire des vents en Algérie	24
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	25
Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical.(a) De type Darrieus. (b) De type Savonius.	25
Figure I.5 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	26
Figure I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes	27
Figure I.7 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.	28
Figure I.8 : Composants d'une éolienne.	29
Figure I.9 : Vue éclatée de la nacelle.	29
Figure I.10 : Différent modèle Turbo-éolienne	31
Figure I.11 : Éolienne basée sur la machine synchrone.	33
Figure I.12 : Éolienne à base de la machine asynchrone	34
Figure I.13 : Éolienne utilisant la MADA	34
Figure I.14 : Différents modes de fonctionnement de la MADA	36

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma global du convertisseur éolien	39
Figure II.2 : Profil de la vitesse du vent.....	40
Figure II.3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne	41
Figure II.4 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne et une éolienne carénée	42
Figure II.5 : Tentatives commerciales de grandes turbines carénées a) Vortec 7 b) Ogin (FloDesign).	44
Figure II.6 : Conception de la turbo-éolienne d'Université de Clarkson.	45
Figure II.7 : Banc de test Clarckson et Bergey Excel 1	45
Figure II.8 : Puissance générer en fonction du vent	46
Figure II.9: Coefficient de puissance en fonction du vent.....	46
Figure II.10 : Évolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ	47
Figure II.11 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	49
Figure II.12 : Représentation spatiale des enroulements de la MADA.....	50
Figure II.13 : Différents systèmes axe utilisés.....	52

Figure II.14 : Eolienne basée sur une MADA autonome avec une charge inductive.	56
Figure II.15 : Eolienne basée sur une MADA autonome avec une charge inductive.	57
Figure II.16 : Réponses de la machine en mode simple alimentation (MAS) à vide.....	59
Figure II.17 : Réponses de la MADA avec tension de rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m	61
Figure II.18 : Représentation graphique des pôles et zéros de la MADA.....	62

Chapitre III

Figure III.1 : Courbe typique de régulation d'une éolienne à vitesse variable	66
Figure III.2 : Configuration proposé de la chaine de production éolienne	67
Figure III.3 : Principe de contrôle la vitesse de la turbine par le MPPT	69
Figure III.4 : principe de commande d'une éolienne à vitesse variable.	70
Figure III.5 : Technique de la PLL.....	71
Figure III.6 : Algorithme de synchronisation.....	72
Figure III.7 : Schéma d'équivalence MCC et MADA après orientation du flux.....	73
Figure III.8 : Orientation du repère (dq)	74
Figure III.9 : Boucle de régulation de tension mode isolée.	76
Figure III.10 : Boucle de régulation de tension mode synchronisation	77
Figure III.11 : Boucle de régulation de vitesse.	77
Figure III.12 : Boucle de régulation des courants	78
Figure III.13 : Schéma global de la boucle intérieur	79
Figure III.14 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur en mode 1.....	80
Figure III.15 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur mode 2	80
Figure III.16 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur mode 3	81
Figure III.17 : Equation du vent utilisé dans la simulation	82
Figure III.18 : Résultats de simulation de la commande vectorielle sous conditions nominales.	86
Figure III.19 : Puissance active du stator et du rotor en modes hypo/hyper-synchrone.	88
Figure III.20 : Résultats de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.	93

Chapitre IV

Figure IV.1 : Schéma de principe de la commande par backstepping	100
Figure IV.2 : Le schéma de commande générale non linéaire	110

<i>Figure IV.3 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping sous conditions nominales</i>	<i>115</i>
<i>Figure IV.4 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping –test de robustesse ..</i>	<i>120</i>

Chapitre V

<i>Figure V.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état</i>	<i>124</i>
<i>Figure V.2 : Principe de commande adaptative.....</i>	<i>126</i>
<i>Figure V.3 : Commande adaptative directe</i>	<i>127</i>
<i>Figure V.4 : Commande adaptative indirecte</i>	<i>127</i>
<i>Figure V.5 : Neurone biologique t.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure V.6 : Neurone formel</i>	<i>131</i>
<i>Figure V.7 : Représentation d'un réseau de neurones artificiels</i>	<i>133</i>
<i>Figure V.8: Perceptron multicouche.....</i>	<i>134</i>
<i>Figure V.9 : Réseau RBF: (a) : Structure du réseau RBF, (b) : distribution des centres.....</i>	<i>135</i>
<i>Figure V.10 : Réseau de neurones MLP à une seule couche cachée</i>	<i>137</i>
<i>Figure V.11 : Schéma de principe de la commande adaptative neuronale indirecte</i>	<i>139</i>
<i>Figure V.12 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping neuronal sous conditions nominales</i>	<i>148</i>
<i>Figure V.13: Résultats de simulation de la commande par Backstepping neuronal –test de robustesse.....</i>	<i>153</i>
<i>Figure V.14 : Résultats de simulation comparaison entre Backstepping et Backstepping neuronale.....</i>	<i>158</i>

Chapitre VI

<i>Figure VI.1 : Banc d'essai expérimental au laboratoire L.T.I à Cuffies-Soissons</i>	<i>161</i>
<i>Figure VI.2 : Plaque signalétique du MCC</i>	<i>162</i>
<i>Figure VI.3 : Schéma de commande de la turbine à base de MCC</i>	<i>163</i>
<i>Figure VI.4 : Machine asynchrone a doublé alimentation LANGLOIS MAT-20</i>	<i>163</i>
<i>Figure VI.5 : Schéma électrique équivalent de la MADA.....</i>	<i>164</i>
<i>Figure VI.6 : Onduleur/ Redresseur SEMIKRON.....</i>	<i>165</i>
<i>Figure VI.7 : Capteur de courant.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure VI.8 : Capteur et diviseur de tension.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure VI.9 : Carte d'acquisition dSPACE1104.....</i>	<i>167</i>
<i>Figure VI.10 : Résultats d'optimisation avec l'algorithme de PSO.</i>	<i>171</i>
<i>Figure VI.11 : Banc d'essai simplifié et son schéma de commande</i>	<i>172</i>
<i>Figure VI.12 : Profil de vent expérimentale</i>	<i>173</i>
<i>Figure VI.13 : Résultats expérimentaux.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure VI.14 : Résultats expérimentaux tension MADA-Réseau</i>	<i>179</i>

Liste des abréviations NOTATIONS ET SYMBOLES

Principaux indices et exposants

$(\cdot)_{as}, (\cdot)_{bs}, (\cdot)_{cs}$	: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au stator.
$(\cdot)_{ar}, (\cdot)_{br}, (\cdot)_{cr}$	: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au rotor.
$(\cdot)_{\alpha}, (\cdot)_{\beta}$	: Composantes (α, β) dans un repère diphasé.
$(\cdot)_d, (\cdot)_q$	: Composantes (d, q) dans un repère diphasé tournant.
$(\cdot)_s, (\cdot)_r, (\cdot)_h$	: Composantes statorique, rotorique et d'entrefer.
$(\cdot)_{ref}$	: Grandeur de référence.
$(\cdot)_n$	: Grandeur nominale.
$(\cdot)^T$	: Matrice transposée.

Principaux symboles

$R_s, (R_r)$	: Résistance par phase d'un enroulement au stator (respectivement rotor).
$l_s, (l_r)$	: Inductance propre d'un enroulement stator (respectivement rotor).
$L_s, (L_r)$	: Inductance cyclique du stator (respectivement rotor).
M_{sr}	: Mutuelle Inductance cyclique.
σ	: Coefficient de dispersion magnétique.
p	: Nombre de paire de pôles.
f	: Coefficient des frottements visqueux.
f_r	: Coefficient de frottement.
J	: Inertie du moteur chargé.
V	: Fonction de Lyapunov.
η, ψ	: Constantes strictement positives.
α, β, γ	: Des constantes.
k_1, k_2	: Constantes positives.
K_p	: Le coefficient de proportionnalité.
K_i	: La constante de temps d'intégration.
S	: L'opérateur de Laplace.
$\Delta(s)$	: Matrice modélisant les incertitudes.
μ	: Fonction d'appartenance.
ρ	: Densité de l'air
C_g	: Effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice
R	: Rayon des pales
C_p	: Coefficient de puissance
λ	: Vitesse spécifique

Principales grandeurs

C_{em}	: Couple électromagnétique.
----------	-----------------------------

C_r	: Couple résistant.
C_G	: Couple aérodynamique.
$\emptyset$	: Flux magnétique.
θ	: Angle entre un enroulement rotorique et son homologue statorique.
$\theta_s, (\theta_r)$	: Angle entre la phase a du stator (respectivement rotor) et l'axe d .
ω	: Vitesse angulaire électrique.
$\omega_s, (\omega_r)$	: Pulsation des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques).
Ω	: Vitesse de rotation mécanique du rotor.
Ω_s	: Vitesse de rotation du champ statorique.
Ω_r	: Vitesse de rotation du champ rotorique.
P_s	: Puissance active statorique.
Q_s	: Puissance réactive statorique.

Abréviation

WCES	: Wind Conversation Energie System
GWEC	: Global Wind Energy Council.
AC	: Alternative Current (courant alternatif).
DC	: Direct Current (courant continu).
MADA	: Machine Asynchrone Double Alimentation.
GADA	: Générateur Asynchrone Double Alimentation.
MAS	: Machine Asynchrone.
MS	: Machine Synchrone.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
PI	: Proportionnel intégral.
CSV	: Commande structure variable.
MGOS	: Mode glissant d'ordre supérieur.
PSO	: Particle swarm optimization.
GSA	: Gravitational Search Algorithm.

Introduction

Générale

Introduction générale

Depuis la plus grande partie de l'histoire de l'humanité, l'homme n'a disposé que des énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Autrefois, les seules sources disponibles étaient la biomasse, exploitée grâce au feu, et la force musculaire humaine. Aujourd'hui, une grande partie du monde dépend principalement des énergies fossiles, également appelées ressources traditionnelles.

De nos jours, la demande croissante en énergie électrique, ainsi que l'épuisement progressif des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon...), caractérisées par d'importantes émissions de dioxyde de carbone lors de leur combustion, ont poussé les chercheurs à se tourner vers des ressources énergétiques durables et plus respectueuses de l'environnement. Ces ressources proviennent d'éléments naturels tels que le vent, le soleil et l'eau. Ces moyens de substitution sont regroupés sous le terme « énergies renouvelables »

Les énergies renouvelables, en pleine expansion, constituent l'un des éléments clés du développement durable. Elles permettent de produire une électricité propre. Parmi elles, on distingue principalement l'énergie hydraulique, solaire thermique, photovoltaïque et éolienne.

Comparée aux autres sources renouvelables, l'énergie éolienne est l'une des plus sollicitée pour la production d'électricité, aussi bien pour des sites isolés que pour des réseaux connectés. Elle représente une alternative compétitive contribuant à la réduction de la demande électrique croissante. Le développement des chaînes de conversion de l'énergie éolienne a encouragé les industriels et les chercheurs à améliorer leurs performances technico-économiques ainsi que la qualité de l'énergie fournie.

Après plusieurs décennies de recherche et de progrès technologiques, de nombreux pays se sont aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Parmi les plus avancés, on compte l'Allemagne, l'Espagne, les États-Unis, l'Inde, la Chine et le Danemark.

L'objectif de ce travail est de présenter une étude d'un système de commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne, appelée aérogénérateur, basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) à vitesse variable. Ce choix est justifié par l'intérêt croissant que portent les chercheurs et les industriels à ce type d'éoliennes. En effet, les avancées actuelles dans le domaine des matériaux magnétiques permettent une meilleure exploitation des génératrices asynchrones à double alimentation, à coût réduit, pour différentes conditions de vent.

La principale préoccupation de ce type d'architecture est de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes, indépendamment de la vitesse de rotation de l'éolienne et de la puissance demandée. Ainsi, l'ensemble de la chaîne de

conversion est contrôlé de façon à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de puissance maximale (MPPT).

Ce travail est structuré comme suit :

Chapitre 1 : présentation d'un état de l'art des différentes énergies renouvelables, de leurs principes de conversion en énergie électrique, et de l'intérêt particulier de l'énergie éolienne.

Chapitre 2 : modélisation d'un système éolien à base de GADA, suivie de la simulation du modèle afin de l'intégrer dans le système global.

Chapitre 3 : présentation d'une stratégie de commande de l'aérogénérateur basée sur la commande vectorielle à régulateurs PI.

Chapitre 4 : étude d'une stratégie de commande non linéaire, notamment la commande par Backstepping.

Chapitre 5 : analyse de la robustesse de la commande de l'aérogénérateur, avec une stratégie non linéaire avancée : le Backstepping adaptatif neuronal, suivie d'une étude comparative entre les différentes lois de commande présentées.

Chapitre 6 : validation expérimentale des trois lois de commande : commande vectorielle à base de PI, Backstepping, et Backstepping adaptatif neuronal.

Enfin, ce travail se conclut par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur les aérogénérateurs

Chapitre I

Généralités sur les aérogénérateurs

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est exploitée depuis plus de 3000 ans. Au début, l'homme l'utilisait principalement pour pomper l'eau, moulinier les grains et naviguer sur les mers. Au cours de l'évolution industrielle qu'a connue l'Europe, l'utilisation de cette énergie est restée très limitée. En revanche, la crise pétrolière mondiale survenue au début des années soixante-dix a ravivé l'intérêt pour l'exploitation de cette ressource gratuite. Ainsi, les premiers systèmes éoliens destinés à la production d'électricité ont vu le jour dans les années quatre-vingt-dix.

Dans ce chapitre, je présenterai d'abord les principes fondamentaux de l'énergie éolienne et son fonctionnement. Ensuite, je décrirai les différents types d'éoliennes ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, j'aborderai les avantages et les limites de cette source d'énergie, son évolution à l'échelle mondiale et ses perspectives futures.

I.2. Énergie électrique éolienne

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin de développer des systèmes d'énergie propre et durables, capables d'assurer une production fiable sur le long terme. Les avancées en aérodynamique et en ingénierie moderne ont permis d'améliorer considérablement les éoliennes. Aujourd'hui, elles fournissent une énergie fiable, rentable et non polluante, aussi bien pour les particuliers que pour les communautés et les applications à l'échelle nationale.

L'énergie éolienne est propre, renouvelable, et utilisée pour la production d'électricité depuis plus de cent ans. Les avantages qu'elle présente la rendent particulièrement attractive, surtout face aux problèmes environnementaux causés par d'autres sources d'énergie. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en environ neuf mois. En revanche, elle peut avoir un impact sur l'avifaune, le bruit et le paysage [1, 2].

I.2.1. Énergie éolienne dans le monde

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient une croissance de plus de 10 % par an depuis une dizaine d'années. Le rapport annuel 2019 publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) souligne l'intérêt considérable porté à cette énergie dans le monde. En effet, la puissance totale installée à la fin de l'année 2019 était estimée à plus de 651 GW, contre 527 GW l'année précédente, soit une croissance des investissements de 19 %. La Chine est le leader

avec 35,298 GW, devant l'Allemagne et les États-Unis. La figure I.1 montre l'évolution de l'exploitation de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale. À la fin de l'année 2019, la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et l'Espagne représentaient à eux cinq 73 % de l'ensemble des capacités éoliennes installées dans le monde.

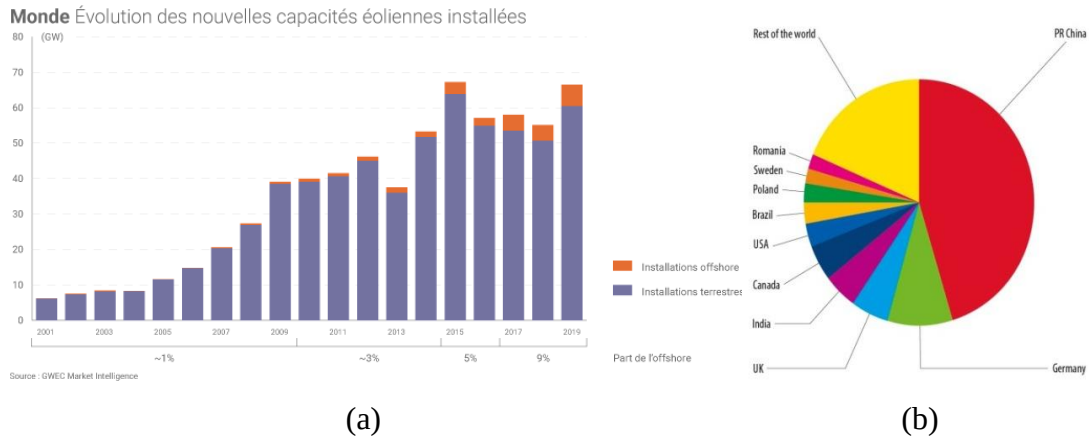


Figure I.1 : Statistiques Mondiales de GWPC en 2020 [3] : (a) Capacité éolienne installée en MW entre 2001 et 2020, (b) Les leaders mondiaux de l'énergie éolienne.

I.2.2. Énergie éolienne en Algérie

La carte du vent de l'Algérie est estimée à 10 m du sol [4]. Les vitesses moyennes annuelles varient de 2 à 6,5 m/s. La région centrale présente des vitesses comprises entre 3 et 4 m/s, et celles-ci augmentent en se dirigeant vers le sud-ouest. Le maximum est observé dans la région d'Adrar, avec une valeur moyenne de 6,5 m/s. Toutefois, il existe plusieurs microclimats où la vitesse dépasse 5 m/s, notamment à Tiaret, Tindouf et Oran. La figure I.2 illustre ce potentiel en Algérie.

Le programme d'énergie renouvelable algérien était planifié comme suit :

Période 2011-2013 : installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar, région choisie suite aux observations de l'Office National de la Météorologie.

Entre 2014 et 2015 : réalisation prévue de deux autres fermes de 20 MW chacune.

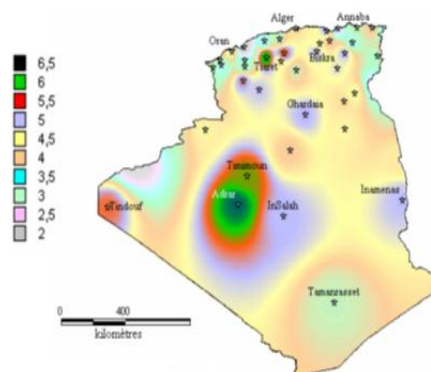


Figure I.2 : Carte préliminaire des vents en Algérie [4].

Période 2016-2030 : des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de développer d'autres projets pour une puissance d'environ 1 700 MW.

I.3. Aérogénérateur

Un aérogénérateur, couramment 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 grâce à une génératrice [5]. La figure ci-dessous illustre la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

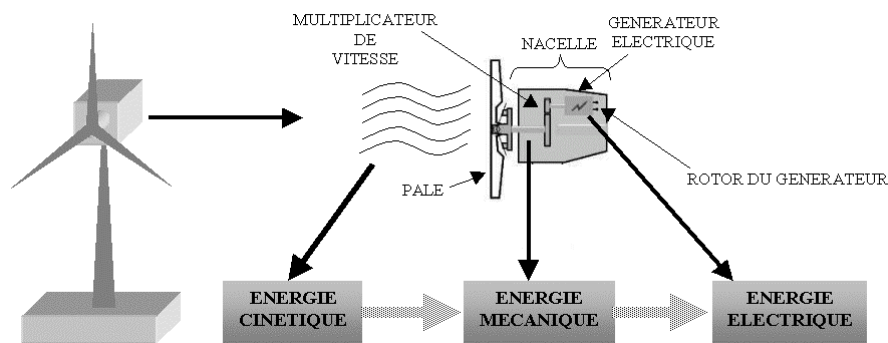


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [5].

I.3.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor, ainsi qu'une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite convertie soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par un générateur.

I.3.2. Différents types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes selon plusieurs critères [6,7].

I.3.2.1. Selon l'axe de rotation

a. Éoliennes à axe vertical :

Les aérogénérateurs à axe vertical étaient les premières structures pour la production de l'énergie électrique. Selon leur caractéristique aérodynamique, on trouve ceux conçus sur la base de la portance (à rotor de Darrieus), et ceux basés sur la traînée (à rotor de Savonius).

(

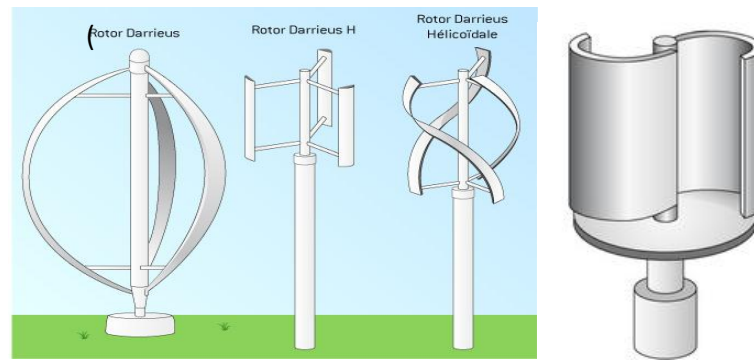


Figure I.4 : Éoliennes à axe vertical. (a) De type Darrieus. (b) De type Savonius.

b. Éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées. Ils utilisent la force de portance du vent appliquée aux pales, de la même manière que les ailes d'un avion. Sur le plan aérodynamique à axe horizontal, on peut comparer les différents types de turbines selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée.

- Éoliennes à marche lente

Les éoliennes à marche lente ont généralement entre 20 et 40 pales et elles ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre, leur rendement est faible, car leur vitesse en bout de pale est limitée.

- Éoliennes à marche rapide

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple, mais elle génère des vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faible, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

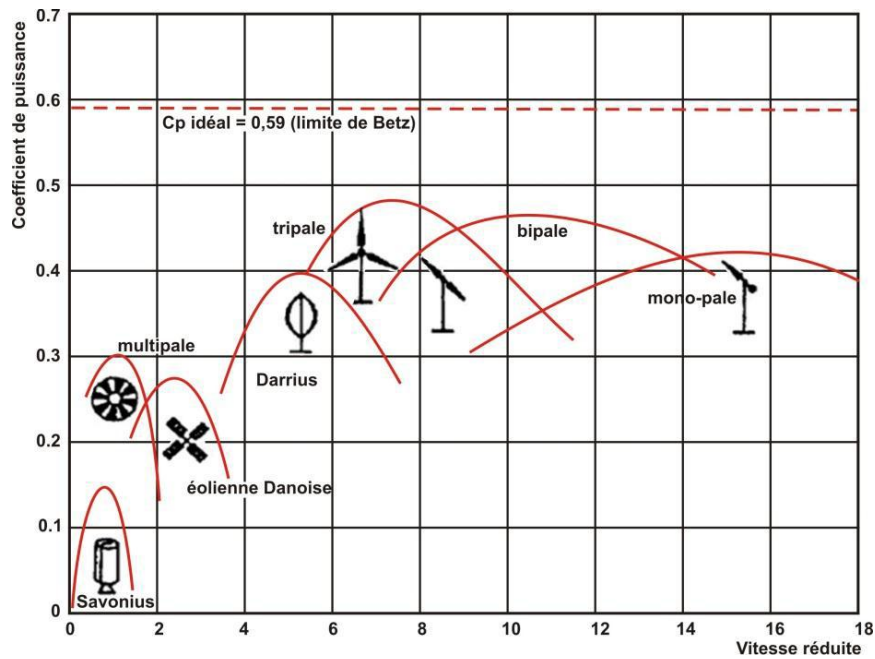


Figure I.5 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [7].

I.3.2.2. Selon la puissance nominale

À titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [8].

La figure I.6 illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance

Échelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

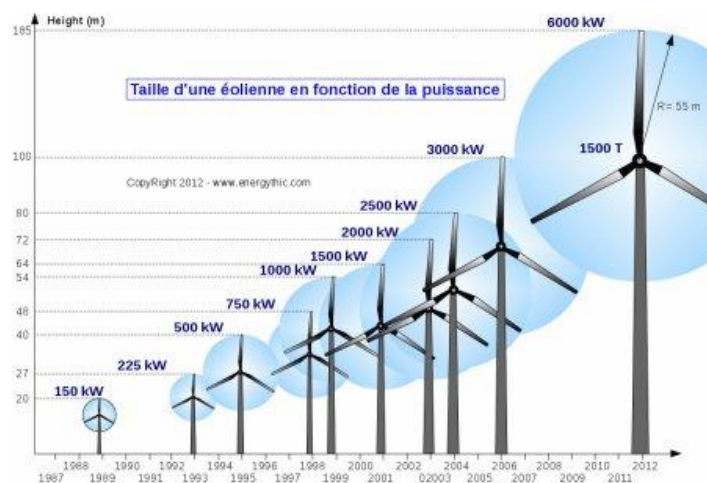


Figure I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes [9].

I.3.2.3. Selon la vitesse de rotation

- Vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

- Vitesse variable

Dans ce cas, une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine.

- Intérêt de la vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustré sur la figure I.7. À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de générateur en fonction de la vitesse du vent.

Le Tableau I.2 illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements.

Tableau I.2 : Comparatif Vitesse fixe vs vitesse variable.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
-Simplicité du système électrique	-Augmentation du rendement énergétique
-Plus grande fiabilité	-Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
-Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne.	-Réduction des efforts subis par le train de puissance.
-Moins cher.	-Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
-Fonctionnement à vitesse variable (± 30 % de la vitesse nominale)	

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure (I.7).

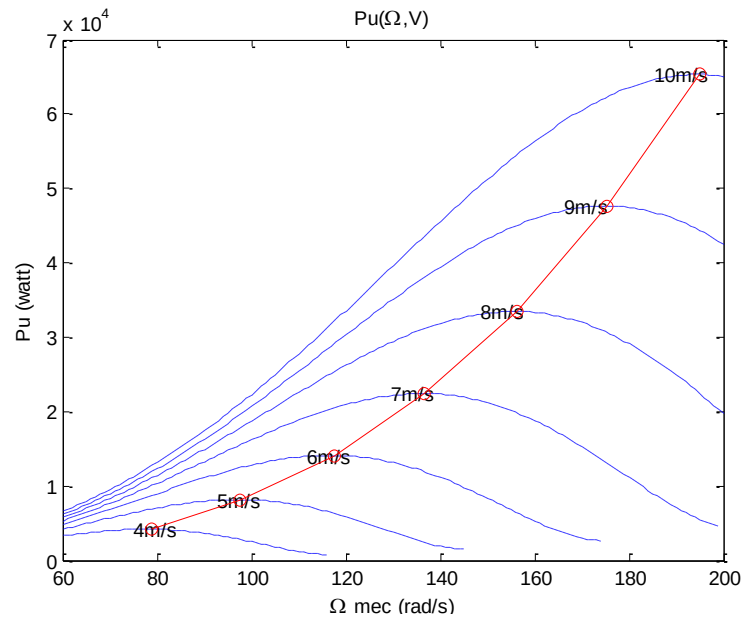


Figure I.7 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

I.4. Composition des éoliennes à axe horizontal

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : le mat, la nacelle et le rotor. Ces éléments peuvent être mécaniques et électriques, comme il est illustré dans la figure (I.8).

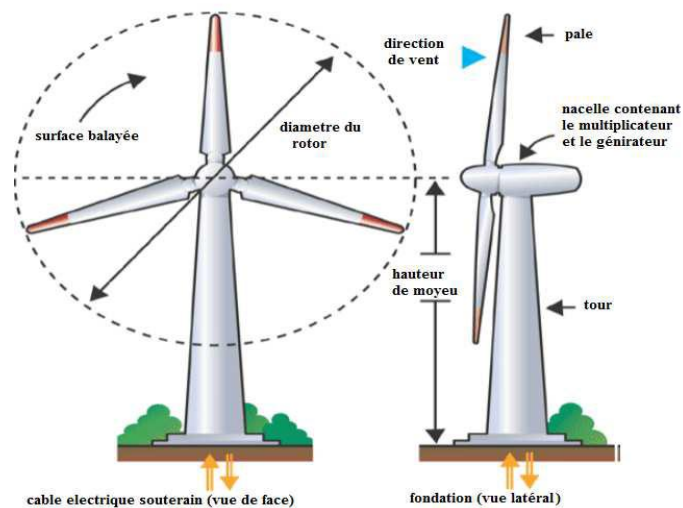


Figure I.8 : Composants d'une éolienne.

I.4.1. Le mat ou la tour

C'est un tube d'acier ou de béton armé, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

I.4.2. La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le générateur électrique à

l'arbre de l'éolienne Figure (I.9).

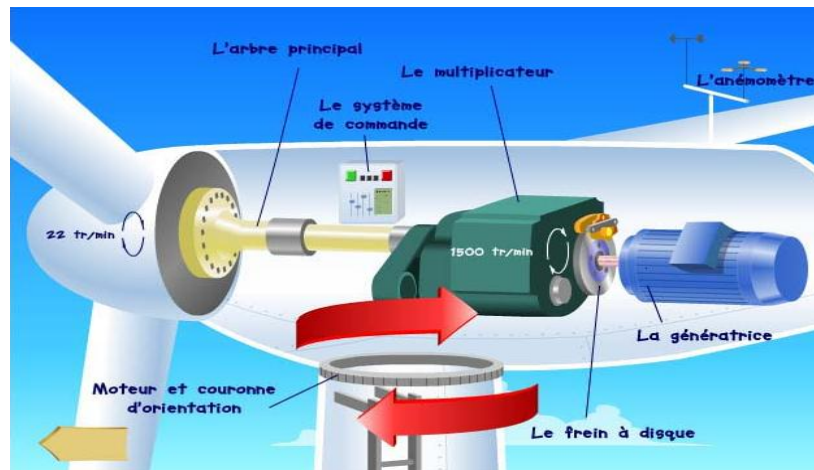


Figure 1.9 : Vue éclatée de la nacelle.

Elle comprend les éléments suivants :

- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de générateur électrique.
- **Le système de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir le générateur, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné.
- **Le système de commande** : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre** : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

I.4.3. Le rotor

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. [8]

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.5.1. Avantages de l'éolien

- C'est une énergie renouvelable, le vent est gratuit, à 100 % renouvelable.
- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas ni de gaz à effet de serre ni de

production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».

- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.
- Les principes techniques sont simples, malgré que leur mise en application technologique est relativement complexe et perfectionnée.
- Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment les donnent l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

1.5.2. Inconvénients de l'éolien

- L'énergie change suivant la météo, la nature stochastique du vent a une influence sur la quantité de la puissance électrique produite.
- Le bruit : c'est le multiplicateur qui génère le bruit, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel.

1.6. Turbo-éolienne

Une turbo-éolienne, ou éolienne à turbine, est un aérogénérateur en forme de turbine conçu pour créer une accélération du vent avant qu'il n'atteigne le rotor. Le ou les rotors sont généralement munis de pales ou d'ailettes. Le principe d'une turbo-éolienne est de faciliter l'intégration au bâtiment, avec un couplage multi-sources possible, tout en limitant les nuisances liées aux aérogénérateurs traditionnels. Elles sont ainsi plus petites que les éoliennes classiques, silencieuses et dotées d'un design élégant associé à une fonctionnalité aérodynamique. Il s'agit désormais d'une marque déposée, les turbo-éoliennes constituant une innovation technologique brevetée.



Figure 1.10 : Différents modèle Turbo-éolienne.

1.6.1. Fonctionnement d'une Turbo-éolienne

Une turbo-éolienne possède une forme de turbine qui permet une accélération du vent avant qu'il n'atteigne le rotor.

C'est le résultat du mariage entre une éolienne et une turbine. Une turbo-éolienne a la particularité d'être constituée d'une carène et de deux rotors contrarotatifs fonctionnant à vitesse variable et pilotés par un système électronique.

1.6.2. Composition des Turbo-éolienne

Cet aérogénérateur est constitué de trois éléments :

- Une carène aérodynamique, qui accélère le flux d'air interne en créant une dépression à l'arrière de la machine.
- Deux rotors contre-rotatifs contrôlés par un système électronique, qui optimisent la production d'énergie pour chaque vitesse de vent. Ces rotors sont munis de nombreuses pales, et il est possible d'ajouter une cage à l'avant afin de ne pas nuire aux oiseaux.
- Une turbo-éolienne peut être installée sur un mât, un toit ou une terrasse. Sa petite taille ne nécessite pas de permis de construire si le mât choisi est inférieur à 12 mètres.

1.6.3. Avantages d'une Turbo-éolienne

Une éolienne à turbine possède de nombreux avantages :

- Elle fonctionne en cas de vents faibles (moins de 3 m/s) et de vents très forts.
- Elle est trois à quatre fois plus petite qu'une éolienne traditionnelle de même puissance. Par exemple, un rotor de seulement 1 mètre de diamètre offre une puissance de 15 kW.
- Sa structure carénée permet d'éviter que les perturbations ne gênent le fonctionnement des éoliennes voisines, c'est pourquoi on peut placer plusieurs éoliennes à côté, à quelques mètres de distance, contrairement aux éoliennes tripales qui doivent être espacées de plusieurs dizaines de mètres.
- Elle possède un très bon rendement, et sa puissance maximale est atteinte plus vite qu'avec une éolienne classique à pales.
- Elle est silencieuse et discrète, son design est élégant.
- L'installation est simple et rapide, elle peut se faire sur une journée.

- Un système électronique permet une adaptation de la production d'électricité par les rotors en fonction de la vitesse instantanée du vent.

1.6.4. Coût d'une éolienne à turbine

La start-up grenobloise Elena Energie a lancé en 2010 une éolienne au design révolutionnaire : la turbo-éolienne, ou éolienne à turbine. Croisement d'une éolienne et d'une turbine, cet aérogénérateur offre un meilleur rendement que les éoliennes pour particuliers de même taille.

Deux types d'éoliennes Elena sont actuellement commercialisés : l'éolienne 3.15, d'une puissance de 1,5 kW, et l'éolienne 5.30, d'une puissance de 3,3 kW. La première permet de couvrir les besoins électriques d'une famille. Les prix varient selon le devis, mais le coût de l'Elena 3.15 se situe entre 24000 et 28000 € TTC.

De nombreux installateurs proposent les turbo-éoliennes Elena. Une carte des distributeurs proches de chez vous est disponible sur le site Internet d'Elena Energie.

1.7. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Nombreuses sont les machines électriques capables de jouer le rôle de générateur dans un système aérogénérateur. Dans cette étude, nous décrivons les principales caractéristiques technologiques liées aux aérogénérateurs. Les trois types de générateurs les plus utilisés dans l'industrie éolienne à vitesse variable sont les générateurs synchrones, les générateurs asynchrones et les GADA.

1.7.1. Machine synchrone (MS)

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien ont des puissances comprises entre 500 kW et 2 MW, et ils sont nettement plus chers que les générateurs à induction de mêmes dimensions. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. Dans une configuration à vitesse variable, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. La vitesse peut ainsi varier afin d'optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et d'amortir les fluctuations de couple dans le train de puissance [10, 11].

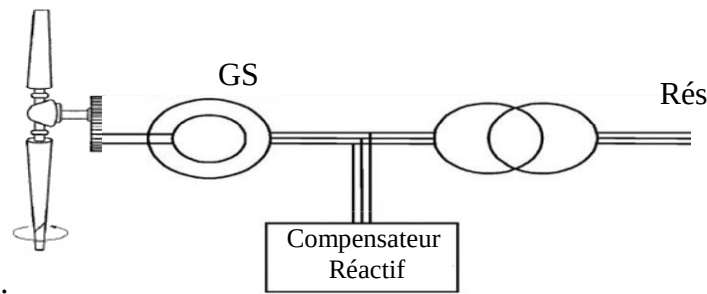


Figure I.11 : Éolienne basée sur la machine synchrone.

Le Tableau I.3 résume les principaux avantages et inconvénients des générateurs synchrones.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des générateurs synchrones.

Avantages	Inconvénients
-Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. -Absence de boîte de vitesse. -Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.	-Machine spécifique. -Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100 % de la puissance nominale. -Grand diamètre de la machine.

I.7.2. Machine asynchrone simple (MAS)

Le générateur asynchrone est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie du générateur ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de maintenir constante la tension du bus continu [6, 10].

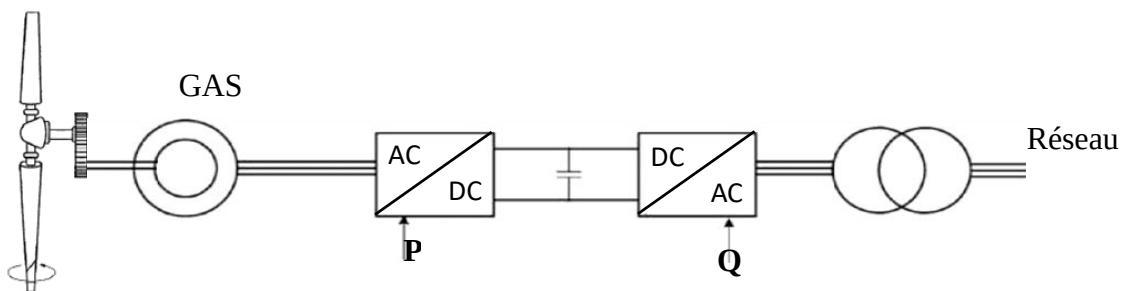


Figure I.12 : Éolienne à base de la machine asynchrone [10].

Le Tableau I.4 résume les principaux avantages et inconvénients des générateurs asynchrones.

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des générateurs asynchrones.

Avantages	Inconvénients
-----------	---------------

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	-Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100 % de la puissance nominale.
--	--

1.7.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est directement connecté au réseau. Le rotor, quant à lui, est relié au réseau via deux convertisseurs. Le premier convertisseur permet de transformer les tensions du réseau en une tension continue (bus DC) à fréquence et amplitude fixes. Le second convertisseur permet de convertir cette tension continue en trois tensions alternatives variables en fréquence, amplitude et phase. Ces deux convertisseurs ont la particularité de fonctionner dans les deux sens, c'est-à-dire que le transfert de puissance peut s'effectuer aussi bien du rotor vers le réseau (mode hyper-synchrone) que du réseau vers le rotor (mode hypo-synchrone) [12].

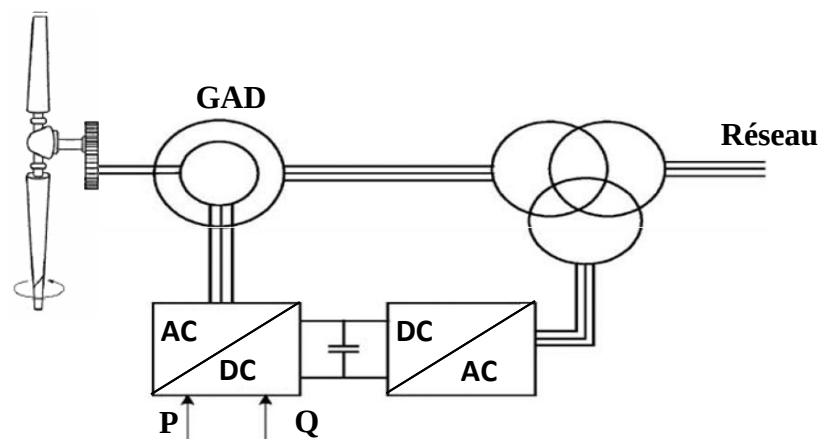


Figure I.13 : Éolienne utilisant la MADA.

Le Tableau I.5 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de ce générateur.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation

Avantages	Inconvénients
-Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. -Électronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale. -Fonctionnement à vitesse variable (± 30 % de la vitesse nominale).	-Maintenance du multiplicateur. -Commande complexe. -Oscillations mécaniques.

- **Mode de fonctionnement de MADA**

Le système MADA permet de transférer la totalité de la puissance générée P_m par l'éolienne à travers le stator et le rotor. En sachant que la puissance transitée par le rotor est plus faible que celle transitée par le stator, il est évident que l'avantage de la MADA réside dans le fait qu'à puissance identique, le dimensionnement des convertisseurs de puissance sera moindre (environ 1/3 de la puissance de la machine) que dans un système direct (générateur synchrone-convertisseurs - réseau).

Étant donné que le champ rotorique d'une MADA peut tourner dans les deux sens grâce à la commande du convertisseur, la machine asynchrone peut produire de l'énergie dans deux modes de fonctionnements différents :

- Hypo-synchrone ($g > 0$)
- Hyper-synchrone ($g < 0$)

La Figure (I.13) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, P_{res} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s la puissance transitant par le stator, P_r la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} la puissance mécanique.

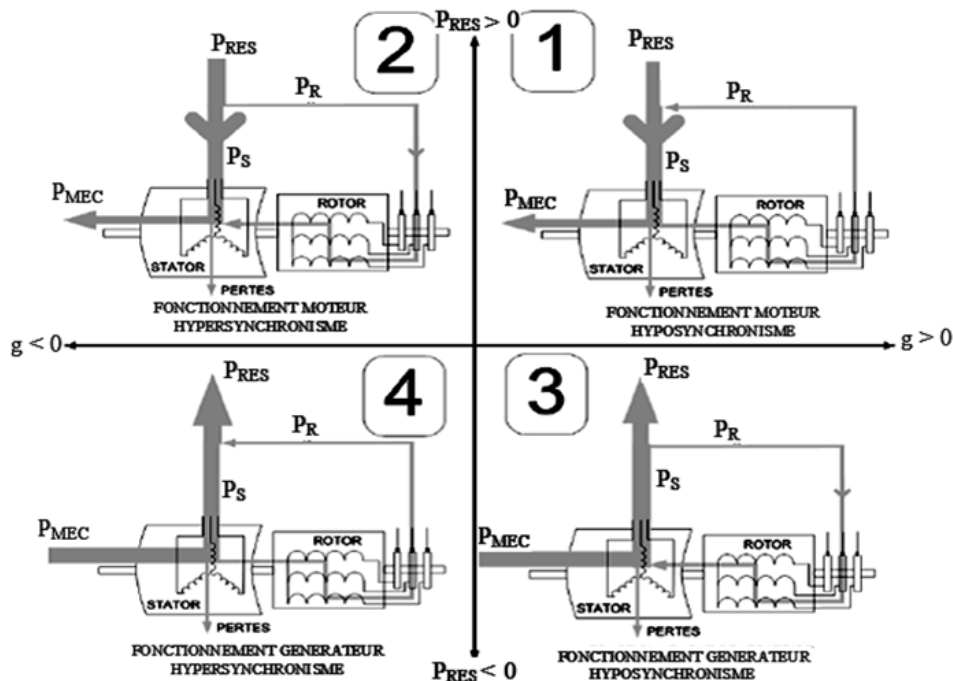


Figure I.14 : Différents modes de fonctionnement de la MADA.

- **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone**

La figure I.13 (1) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance

de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi, mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La figure I.13 (2) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone**

La figure I.13. (3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone**

La figure I.13. (4) montre que la puissance fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

I.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions clés pour comprendre la conversion de l'énergie éolienne, en abordant les types d'éoliennes et leurs fonctionnements, avec un focus sur la turbo-éolienne. Les principales machines électriques synchrone, asynchrone et asynchrone à double alimentation ont également été décrites, cette dernière représentant la troisième génération d'éoliennes.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du système éolienne-machine.

Chapitre 2

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction

L'éolienne utilise la turbine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette dernière est ensuite couplée à une génératrice électrique afin de produire de l'énergie électrique. Ce couplage mécanique peut être direct lorsque la turbine et la génératrice ont des vitesses comparables, ou réalisé via un multiplicateur dans le cas contraire. Plusieurs types de génératrices sont disponibles sur le marché éolien, notamment les génératrices à courant alternatif (synchrone et asynchrone) et les génératrices à courant continu.

Dans ce chapitre, nous décrirons les relations mécanique et électrique agissant sur l'éolienne et sa machine. Nous présenterons également la turbo-éolienne et l'éolienne classique, ainsi que leurs différentes configurations, qu'elles soient connectées ou isolées du réseau électrique.

II.2. Modélisation du convertisseur éolien

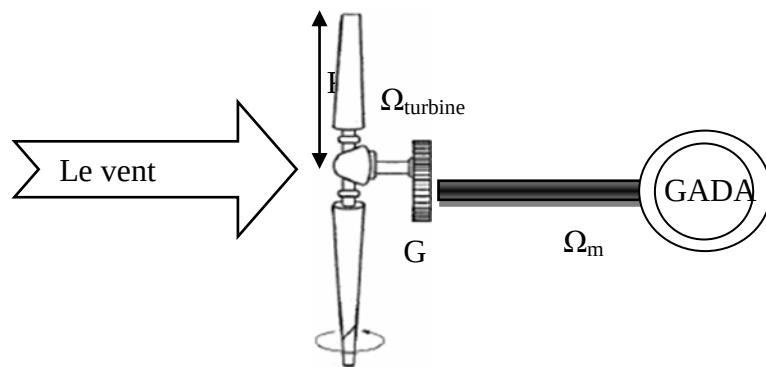


Figure II.1 : Schéma global du convertisseur éolien.

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande

II.2.1. Modèle du vent

Le vent est produit par le rayonnement solaire et la rotation de la Terre, qui génèrent des variations de température et de pression à la surface du globe, entraînant le déplacement des masses d'air.

Dans un système éolien, le vent constitue la principale variable d'entrée. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est complexe, mais il peut être représenté comme une grandeur stochastique caractérisée par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a fait l'objet de nombreuses études et ne sera donc pas détaillée ici. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire dépendant du temps et peut également être modélisée de manière déterministe comme la somme de plusieurs harmoniques [4]:

$$V(t) = A + \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i \omega_v t) \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

A est la vitesse moyenne du vent est constante.

a_i et b_i, ω_v sont respectivement l'amplitude, la pulsation de l'échantillon du vent.

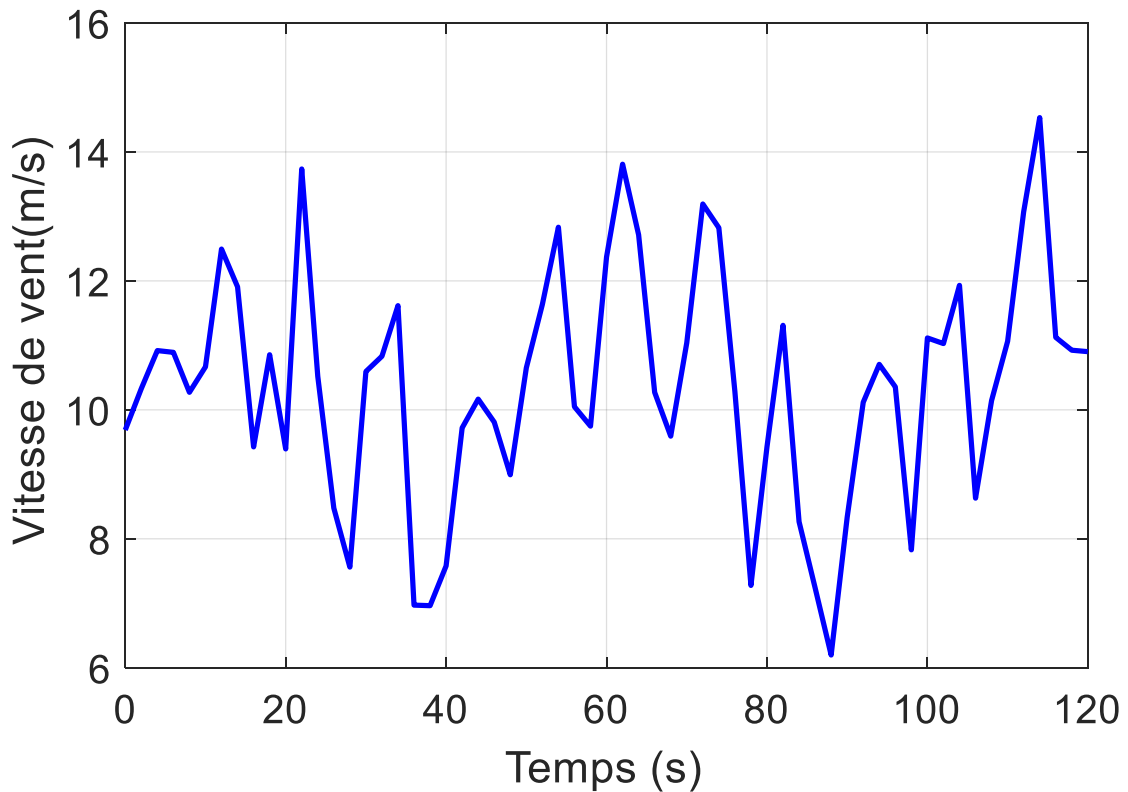


Figure II.2 : Profil de la vitesse du vent.

II.2.2. Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par le physicien allemand Albert Betz en 1919. A. Betz [15,16] suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 de surface s_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 de surface s_2 .

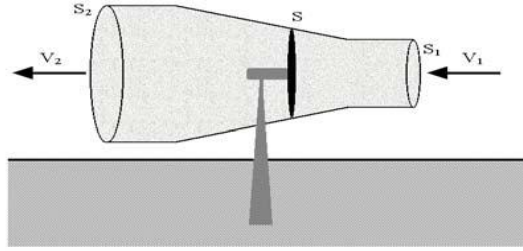


Figure II.3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

En appliquant la conservation de masse au cas de la figure II.3 :

$$s_1 V_1 = sV = s_2 V_2 \quad (\text{II.2})$$

La force de portance au rotor de la turbine d'après le théorème d'EULER est donnée par :

$$F = \rho s_1 V_1 - \rho s_2 V_2 \quad (\text{II.3})$$

Telle que ρ est la densité de l'air (1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).

En tenant compte de l'équation (II.3), nous aurons

$$F = \rho s V (V_1 - V_2) \quad (\text{II.4})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aéro} = FV = \rho s V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{II.5})$$

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.6})$$

On définit le facteur fractionnaire de diminution dans la vitesse du vent entre la position 1 et la position 0 par :

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (\text{II.7})$$

En tenant compte de l'équation (II.6), l'équation (II.4) devient :

$$F = \frac{1}{2} \rho s V_1^2 4a(1 - a) \quad (\text{II.8})$$

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

La puissance extraite du vent par le rotor est le produit de la portance et la vitesse du vent au plan du rotor V .

$$P_{aéro} = FV = \frac{1}{2} \rho s V_1^3 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.9})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P correspondante serait alors :

$$P = \frac{1}{2} \rho s V_1^3 \quad (\text{II.10})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$C_p = \frac{P}{P_{aéro}} = 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.11})$$

La valeur théorique maximale de C_p est donnée par la limite de Betz, elle est obtenue en dérivant l'équation (II.11) par rapport à a :

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant a dans l'équation (II.11) on trouve :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (\text{II.13})$$

C_p est appelé coefficient de puissance est sera détaillé par la suite de ce chapitre.

II.2.3. Carénage éoliennes *Difuser Augmented Wind Turbines (DAWT)*:

Bien que les études sur les gains de performance potentiels des turbo-éoliennes remontent aux années 1920, les essais approfondis de Gilbert et Foreman [17] dans les années 1970 ont montré que ces gains étaient liés au fait que le conduit réduit la pression derrière la turbine par rapport à une éolienne conventionnelle, permettant ainsi de faire passer davantage d'air. Ils ont suggéré que cette configuration pourrait atteindre une efficacité de performance $C_p = 1,57$, définie comme suit

$$C_{pT} = \frac{P}{P_{aéro}} = \frac{2PT}{\rho s V_1^3} \quad (\text{II.14})$$

où S c'est la surface du rotor.

Le C_p maximal d'un rotor ouvert sans conduite est de 0,593, communément appelé la limite de Betz. Cela conduit à la définition d'un "ratio d'augmentation" de $r = 2,65$ où

$$r = \frac{C_{pT}}{C_{p \text{ betz}}} \quad (\text{II.15})$$

La figure II.4 montre les tubes de courant d'air autour d'une éolienne et une Turbo-éolienne.

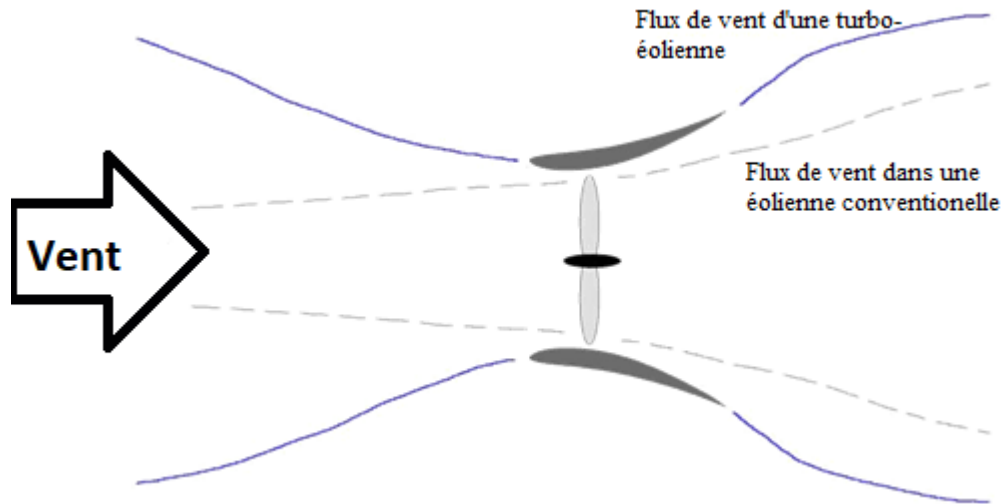


Figure II.4 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne et une éolienne carénée.

Hansen [18] a suggéré que c'est la portance générée par l'enveloppe, comme l'a montré de Vries [19], qui induit une augmentation du débit massique à travers le rotor, entraînant une augmentation de la vitesse de rotation et du coefficient de puissance proportionnel au débit. Bien que l'on puisse penser que cette augmentation du débit et de la vitesse permettrait à un DWT de dépasser la limite de Betz, cela est incorrect, car le flux capture un tube d'écoulement beaucoup plus large, et les hypothèses appliquées à un rotor ouvert ne sont pas directement transposables. Malheureusement, les affirmations des inventeurs selon lesquelles ils avaient "battu Betz" ont contribué à donner une mauvaise réputation aux turbo-éoliennes DWT.

De nombreuses études ont examiné la faisabilité et les facteurs d'augmentation observés dans les DWT afin de soutenir leur développement [20-30], mais les conclusions ont été très variables. Werle et Presz [31], en utilisant les principes fondamentaux de la dynamique, ont conclu que le facteur d'augmentation possible ne pouvait approcher que 2 et que les études précédentes reposaient sur des hypothèses incorrectes, conduisant à des prédictions trop optimistes. Les résultats de la CFD visqueuse de Hansen [18] ont prédit des valeurs idéales de C_p proches de 0,94, avec un facteur d'augmentation de 1,6. Il a également indiqué que si la géométrie du conduit permettait de maintenir le flux attaché, le facteur d'augmentation pourrait être encore amélioré.

Un article de synthèse de van Bussel [29] corrobore ces conclusions, indiquant que l'augmentation du débit massique et, par conséquent, du facteur d'augmentation, est proportionnelle au rapport entre la surface du diffuseur et la surface du rotor. Il conclut que la quantité d'énergie extraite par unité de volume d'air avec un DWT reste la même que pour un rotor nu, mais que, comme le volume d'air est plus important, l'énergie totale extraite

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

augmente. Il note également que des valeurs de C_p supérieures à 1, correspondant à des facteurs d'augmentation d'environ 2, sont réalisables avec des rapports diffuseur/surface d'entrée d'environ 2,5.

En complément des données expérimentales, van Bussel [29] a rapporté que la réduction de la contre-pression pouvait également améliorer les performances. Cette augmentation potentielle de la production d'énergie a continué à stimuler la recherche sur les DWT. Cependant, aucune conception commerciale n'a réussi à atteindre ces facteurs d'augmentation, et aucun DWT commercialement viable n'a été développé. Un exemple typique de cet échec est la Vortec 7 de Nouvelle-Zélande (figure II.5a) [32].



Figure II.5 : Tentatives commerciales de grandes turbines carénées a) Vortec 7 b) Ogin (FloDesign).

Un exemple plus récent est la disparition de la société Ogin [33], illustrée à la figure II.5b. Parmi les résultats expérimentaux sur le terrain les plus prometteurs, ceux d'Ohya [25] à l'Université de Kyushu au Japon se distinguent, portant sur des turbines canalisées avec un bord de fuite. Des mesures ont été effectuées sur plusieurs unités de 500 W, 3 kW, 5 kW et 100 kW, avec des coefficients de puissance C_p approchant 1,0. Il a également été observé qu'aucune augmentation notable du niveau de bruit généré par l'éolienne en fonctionnement n'était constatée.

Des résultats récents issus d'une stratégie de conception synergique, combinant la géométrie du conduit et la conception du rotor à l'Université de Clarkson, ont mis en évidence deux aspects clés de la conception. Premièrement, la présence du conduit modifie la vitesse axiale au niveau du rotor, passant d'une distribution nominale uniforme à une distribution présentant une variation radiale, comme le montre la figure II.6 [34].

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

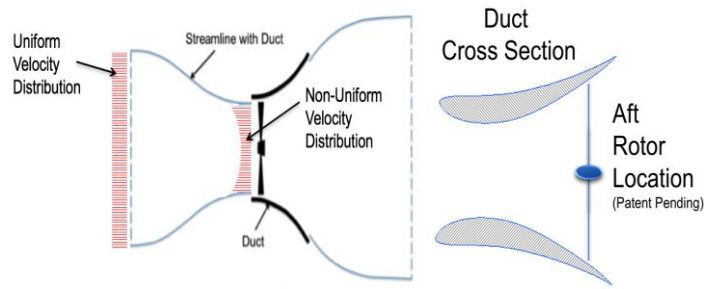


Figure II.6 : Conception de la turbo-éolienne d'Université de Clarkson.

Deuxièmement, le déplacement du rotor vers un emplacement situé à l'arrière du col, comme illustré à la figure II.6, permet d'augmenter la puissance de sortie pour une géométrie de conduit donnée [35, 36]. La plupart des conceptions de rotor cherchent à exploiter la vitesse élevée au niveau du col du conduit. Cependant, la présence du rotor modifie la vitesse à son emplacement, et il est possible d'extraire davantage de puissance pour un conduit donné en déplaçant le rotor vers l'arrière. La conception optimale des pales du rotor diffère de celle requise pour un rotor ouvert, tant en termes de forme en plan que de torsion, en raison de la géométrie spécifique du conduit.

Venters et al. [35, 36] ont également indiqué que les valeurs de C_p calculées sur la surface de sortie du conduit, pouvaient dépasser 0,593, ce qui suggère qu'un dispositif d'extraction d'énergie éolienne pourrait être plus efficace qu'une turbine de même diamètre.

Les résultats de l'Université de Clarkson comparent les performances des deux éoliennes présentées à la figure II.7



Figure II.7 : Banc de test Clarkson et Bergey Excel 1.

La figure II.8 représente la puissance extraite en fonction de la vitesse de vent et la figure II.9 représente le coefficient de puissance associé. La limite de Betz est présentée par le trait noir continu, la puissance cinétique du vent est présentée par le trait noir discontinu, les performances de l'éolienne (Bergey excel) sont présentées par des triangles noirs, et les différentes configurations de la Turbo-éolienne sont présentées par les cercles et carrés blancs. En rouge et en mauve, c'est ses performances sans l'enveloppe métallique.

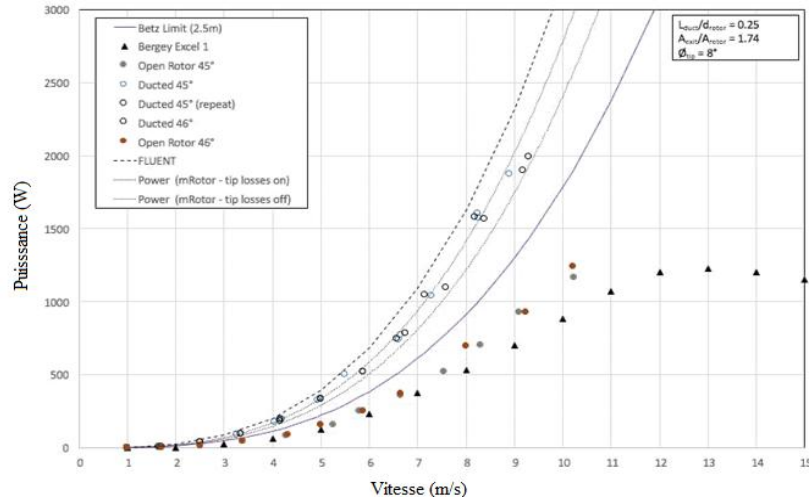


Figure II.8 : Puissance générée en fonction du vent.

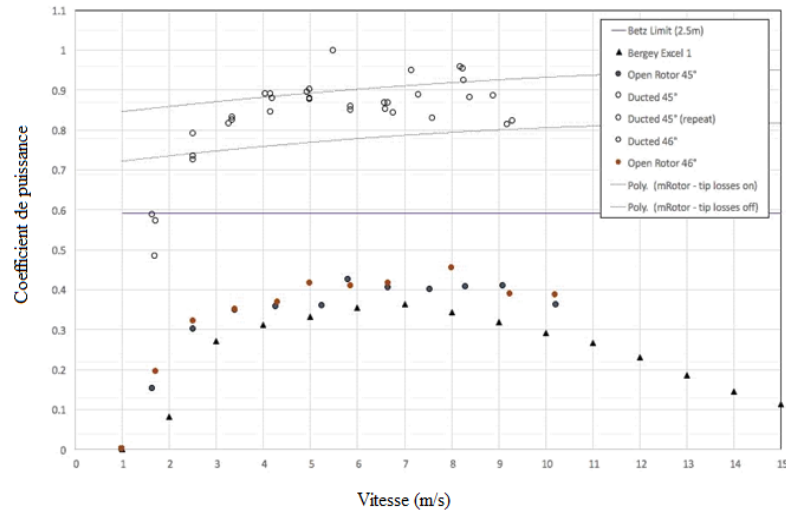


Figure II.9 : Coefficient de puissance en fonction du vent.

A partir des deux figures, on voit que pratiquement la turbo-éolienne est capable de dépasser la limite de Betz. L'augmentation du rendement apporté par le carénage des turbines doit être comparée au coût de fabrication supplémentaire, et là souvent, avec la matière ajoutée on pourrait augmenter le diamètre de l'hélice et la puissance globale du système.

II.2.4. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

II.2.4.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [37] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho s V^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.16})$$

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active s de l'éolienne est donnée par la relation suivante [38] :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s V^3 \quad (\text{II.17})$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent : [5,38].

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{II.18})$$

Où : Ω_t est la vitesse de la turbine.

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 7,5 kW pour notre étude. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m et le gain de multiplicateur de 8.

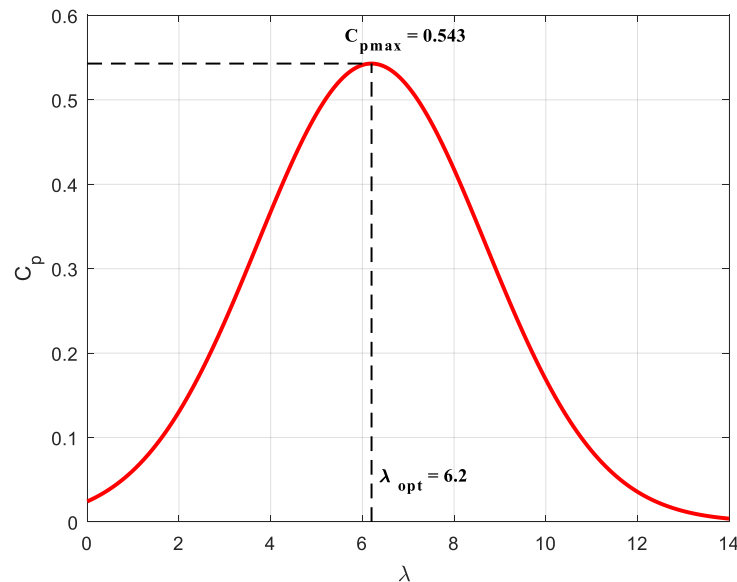


Figure II.10 : Évolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ .

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine par une approximation gaussienne suivante [39]:

$$C_p(\lambda) = a * \exp(-((x - b)/c)^2) \quad (\text{II.19})$$

avec : $a = 0.553$ (0.5483, 0.5577),
 $b = 6.224$ (6.198, 6.25), $c = 3.558$ (3.517, 3.599)

Ainsi, comme il est illustré dans la figure (II.10), le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.553$) est atteint pour une valeur de la vitesse relative $\lambda = 6.2$. Avec cette valeur, la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail, une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [1].

Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par [4]:

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2\Omega_{turbine}} C_p \rho S V^3 \quad (II.20)$$

II.2.4.2. Modèle du multiplicateur

Pour la modélisation du multiplicateur, nous avons supposé que l'élasticité et le frottement du multiplicateur ont été négligés ainsi que les pertes énergétiques [15].

Ce qui nous permet d'obtenir les relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.21)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.22)$$

Où

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice. G : est le gain du multiplicateur.

II.2.4.3. Équation mécanique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprends la masse des pales et la masse du rotor de la turbine [14].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (II.23)$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g .

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \quad (II.24)$$

$$C_{mec} = C_g + C_{em} - C_{vis} \quad (II.25)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f .

$$C_{vis} = f_r \Omega \quad (II.26)$$

En remplaçant (II.26) et (II.25) dans (II.24), nous aurons :

$$C_g + C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (II.27)$$

II.3. Modélisation de la MADA

II.3.1. Présentation de la MADA

La première apparition de cette machine remonte à 1899. Il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures. Son stator est analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Quant au rotor, il ne s'agit plus d'une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais de trois bobinages connectés en étoile, dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [140]. La figure II.11 illustre la structure de cette machine asynchrone à double alimentation.

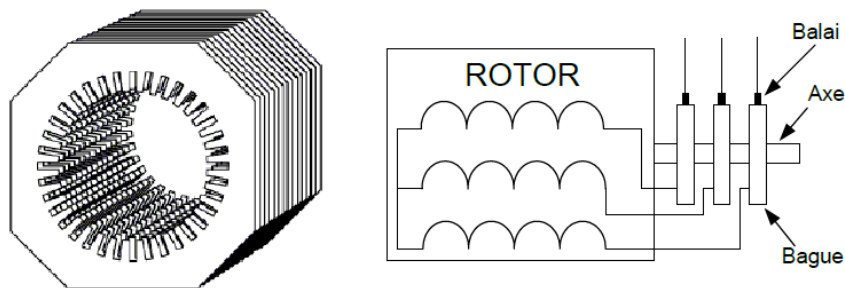


Figure II.11 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

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

$$\omega_s g = \omega_s - \omega \quad (II.28)$$

où : g est le glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme ω_s , les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [41,42].

II.3.3. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA)

II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [40-48] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La force magnétomotrice est à une répartition spatiale sinusoïdale.
- La machine est à une construction symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

II.3.3.2. Modèle de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

Les phases sont désignées par S_a, S_b, S_c pour le stator et R_a, R_b, R_c pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques. Elle peut être schématisée par la figure (II.12).

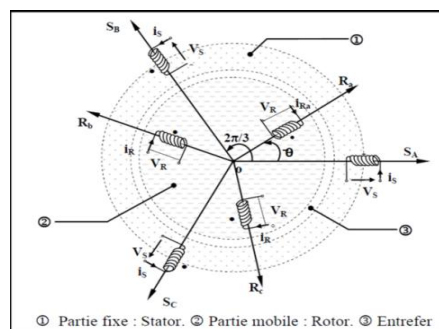


Figure II.12 : Représentation spatiale des enroulements de la MADA.

a. Équations électriques de la MADA

Les enroulements illustrés par la figure (II.12) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_{sabc}][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_{rabc}][I_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Ou

R_s et R_r sont respectivement les résistances statoriques et rotoriques.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$[V_s] = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$: Le vecteur des tensions statoriques

$[I_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$: Le vecteur des courants statoriques

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$[V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T$: Le vecteur des tensions rotoriques

$[I_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$: Le vecteur des courants rotoriques

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (\text{II.30})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \quad (\text{II.31})$$

L_{ss} est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

L_{rr} est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Et M_{sr} est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par [12]:

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

l_s (l_r) C'est l'inductance propre d'une phase statorique (rotorique).

M_s (M_r) C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotorique).

M_{sr} C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations (II.15) (II.16) dans l'équation (II.14) respectivement, on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s[I_{sabc}] + L_{ss} \frac{d}{dt}(I_{sabc}) + \frac{d}{dt}(M_{sr}I_{rabc}) \\ [V_r] = R_r[I_{rabc}] + L_{rr} \frac{d}{dt}(I_{rabc}) + \frac{d}{dt}(M_{rs}I_{sabc}) \end{cases} \quad (II.35)$$

b. Équations mathématiques de la MADA dans le repère (dq)

Pour passer du système triphasé abc , au système biphasé (dq) , (et réciproquement) il faut utiliser la transformation de Park. La transformation de Park constitue d'une transformation triphasée - biphasée, suivi d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha \beta)$ (transforme de Concordia), puis vers le repère (dq) . Le repère (ab) est fixe par rapport au repère (abc) , par contre le repère (dq) est mobile il forme avec le repère fixe (ab) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [18], comme il est montré dans la figure II.13.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P_\theta] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (II.36)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P_\theta]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

Où

$x_a x_b x_c$ Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

$x_d x_q$ Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées. x_h La composante homopolaire.

$[P_\theta]$ La matrice de la transformation de Park, et $[P_\theta]^{-1}$ La matrice inverse de Park.

θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé θ_s pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques).

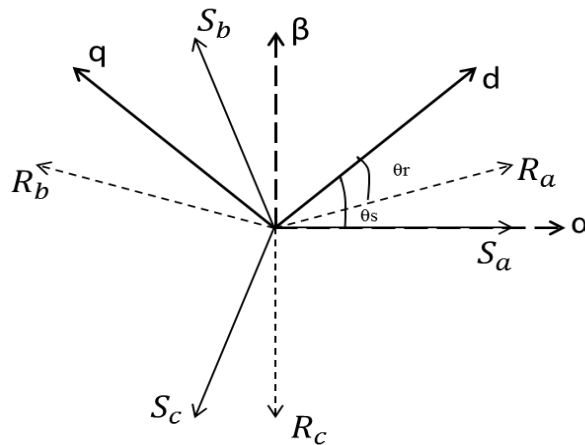


Figure II.13 : Différents systèmes axe utilisés.

La matrice de Park est donnée par :

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

$$[P_\theta] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Les équations électriques de la MADA sont écrites dans le repère (dq).

- Tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la pulsation électrique statorique, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$ est la pulsation électrique rotorique.

- Flux statorique et rotorique

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

- Équation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega \quad (\text{II.42})$$

avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.43})$$

À noter qu'en convention générateur le couple résistant C_r sera remplacé par le couple moteur C_g (issu du multiplicateur dans un système éolien) précédé d'un signe (+) dans l'équation (II.27) et le couple électromagnétique C_{em} sera précédé d'un signe (-).

Ainsi, le fonctionnement de la génératrice est régi par un système d'équations. La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile. Ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé.

II.4. MADA connecté au réseau

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park. En choisissant le vecteur d'état $X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega_r)^T$ et les grandeurs v_{dr} et v_{qr} comme entrées de commande.

En considérant un réseau stable et négligeant la résistance du stator, et la simplification ($\Phi_{ds} = \Phi_s$, $\Phi_{ds} = 0$) alors la relation entre les courants du stator et les courants du rotor peut être donnée par :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\Phi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

On obtient le modèle sous forme de représentation d'état par remplacement de (II.44) dans (II-39 – II.42) :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta \omega \Phi_{qs} - \beta v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \Phi_{qs} + \beta \omega \Phi_{ds} - \beta v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_{em}}{J} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \Omega \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Par ailleurs, les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par [18] :

Puissances statoriques :

$$\begin{cases} P_s = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Puissances rotoriques :

$$\begin{cases} P_r = (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

$i_{ds} i_{qs}$ ($i_{dr} i_{qr}$) Les courants statoriques (rotoriques).

$v_{ds} v_{qs}$ ($v_{dr} v_{qr}$) Les tensions statoriques (rotoriques).

$\Phi_{ds} \Phi_{qr}$ Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

p Nombre de paires de pôles de la machine.

Ω Vitesse de rotation de la machine.

où $\omega = p\Omega$ est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor, et :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}, \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right), \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s} \text{ et } \gamma_r = \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right)$$

Ce qui nous intéresse dans ce travail c'est une machine connecté au réseau. Cette configuration nous permet d'injecter la puissance extraite de vent dans le réseau électrique, le

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

mode isolé est présenter par la suite afin de nous permettre de synchroniser la machine avec le réseau électrique.

II.5 MADA autonome (MADA isolé du réseau)

Contrairement au mode connecté au réseau de puissance infinie, qui impose une tension et une fréquence fixes, le mode autonome subit une fluctuation de ces grandeurs due à la variation stochastique de la vitesse du vent et de la fluctuation des demandes de la charge.

II.5.1 Modélisation de la charge inductive

Les équations relient les courants statorique avec les tensions statorique avec une charge inductive comme il est montré dans la figure II.14 peuvent être exprimé par la loi de Kirchhoff :

$$[V_{sabc}] = R_s[I_{sabc}] + L_s \frac{d}{dt}[I_{sabc}] \quad (\text{II.48})$$

Dans un repère triphasé équilibré on peut les reformuler par :

$$[V_{sabc}] = \bar{V}_s e^{-j\theta_s} \quad (\text{II.49})$$

$$[I_{sabc}] = \bar{I}_s e^{-j\theta_s} \quad (\text{II.50})$$

$$\frac{d}{dt}[I_{sabc}] = \bar{I}_s \frac{d}{dt} e^{-j\theta_s} + \frac{d}{dt} \bar{I}_s e^{-j\theta_s} \quad (\text{II.51})$$

Avec $e^{-j\theta_s} = e^{-j(\theta + [0, -\frac{2\pi}{3}, -\frac{4\pi}{3}])}$ pour avoir les trois phases équilibrées, remplacent dans l'équation on trouve :

$$\bar{V}_s e^{-j\theta_s} = \bar{R} \bar{I}_s e^{-j\theta_s} - j\omega_s L \bar{I}_s e^{-j\theta_s} + L \frac{d}{dt} \bar{I}_s e^{-j\theta_s} \quad (\text{II.52})$$

Divison par $e^{-j\theta_s}$, les nouvelles équations relient les courants statorique avec les tension statorique devient :

$$\bar{V}_s = \bar{R} \bar{I}_s - j\omega_s L \bar{I}_s + \frac{d}{dt} L \bar{I}_s \quad (\text{II.53})$$

D'où on trouve

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L \frac{d}{dt} i_{ds} - L \omega_s i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L \frac{d}{dt} i_{qs} + L \omega_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

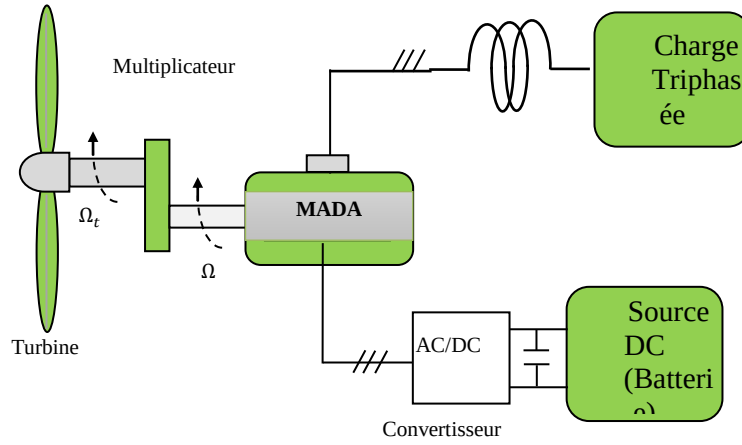


Figure II.14 : Eolienne basée sur une MADA autonome avec une charge inductive.

La machine MADA connectée à la charge inductive comme le montre la figure II.14 est équivalente à une source de courant triphasée, de plus, la charge est également une source de courant, ce qui pose des problèmes lorsqu'on essaie de trouver un modèle sous forme d'état pour contrôler les tensions statorique. Dans ce travail, pour définir un point de régulation, des condensateurs triphasés équilibrés sont associés au stator du MADA en parallèle comme le montre la figure II.15.

II.5.2 Modélisation de la charge capacitive

Les équations relient les courants statorique avec les tensions statorique avec une charge inductive comme il est montré dans la figure II.15 peuvent être exprimé par la loi de Kirchhoff :

$$d[V_{sabc}] = \frac{1}{c} ([I_{sabc}] - \frac{V_{sabc}}{R}) \quad (II.55)$$

Dans un repère triphasé équilibré on peut les reformuler

$$[V_{sabc}] = \bar{V}_s e^{-j\theta_s} \quad (II.56)$$

$$[I_{sabc}] = \bar{I}_s e^{-j\theta_s} \quad (II.57)$$

$$\frac{d}{dt} [V_{sabc}] = \bar{V}_s \frac{d}{dt} e^{-j\theta_s} + \frac{d}{dt} \bar{V}_s e^{-j\theta_s} \quad (II.58)$$

Remplacent dans l'équation II.55 on trouve

$$J\omega_s \bar{V}_s e^{-j\theta_s} + \frac{d}{dt} \bar{V}_s e^{-j\theta_s} = \frac{1}{c} (\bar{I}_s e^{-j\theta_s} - \frac{1}{R} \bar{V}_s e^{-j\theta_s}) \quad (II.59)$$

Divison par $e^{-j\theta_s}$, et gardons le terme $\frac{d}{dt} \bar{V}_s$ sur la gauche on trouve :

$$\frac{d}{dt} \bar{V}_s = \frac{1}{c} (\bar{I}_s - \frac{1}{R} \bar{V}_s) - J\omega_s \bar{V}_s \quad (II.60)$$

D'où on trouve

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{1}{c} (i_{ds} - \frac{v_{ds}}{R}) + \omega_s v_{qs} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} = \frac{1}{c} (i_{qs} - \frac{v_{qs}}{R}) - \omega_s v_{ds} \end{cases} \quad (II.61)$$

Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

Remarque : Ici il faut bien choisir la valeur de la capacité afin d'éviter la fréquence de coupure de la machine.

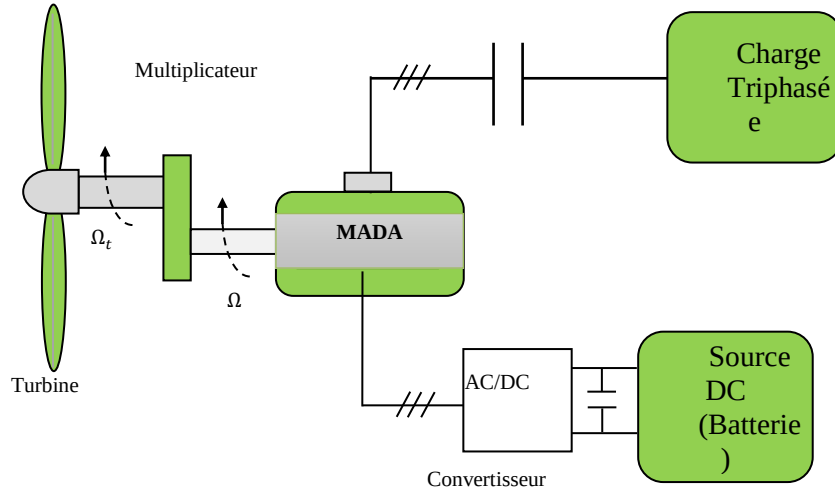


Figure II.15 : Eolienne basée sur une MADA autonome avec une charge inductive.

II.5.3 Modèle de la MADA sous forme d'état

En considérant un réseau stable, en plus négligeant la résistance du stator, alors la relation entre les courants du stator et les courants du rotor peut être donnée par :

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{1}{C} \left(-\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{v_{ds}}{R} \right) + \omega_s v_{qs} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} = \frac{1}{C} \left(-\frac{M}{L_s} i_{qr} - \frac{v_{qs}}{R} \right) - \omega_s v_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park. En choisissant le vecteur d'état $X = (v_{ds}, v_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega_r)^T$ et les grandeurs v_{dr} et v_{qr} comme entrées de commande, on obtient le modèle sous forme de représentation d'état :

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{\phi_s}{L_s} - \frac{v_{ds}}{R} \right) + \omega_s v_{qs} - \frac{M}{C L_s} i_{dr} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + L_r \omega_r \sigma_r i_{qr} + \frac{v_{dr}}{L_r \sigma_r} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} = \frac{1}{C} \left(-\frac{v_{qs}}{R} \right) - \omega_s v_{ds} - \frac{M}{C L_s} i_{qr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} + L_r \omega_r \sigma_r i_{dr} - \frac{M}{L_r} \omega_r \phi_{ds} + \frac{v_{qr}}{L_r \sigma_r} \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

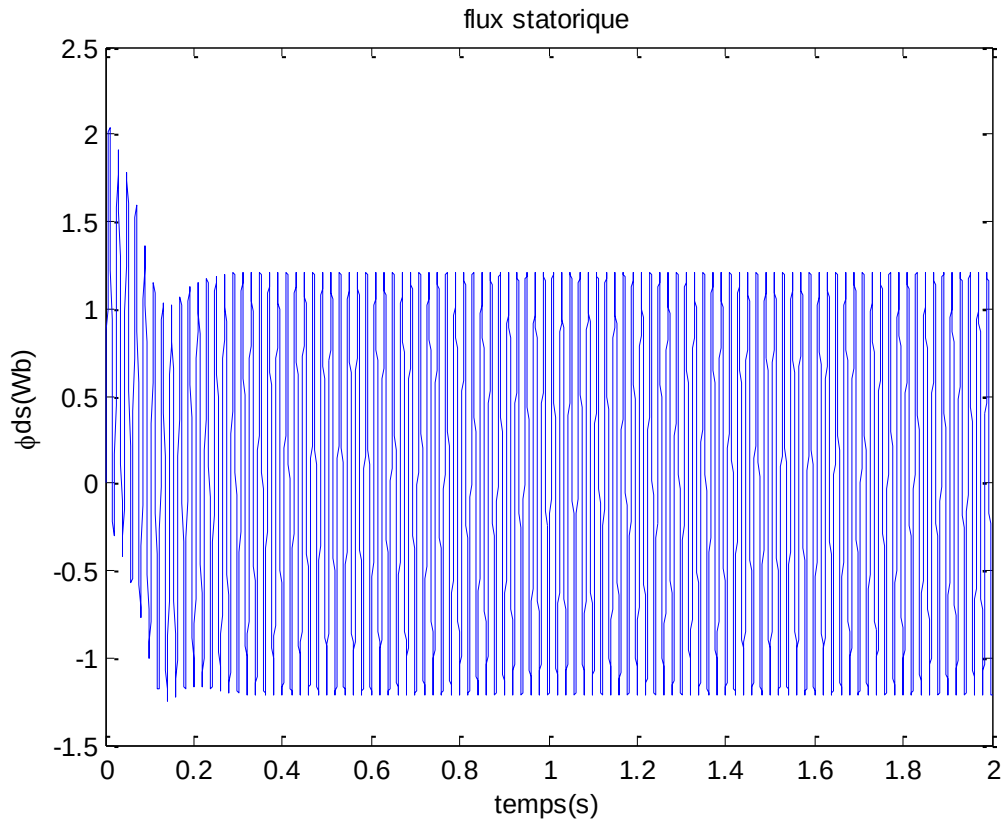
II.6 Simulation en boucle ouverte

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de la MADA en boucle ouverte, dont on la considère comme moteur, le stator étant directement connecté au réseau, tandis que, le rotor est alimenté par une source de tension à amplitude et fréquence variables.

II.6.1 Mode simple alimentation

Dans ce cas le rotor est court-circuité, donc la machine fonctionne en mode asynchrone simple (MAS).

Lors du démarrage à vide (Figure II.16), on constate un fort appel de courant qui peut atteindre cinq fois le courant nominal de la machine, en pratique, ce fait peut être la cause de destruction de la machine par un sur-échauffement en cas de répétitions excessives. Pendant le régime transitoire, le couple électromagnétique est fortement pulsatoire et peut atteindre 5 fois sa valeur nominale, c'est pourquoi en pratique, il faut toujours prévoir quelques mesures de démarrage.



Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

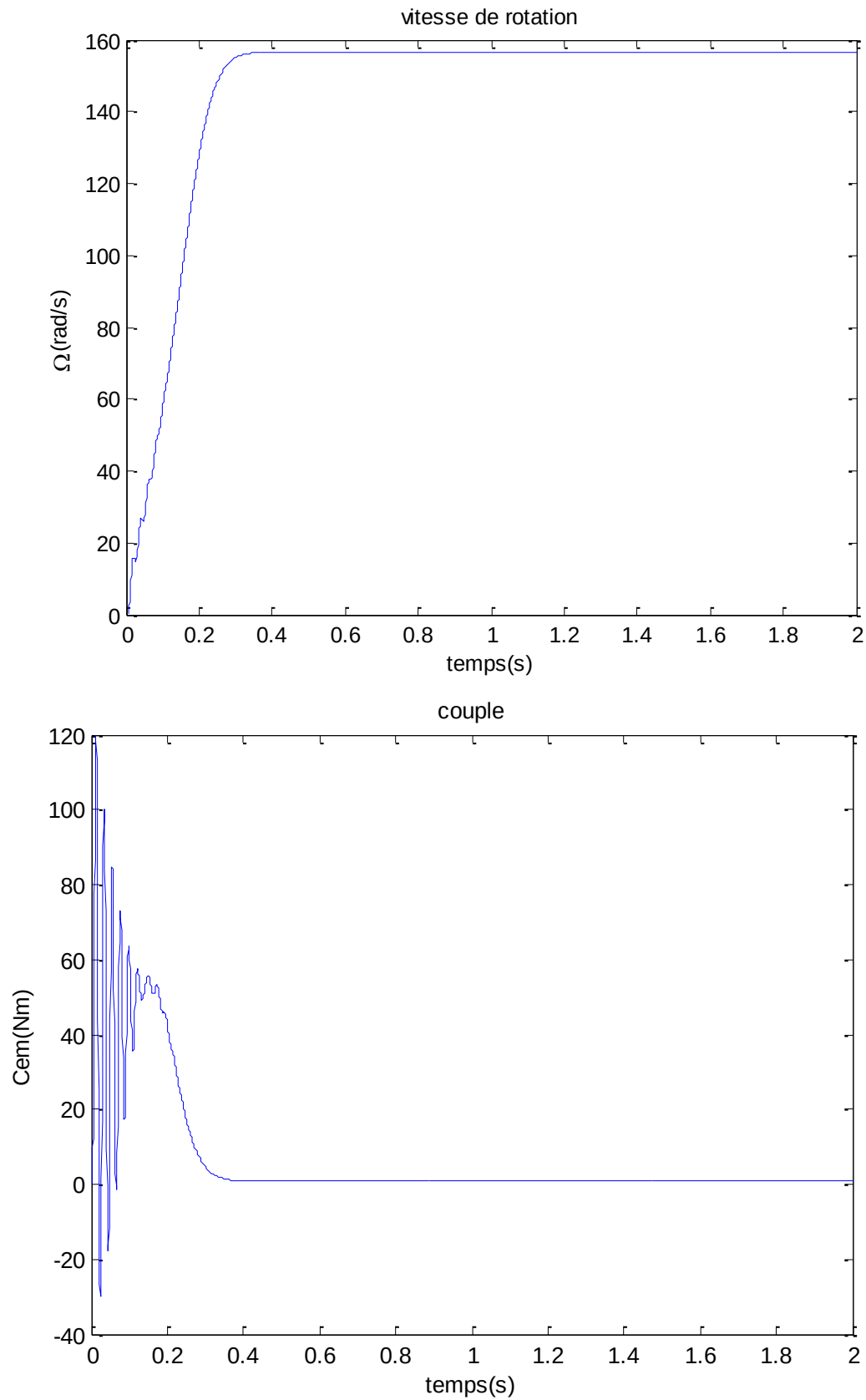


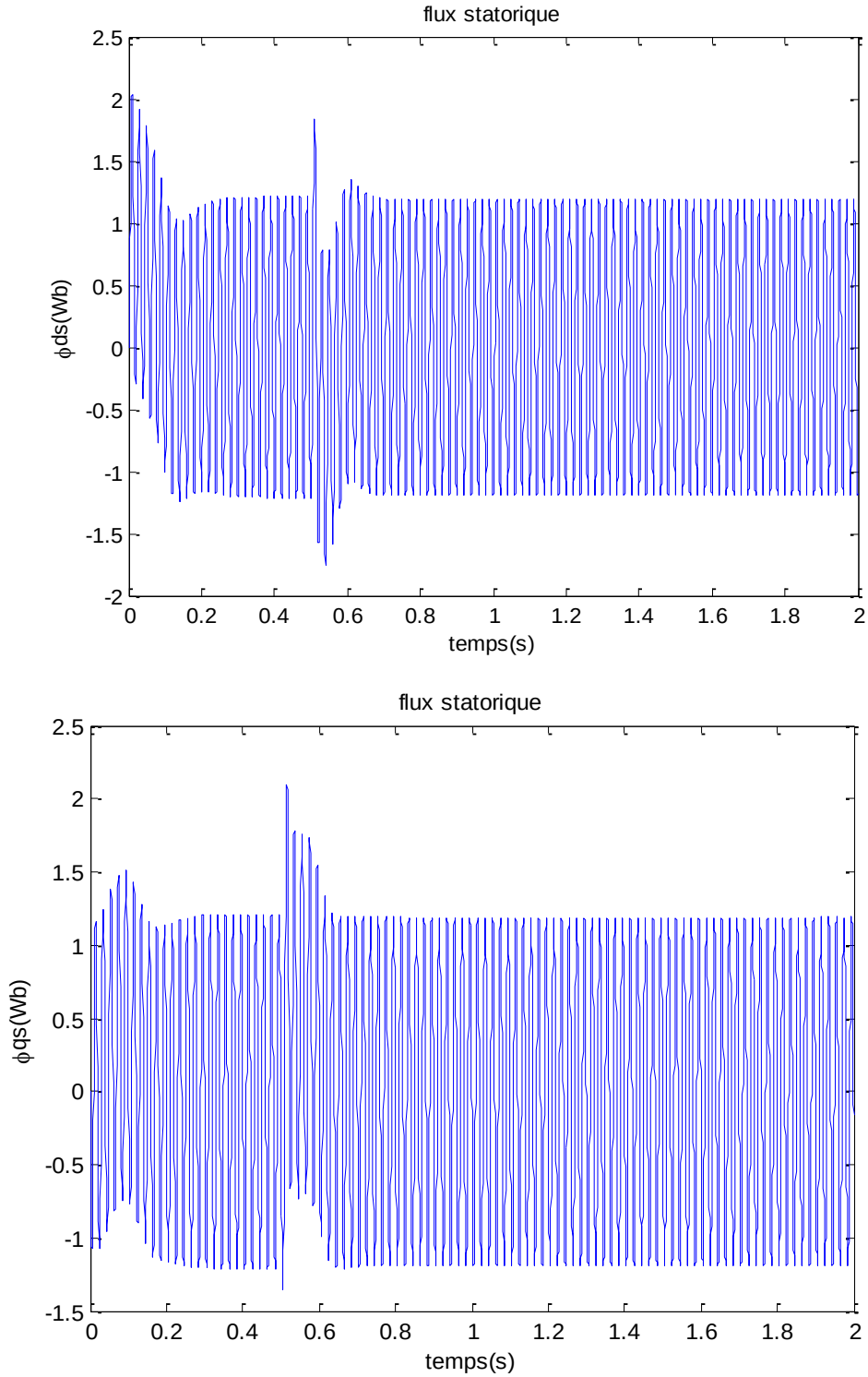
Figure II.16 : Réponses de la machine en mode simple alimentation (MAS) à vide.

En régime établi, le courant prend sa valeur nominale, le couple électromagnétique tend vers

Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

une valeur qui compense les frottements. Quant à la vitesse de rotation, elle se stabilise à sa valeur nominale qui est égale à 157 rad/s.

II.6.2 Mode double alimentation (MADA)



Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

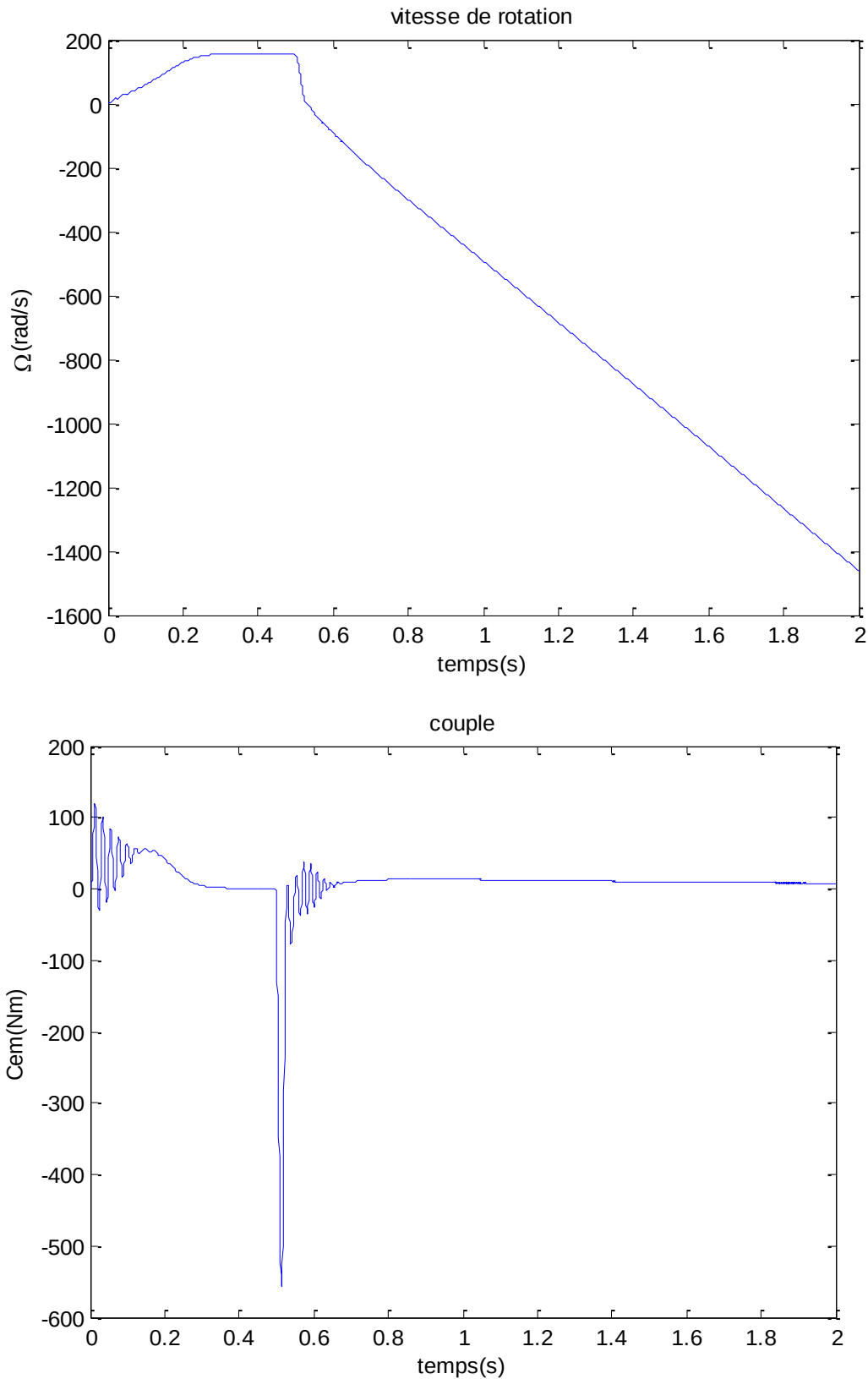


Figure II.17 : Réponses de la MADA avec tension de rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m.

Dans ce cas, le rotor est alimenté avec une tension à amplitude et fréquence variables. Malgré que ce test soit invalide car la fréquence du rotor doit être 30% de la fréquence et

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

l'amplitude de stator. Mais ces résultats de simulation (Figure II.16) et (Figure II.17) montrent le caractère peu-stable de la MADA en boucle ouverte. Pour affirmer cette conclusion nous allons étudier la stabilité dans le plan des pôles zéros de notre machine.

Linéarisons le modèle présenté par l'équation II.45 autour d'une vitesse de rotation de 120 rad/s on obtient un système des fonctions de transfert multi-modèle, les entrées seront les tensions statorique et rotoriques et les sorties seront le flux et la vitesse de la machine. Dans la figure II.18 et le tableau II.1 on présente les pôles et les zéros de sa fonction de transfert. Les paramètres de la machine étudiée sont présentés dans l'annexe 3.

Les pôles sont représentés par des croix (X) bleues et les zéros par des cercles (o) bleus.

Remarquons que la MADA est un système dans la limite de stabilité, car il a des pôles négatifs proches de l'axe imaginaire.

Tableau II.1 : Pôles et zéros de la MADA.

Pôles de la MADA	Zéros de la MADA
313.614510154672 + 0i	313.614510154672 + 0i
-5.44811299306534 + 314.04037811642i	-5.44811299306708 + 314.040378116419i
-5.44811299306534 - 314.04037811642i	-5.44811299306708 - 314.040378116419i
0.174085357105015 + 0i	0.174085357104999 + 0i
-0.00673 + 0i	
-5.44811299306497 + 314.04037811642i	
-5.44811299306497 - 314.04037811642i	

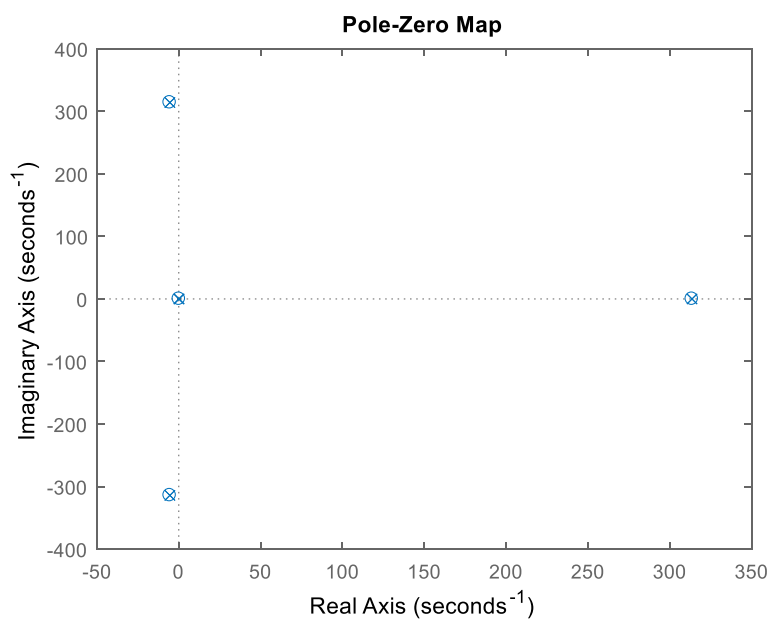


Figure II.18 : représentation graphique des pôles et zéros de la MADA.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux composantes principales du système de conversion éolienne : la partie mécanique, comprenant la turbine ou la turbo-éolienne, le multiplicateur et l'arbre de la MADA, et la partie électromécanique, représentée par la MADA. Nous avons mis en évidence les avantages de la turbo-éolienne ainsi que le principe de son augmentation du coefficient de puissance.

Le modèle mathématique de la MADA, établi sous certaines hypothèses simplificatrices, se révèle être un système d'équations différentielles à coefficients variables, simplifié grâce à la transformation de Park. Les simulations en boucle ouverte ont montré que le système peut présenter un comportement proche de l'instabilité, soulignant ainsi la nécessité d'une commande en boucle fermée, qui constitue l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Commande linéaire de
l'aérogénérateur à base
de GADA

Chapitre III

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

III.1.Introduction

Ce chapitre présente une stratégie de commande d'éolienne basée sur la MADA. Cette stratégie prend en compte la synchronisation de la machine avec le réseau électrique, puis la commande de la puissance lorsque la machine est connectée au réseau avec succès. L'objectif principal est d'extraire la puissance maximale du vent tout en fournissant de l'électricité avec un facteur de puissance unitaire.

Un schéma de commande linéaire pour l'aérogénérateur est présenté. Le système à commander possède une seule entrée contrôlable : le couple électromagnétique de la génératrice, le vent étant une entrée non contrôlable. Le principe de ce schéma repose sur le contrôle du couple électromagnétique de la MADA à travers les tensions rotoriques.

Une commande appropriée d'une machine à courant alternatif à vitesse variable permet un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques, notamment le flux. Cela est réalisé par l'orientation de ces grandeurs dans un repère tournant (d,q) à la vitesse du champ tournant. Ainsi, le comportement de la machine se rapproche de celui d'une machine à courant continu à excitation indépendante, pour laquelle un découplage naturel existe entre le courant direct et le courant quadratique. La commande vectorielle par orientation du flux constitue une solution attractive pour obtenir de meilleures performances dans les applications à vitesse variable, en particulier pour la GADA.

III.2. Objectives de la commande vectorielle de l'aérogénérateur

III.2.1 Génération des tensions et fréquence constantes pour les sites isolés

Un système à base d'énergie éolienne destiné à un site isolé se caractérise principalement par le fait que la tension et la fréquence varient en fonction de la vitesse du vent, elle-même intermittente, ainsi que des variations de la charge. Généralement, un contrôleur est intégré au

système afin de réguler la tension et la fréquence à la sortie de la machine, les maintenant constantes et égales à leurs valeurs nominales malgré les fluctuations du vent et de la charge.

III.2.2 Optimisation du régime de conversion de l'éolienne pour les sites connectés

L'optimisation du régime de conversion de l'éolienne est basée généralement sur la courbe illustrée dans la figure (III.1), on peut distinguer 4 zones [42, 49-50] :

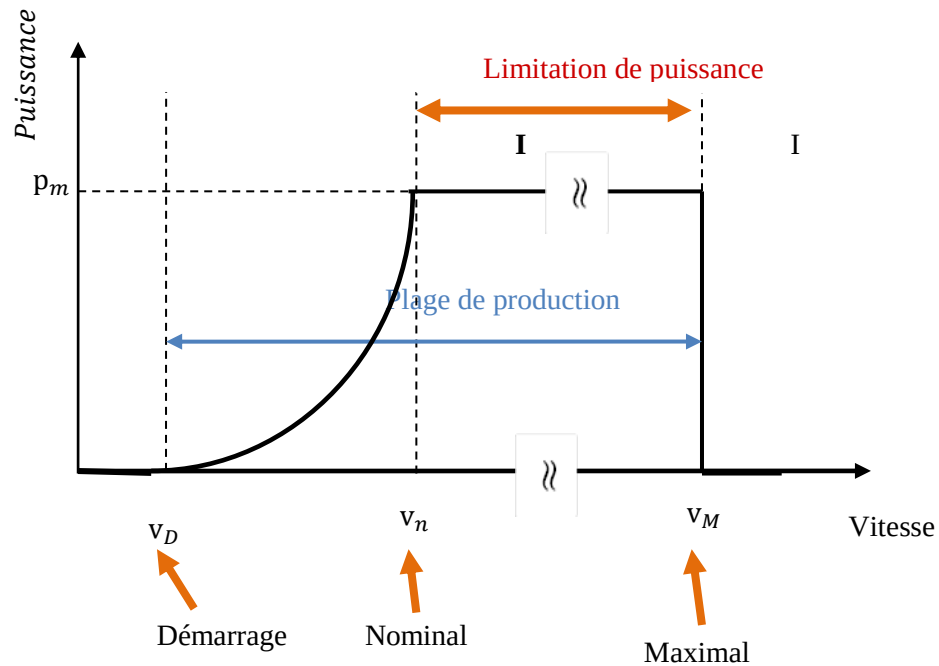


Figure III.1 : Courbe typique de régulation d'une éolienne à vitesse variable.

Zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.

Zone II : correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'éolienne peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. (On ne s'intéresse à cette zone dans notre étude).

Zone III : la vitesse de rotation est constante par régulation de la vitesse et la puissance fournie reste égale à la puissance nominale.

Zone IV : La protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de turbine.

III.3. Architecture du dispositif de commande

Dans cette thèse, nous présentons une petite partie d'un grand projet notamment le smart building [51-55], nous implémenterons en temps réel un algorithme de gestion et de contrôle

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

pour le système éoliennes à base de la MADA. C'est un système compliqué à contrôler en raison des différents modes de fonctionnement imposés par les systèmes de gestion. Il y a le mode connecté au réseau où nous contrôlons la puissance fournie et le mode isolé où nous devons réguler les tensions du stator du DFIG en fonction des demandes des charges, si la charge représente un bâtiment intelligent et s'il y a un excédent ou un déficit de puissance de l'éolienne[51-52]. Cette différence sera transférée ou compenser par le réseau de distribution d'où la nécessité de considérer un autre mode, il s'agit de la synchronisation.

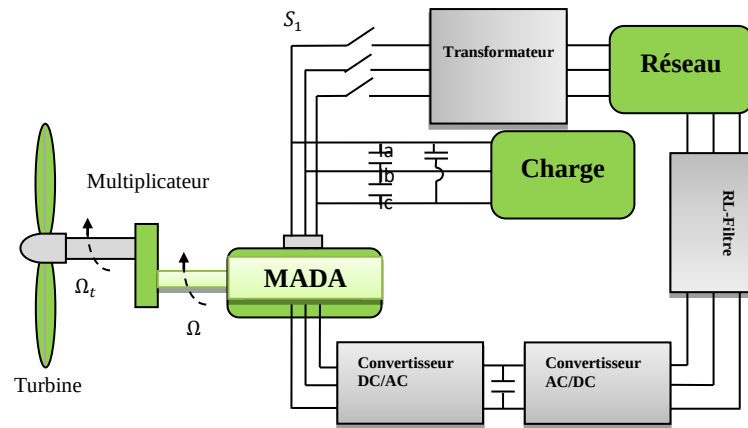


Figure III.2 : Configuration proposé de la chaîne de production éolienne.

Avec l'objectif à long terme de construire des villes intelligentes, les bâtiments intelligents et les bâtiments verts à énergie positive sont de plus en plus connus[51]. Ils présentent une solution pour réduire la consommation d'énergies fossiles sans réduire le niveau de confort des habitants. Ils sont souvent associés à des systèmes de gestion de l'énergie : des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et une batterie, comme le montre la figure 2. Notre objectif est de fournir une énergie suffisante aux différents équipements de la maison intelligente. Un algorithme de gestion simple prend en compte la puissance de la batterie et son état de charge.

Si l'énergie produite est inférieure à la demande du bâtiment, la différence sera fournie par la batterie. Si l'état de charge de la batterie est inférieur à son niveau minimum, un algorithme de délestage sera mis en œuvre. En cas d'excès de puissance, la puissance excédentaire sera transférée à la batterie. Si l'état de charge de la batterie est supérieur à son niveau maximal, le panneau photovoltaïque fournira une charge de délestage, et l'excédent de puissance de l'éolienne sera transféré au réseau de distribution [55].

III.3.1 Commande d'une turbine isolée à base de la MADA

Il y a plusieurs contraintes à respecter lorsqu'on alimente une charge isolée[50] :

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

- A) **Tension** : il est important de s'assurer que la tension fournie par l'alimentation est adaptée à la tension nominale de la charge.
- B) **Courant** : il faut s'assurer que le courant fourni par l'alimentation est suffisant pour alimenter la charge de manière adéquate.
- C) **Fréquence** : il faut s'assurer que la fréquence de l'alimentation est adaptée à celle de la charge.

III.3.2 synchronisation au réseau d'une turbine à base de la MADA

La synchronisation de la machine à l'éolienne est cruciale pour assurer la stabilité et la sécurité du système électrique, ainsi que pour garantir la qualité de l'alimentation électrique [56-63]. Trois contraintes principales permettent une connexion sûre et sans heurts à un réseau triphasé, elles sont :

- A) **Stabilité du système électrique** : la synchronisation de la machine à l'éolienne permet de maintenir la stabilité du système électrique en assurant que la fréquence et la tension de la machine sont synchronisées avec celles du réseau électrique auquel elle est connectée. Cela permet d'éviter les perturbations dans le réseau électrique et de garantir la qualité de l'alimentation électrique.
- B) **Protection des équipements** : la synchronisation de la machine à l'éolienne permet de protéger les équipements du réseau électrique et de la machine contre les surintensités et les surtensions qui peuvent être causées par des variations de fréquence et de tension.
- C) **Commande de la puissance de l'éolienne** : la synchronisation de la machine à l'éolienne permet de contrôler la puissance produite par l'éolienne et de l'injecter dans le réseau électrique de manière stable et fiable.

III.3.3 Commande d'une turbine connectée à base de la MADA

Lorsque la MADA sera connectée au réseau électrique notre objective est d'assurer le bon fonctionnement de l'aérogénérateur dans la zone II ; montré dans la figure III.1.

Les objectives à considérer sont les suivants [56] :

- A) **Asservissement de vitesse de la génératrice**: l'objectif étant de maximiser la production (la puissance active envoyée au réseau électrique), pour cela, la génératrice doit fonctionner à vitesse variable en suivant une caractéristique optimale (algorithme de Maximum Power Point Tracking -MPPT). Ainsi, il faut établir une stratégie de commande permettant à la génératrice de tourner à une vitesse optimale

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

(correspondant à un coefficient de puissance C_p maximal) donnant lieu à une production d'énergie optimale (maximum de puissance).

- B) **Régulation de puissance réactive statorique:** l'objectif est d'imposer une puissance réactive statorique Q_s pratiquement nulle (exigence du réseau électrique auquel est raccordé l'aérogénérateur).

III.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

La MPPT est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée, comme elle est illustrée dans la figure III. 3

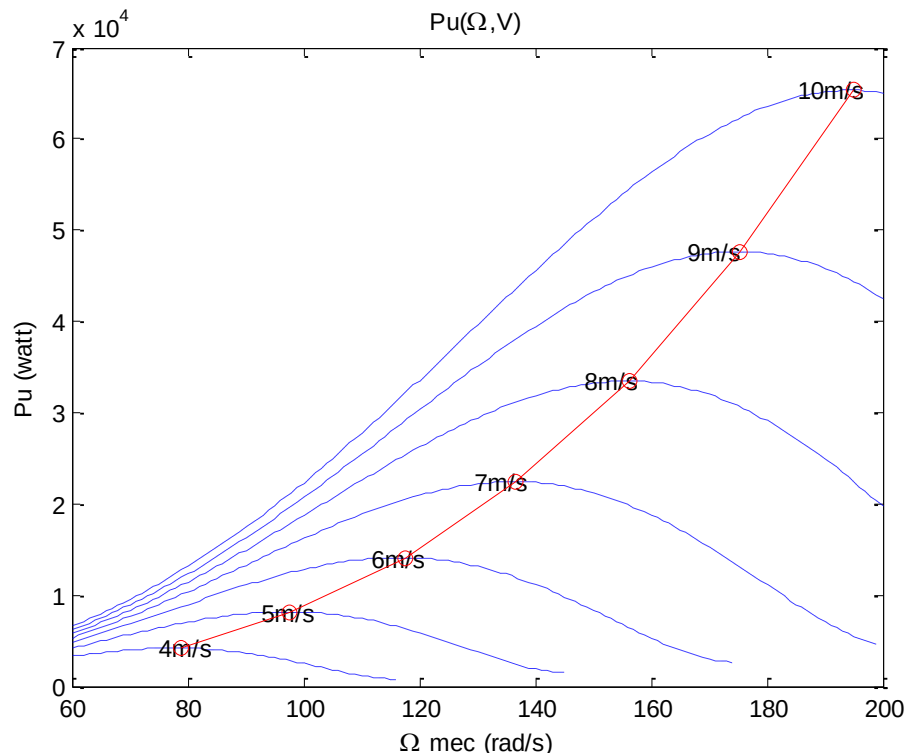


Figure III.3 : Principe de contrôle la vitesse de la turbine par le MPPT.

Ce qui signifie pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale, ce qui correspond à une vitesse de rotation optimale Ω_{opt} .

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v \cdot G}{R} \quad (III.1)$$

où λ_{opt} est la vitesse relative optimale.

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

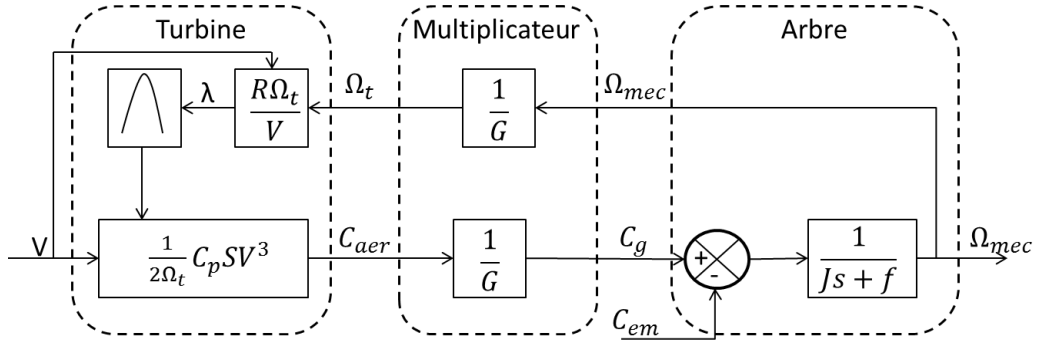


Figure III.4 : Principe de commande d'une éolienne à vitesse variable.

Ce schéma décrit le fonctionnement de la turbine, la sortie qu'on veut commander est la vitesse de rotation Ω_{mec} . Les entrées de ce système sont le vent et le couple électromagnétique, le vent étant une grandeur non-contrôlable, la seule entrée contrôlable étant le couple électromagnétique de la GADA dont l'expression est non linéaire et couplée

$$C_{mec} = p \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (III.2)$$

Pour résoudre ce problème, on applique la commande vectorielle.)

Dans le cadre de ce mémoire, nous présentons la commande vectorielle de la GADA avec orientation du repère (dq) suivant le flux statorique.

III.5. Synchronisation entre MADA et réseau

III.5.1. Modèle du réseau

Le modèle du réseau dans le repère (d, q) est présenté par l'équation [50]:

$$\begin{cases} \frac{di_{df}}{dt} = \frac{1}{L_f} (v_{df} - v_{dg} - R_f i_{df}) \\ \frac{di_{qf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (v_{qf} - v_{qg} - R_f i_{qf}) \end{cases} \quad (III.3)$$

avec R_f, L_f sont respectivement la résistance et l'inductance du filtre; (v_{dg}, v_{qg}) sont les tensions mesurées du réseau. (i_{df}, i_{qf}) et (v_{df}, v_{qf}) représente les courant et tension du filtre dans le repère du Park (d, q) respectivement.

Supposons que $\hat{\theta}_g$ c'est l'angle estimé de déphasage du réseau θ_g sera l'angle réel. La transformation de Park des tensions réseau nous donne :

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

$$\begin{bmatrix} v_{dg} \\ v_{qg} \end{bmatrix} = \text{Park}(\hat{\theta}_g) \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Avec la matrice réduite de $\text{Park}(\hat{\theta}_g) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}_g) & \cos(\hat{\theta}_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\hat{\theta}_g + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\hat{\theta}_g) & -\sin(\hat{\theta}_g - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta}_g + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$

On va utiliser une technique appelée (PLL) pour l'estimation d'angle $\hat{\theta}_g$, cette technique repose au fait que : Si on trouve un angle $\hat{\theta}_g$ que garantie que la composante v_{dg} de réseau sera nulle elle s'agit de l'angle de la rotation de réseau.

$$v_{dg} = v_{dg_{ref}} = 0 \text{ alors } \hat{\theta}_g = \theta_g \quad (\text{III.5})$$

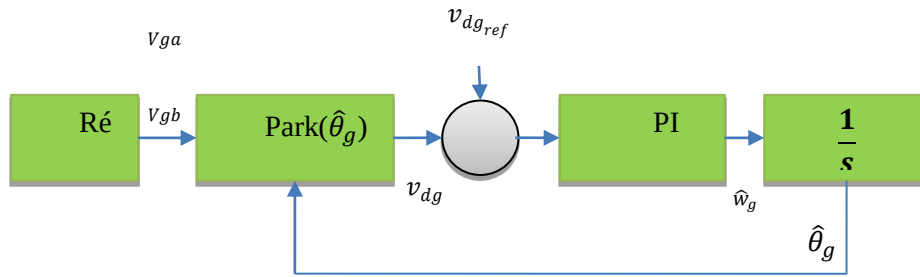


Figure III.5 : Technique de la PLL

III.5.2 Algorithme de synchronisation

Le disjoncteur de synchronisation est fermé lorsque les tensions du stator suivent leurs références. En cas d'instabilités du réseau ou si l'on souhaite déconnecter la DFIG, le disjoncteur est rouvert. Cela peut se produire, par exemple, lorsque la vitesse du vent est très faible et que la puissance générée est insuffisante pour alimenter les charges.

Pour modéliser les différents modes du système, une variable de commutation continue α est introduite [62, 63] :

Mode 1 : Mode de synchronisation ($S=0$) représenté à la figure III.2, ce mode correspond à un disjoncteur ouvert entre le stator et le réseau.

Mode 2 : Mode de contrôle de la puissance ($S=1$) Représenté également à la figure III.2, ce mode correspond à un disjoncteur fermé entre le stator et le réseau.

On suppose que la transition du mode 1 vers le mode 2 se produit à $t=t_1$ et la transition inverse à $t=t_2$. Initialement, la DFIG est isolée du réseau (mode 1) et le contrôle commence par le processus de synchronisation. Deux variables sont définies pour permettre une transition sûre

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

et fluide entre les modes :S et J : S est un booléen représentant la commutation physique entre le stator de la DFIG et le réseau.J est une fonction de fitness utilisée par l'algorithme de gestion pour passer d'un mode à l'autre. Elle est directement liée à l'erreur quadratique intégrale entre les tensions du stator et celles du réseau sur un court intervalle de temps Δt

$$J(t) = ISE(v_{ds} - v_{dg}) + ISE(v_{qs} - v_{qg}) \quad (III.6)$$

avec $ISE(.) = \int_t^{t+\Delta t} (.)^2$

notre algorithme proposer est présenté dans la figure III.6.

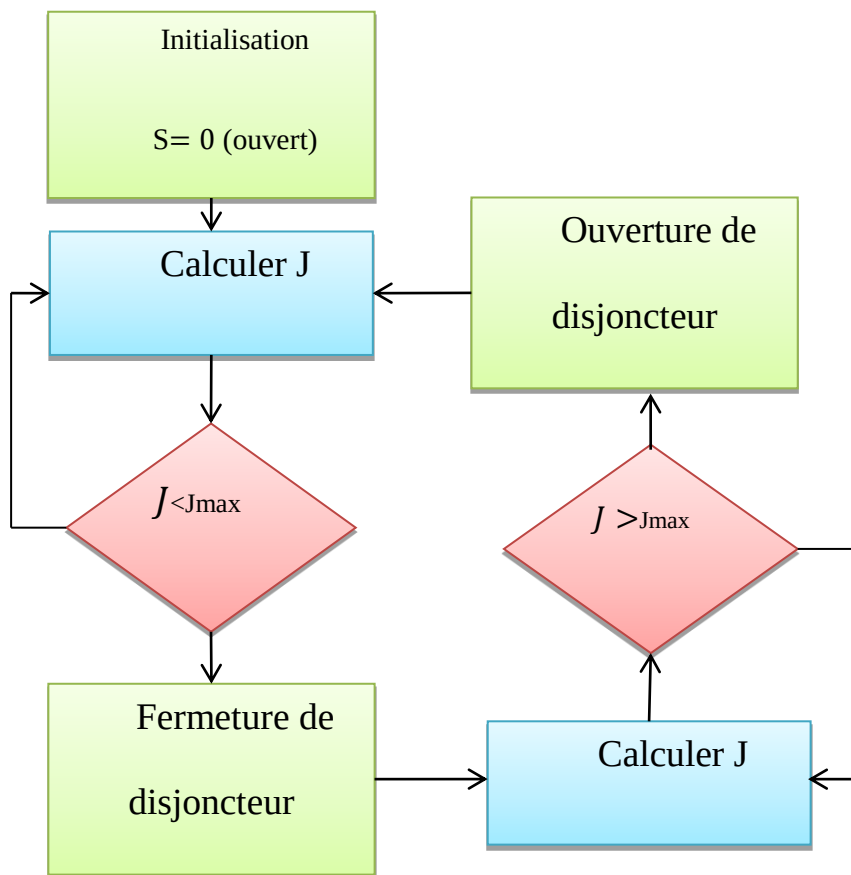


Figure III.6 : Algorithme de synchronisation

III.6. Principe de la commande vectorielle de la GADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique en utilisant une structure de contrôle analogue à celle d'une machine à courant continu. Il s'agit donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, qui sont naturellement découplés dans une machine à courant continu

(le courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans le cas des machines à courant alternatif, ce découplage se traduit par la séparation de la puissance active et réactive du stator. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q) où l'un des axes coïncide avec la direction souhaitée du flux, qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère permet de représenter les composantes directe et en quadrature du flux statorique et du courant rotorique [64-72].

III.6.1. Choix du référentiel dq

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère d, q faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, sans que ce repère ne soit spécifiquement défini, c'est-à-dire qu'il reste libre [68].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- Référentiel lié au stator ;
- Référentiel lié au rotor ;
- Référentiel lié au champ tournant.

III.6.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce cas le repère (dq) sur le stator

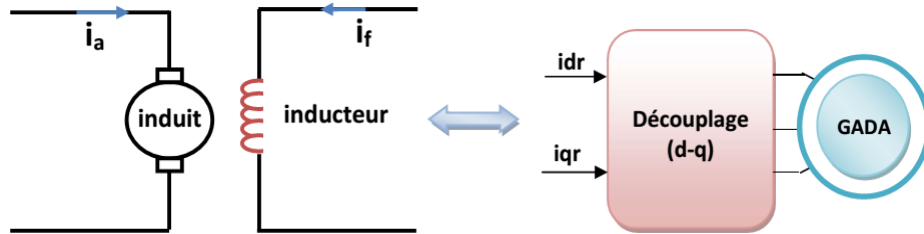


Figure III.7 : Schéma d'équivalence MCC et MADA après orientation du flux.

$$\theta_s = 0 \quad \text{Et} \quad \theta_s = \theta + \theta_r \quad \theta_r = -\theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{III.7})$$

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\phi_{qs} = 0, \phi_{ds} = \phi_s$)

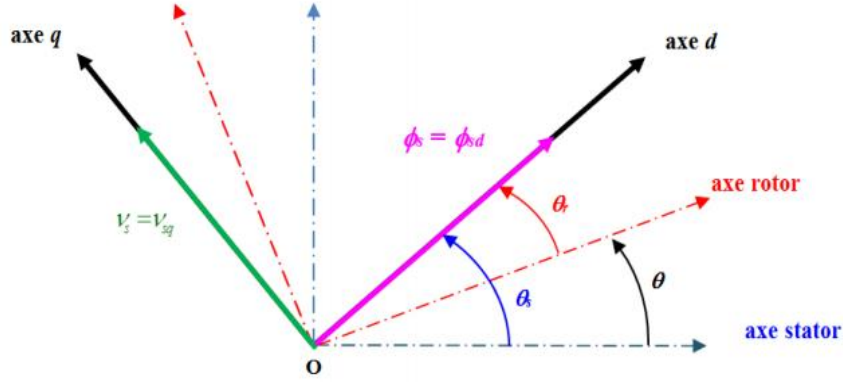


Figure III.8: Orientation du repère (dq).

Le stator est directement relié au réseau, alors l'angle électrique θ_s nécessaire aux transformations de PARK est calculé à partir de la mesure de la tension statorique[68] :

$$\theta_s = \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (\text{III.8})$$

Où $\theta_1 = \text{artg}\left(\frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}}\right)$: est l'angle du vecteur tension statorique dans le repère stationnaire abc comme il est montré sur la figure (III.6).

Le couple électromagnétique devient[68] :

$$C_{em} = -K(i_{qr}\phi_s) \quad (\text{III.9})$$

Où $K = \frac{pM}{L_s}$

D'après l'équation (III.4) et pour ϕ_s constat, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} . Alors, le couple électromagnétique de la GADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

Pour faire l'orientation du flux statorique, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de PARK selon les équations (II.38) [68].

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$v_{ds} = 0 \text{ et } v_{qs} = v_s \quad (\text{III.11})$$

Nous pouvons simplifier les équations des tensions et d'un flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

À partir de l'équation (III.13), on écrit les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques.

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\phi_{ds}}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et en quadrature des flux rotorique.

$$\phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{ds} \quad (\text{III.15})$$

$$\phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{M^2}{L_s} \cdot i_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (\text{III.16})$$

σ : est le coefficient de dispersion entre les enroulements :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r} \right) \quad (\text{III.17})$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (III.9) dans v_{ds}, v_{qs} (l'équation (III.5)), puis les expressions des composantes des directes et quadrature des flux rotoriques (III.10) et (III.11) dans v_{dr}, v_{qr} (équation (III.5)), on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} M i_{dr} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = \frac{R_s}{L_s} M i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} + e_d \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Tel que :

$$\begin{cases} e_d = -L_r (\omega_s - \omega) \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ e_q = -L_r (\omega_s - \omega) \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s} (\omega_s - \omega) \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques:

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q) \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

III.6.3 Génération des courants rotoriques de référence

III.6.3.1 Mode isolé

Les tensions statoriques et les courants rotoriques dans le mode isolé sont reliés avec l'équation (II.62), cette équation nous donne :

$$\begin{cases} v_{ds}(\frac{d}{dt} + \frac{1}{RC}) = -\frac{M}{CL_s} i_{dr} + \frac{\phi_s}{CL_s} + \omega_s v_{qs} \\ v_{qs}(\frac{d}{dt} + \frac{1}{RC}) = -\frac{M}{CL_s} i_{qr} - \omega_s v_{ds} \end{cases} \quad (III.21)$$

Supposons que

$$\begin{cases} e_{d1} = +\frac{\phi_s}{CL_s} + \omega_s v_{qs} \\ v_{q1} = -\omega_s v_{ds} \end{cases} \quad (III.22)$$

Donc, les tensions statoriques et les courants rotoriques sont reliés avec une fonction de Transfer d'ordre 1

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds}}{dt} = -\frac{M}{CL_s} i_{dr} - \frac{1}{RC} v_{dr} - e_{d1} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} = -\frac{M}{CL_s} i_{qr} - \frac{1}{RC} v_{qr} - e_{q1} \end{cases} \quad (III.23)$$

La régulation des tensions statoriques peut être établi avec des régulateurs PI classique, comme il est montré dans ce schéma de commande :

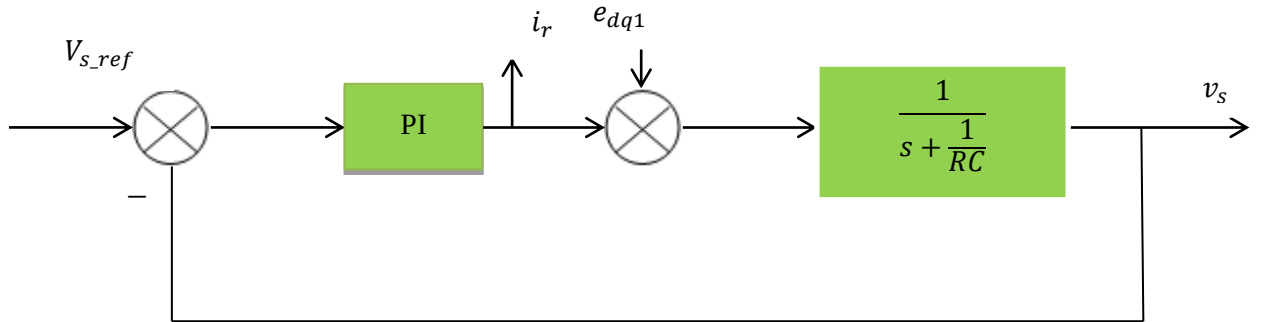


Figure III.9 : Boucle de régulation de tension mode isolée

Avec : $i_r = i_{qr_ref}$ ou i_{dr_ref} ; $V_{sd_ref} = V_{s_ref}$ ou V_{sq_ref} ; $v_s = v_{qs}$ ou v_{ds} $e_{dq1} = e_{q1}$ ou e_{d1} .

Les courants rotoriques sont les sorties des deux régulations PI.

III.6.3.2 Mode de synchronisation :

En mode de synchronisation, les relations entre les tensions statoriques et les courants rotoriques restent les mêmes que dans le mode normal. La différence réside dans le fait que les tensions de référence sont imposées par le réseau, à l'aide de la technique PLL. Le schéma de commande correspondant est présenté à la figure suivante.

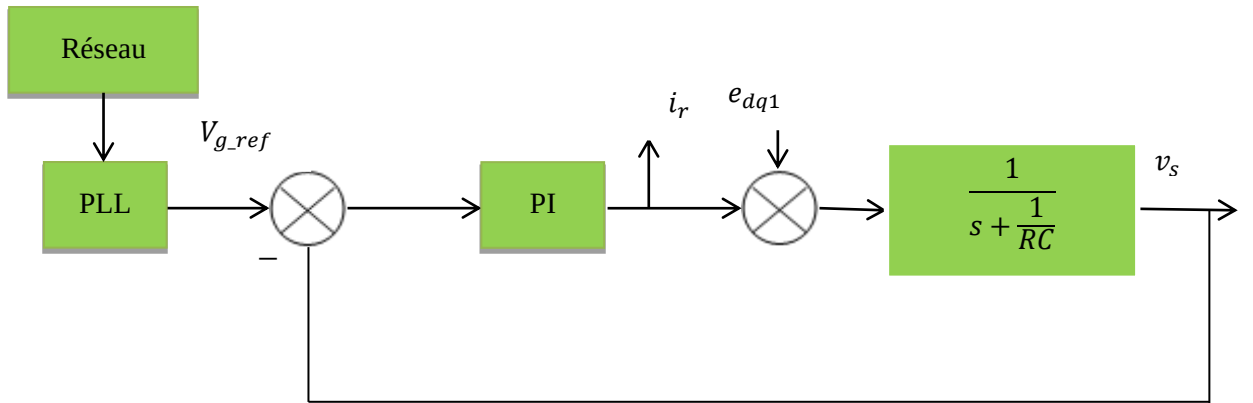


Figure III.10 : Boucle de régulation de tension mode synchronisation

III.6.3.3 Mode connecté :

Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation (III.11)), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{qr_ref} et le couple électromagnétique C_{em_ref} issu du bloc de contrôle MPPT, par :

$$i_{qr_ref} = -\frac{L_s}{PM\phi_{dsref}} C_{em_ref} \quad (III.24)$$

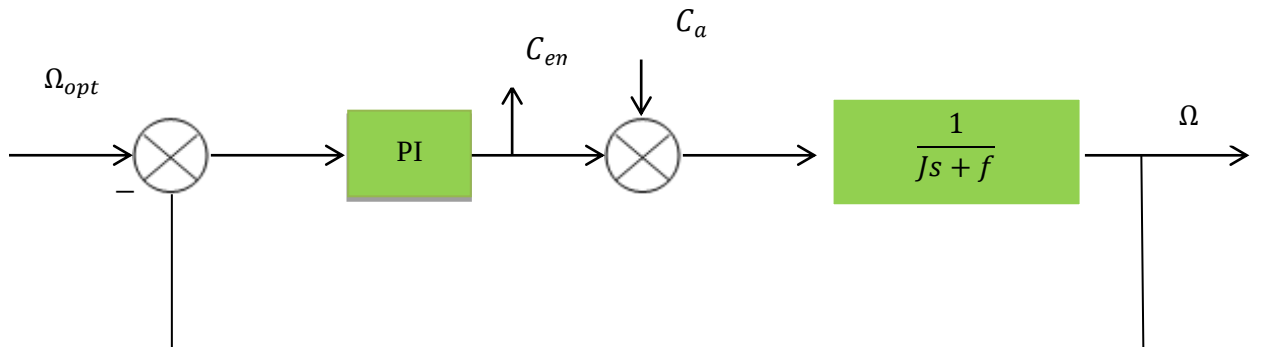


Figure III.11 : Boucle de régulation de vitesse

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone sont données par l'équation (II.45). Avec $v_{ds} = 0$, et en remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions, on obtient :

$$p_s = -v_{qs} \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (\text{III. 25})$$

$$Q_s = \left(\frac{v_{qs} \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} v_{qs} i_{qr} \right) \quad (\text{III. 26})$$

Dans le cadre de cette étude, on veut que la machine fonctionne avec un facteur de puissance unitaire du côté du stator, participant ainsi à la production totale de la puissance active p_s (puissance réactive Q_s nulle). Ce qui va permettre à partir de l'équation (III.4) et (III.15) de déduire la relation suivante :

$$0 = \frac{v_{qs} \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M v_{qs} i_{dr}}{L_s} \quad (\text{III. 27})$$

$$i_{dr_{ref}} = \frac{\phi_{ds}}{M} \quad (\text{III. 28})$$

III.6.4. Génération des tensions rotoriques de référence :

En supposant que le convertisseur est parfait ($v_{dr_{ref}} = v_{dr}$ et $v_{qr_{ref}} = v_{qr}$). D'après les Équations (III.14, III.15, III.16), on peut représenter ce schéma :

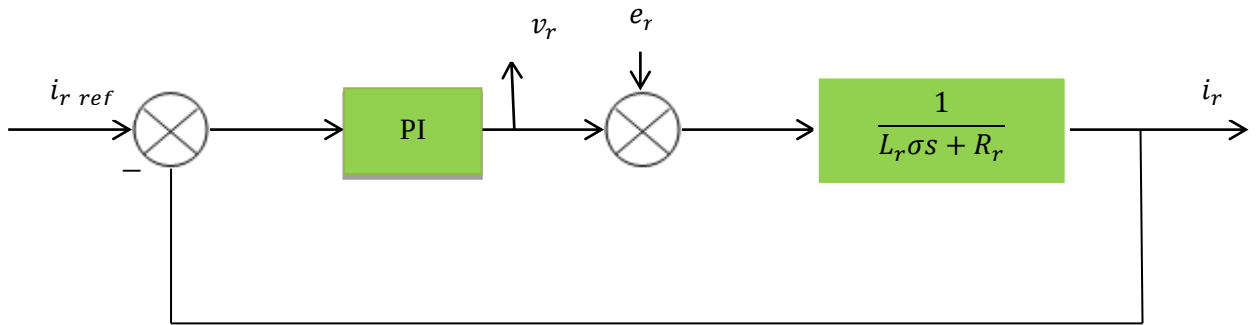


Figure III.12 : Boucle de régulation des courants

Avec : $i_{ref} = i_{qr_{ref}}$ ou $i_{dr_{ref}}$; $i_r = i_{qr}$ ou i_{dr} ; $v_r = v_{qr}$ ou v_{dr} ; $e_r = e_q$ ou e_d .

Les tensions rotoriques sont les sorties des deux régulations PI.

III.6.5. Récapitulatif des commandes et objectives

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

Les objectifs de commande varient selon le mode de fonctionnement de la turbine et sont atteints par le contrôle des courants et tensions du rotor.

La régulation s'effectue en cascade, avec la règle essentielle que les boucles internes doivent être plus rapides que les boucles externes pour assurer la stabilité du système.

La figure III.13 illustre le principe de la commande vectorielle avec régulation de la tension et de la fréquence. Les objectifs de commande sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Résumé d'objectives de commande

Modes	Commande de la Boucle		Objective
	Intérieur	extérieur	
<i>STAND ALONE</i> (isolé) <i>Mode 1</i>	v_{dr}	$i_{dr} = i_{dr_{ref}}$	$v_{qs} = v_{qs_{ref}}$ Tension du stator
	v_{qr}	$i_{qr} = i_{qr_{ref}}$	$v_{ds} = v_{ds_{ref}}$ Tension du stator
<i>Synchronisation</i> <i>au réseau</i> <i>Mode 2</i>	v_{dr}	$i_{dr} = i_{dr_{ref}}$	$v_{qs} = v_{qs_{ref}}$ Tension du stator
	v_{qr}	$i_{qr} = i_{qr_{ref}}$	$v_{ds} = v_{ds_{ref}}$ Tension du stator
<i>Connecté au</i> <i>réseau</i> <i>Mode 3</i>	v_{dr}	$i_{dr} = i_{dr_{ref}}$	$\phi_{ds} = \phi_{ds_{ref}}$ Flux de la machine
	v_{qr}	$i_{qr} = i_{qr_{ref}}$	$\Omega = \Omega_{ref}$ Vitesse de la machine

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

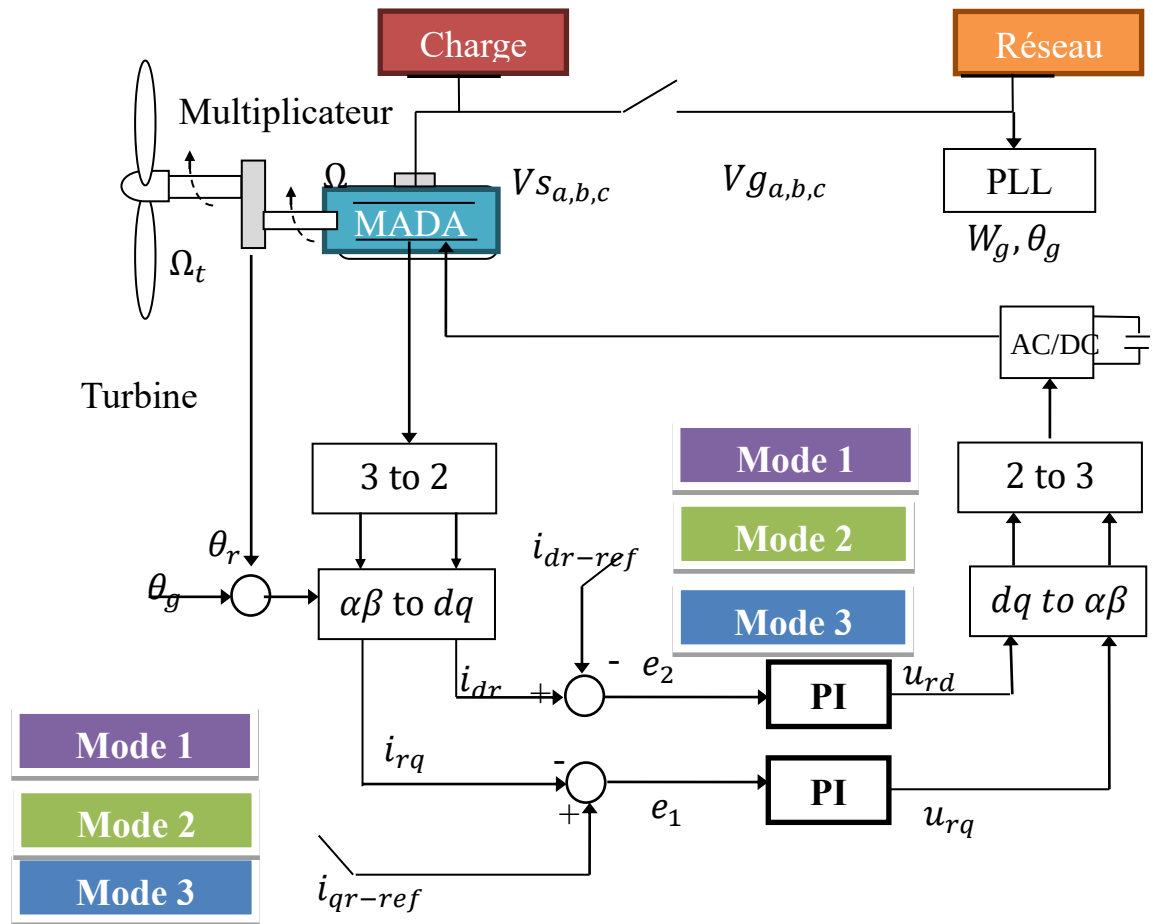


Figure III.13 : Schéma global de la boucle intérieure

Les figures (III.14-III.16) montrent le principe de la commande vectorielle dans les trois modes étudiés.

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

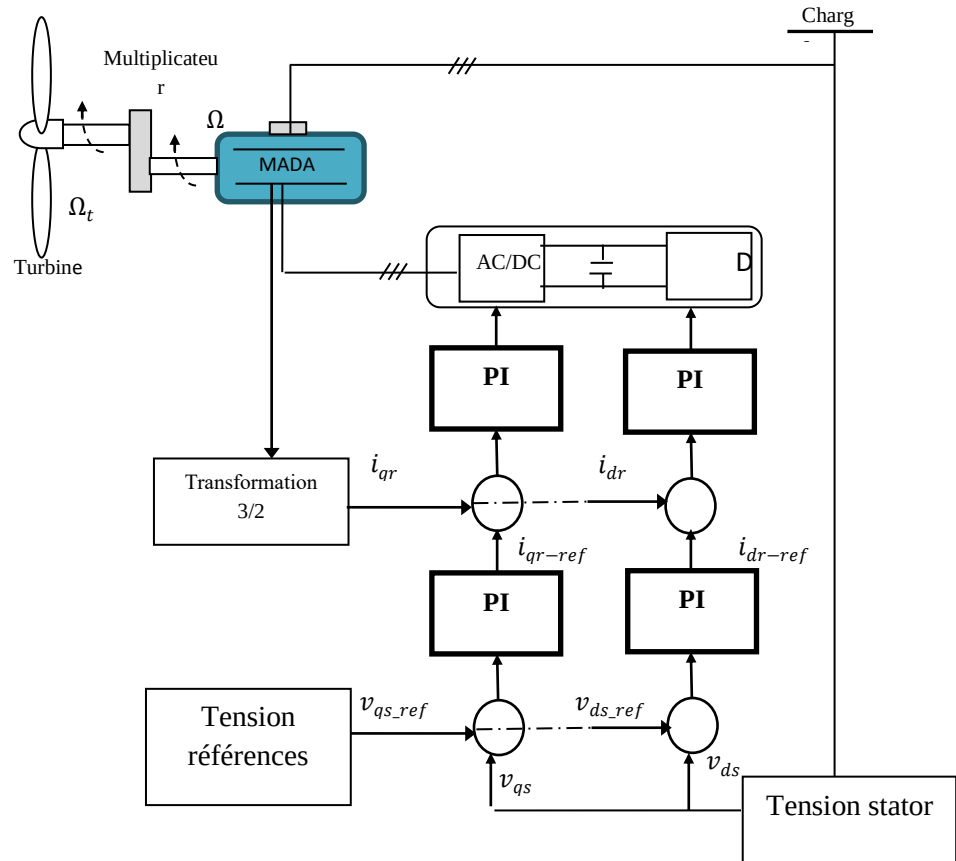


Figure III.14 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur en mode 1.

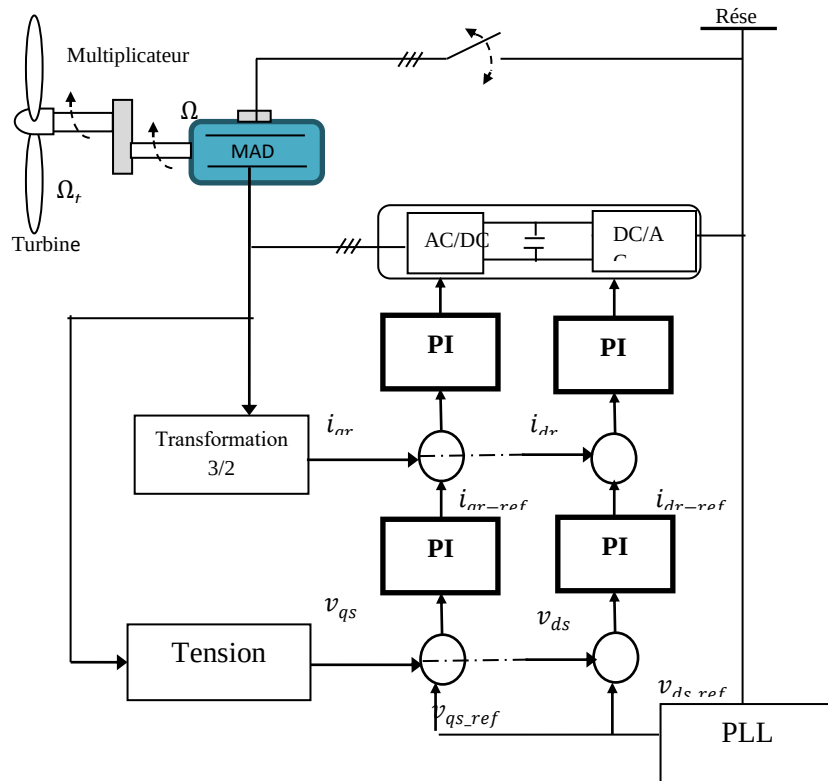


Figure III.15 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur mode 2.

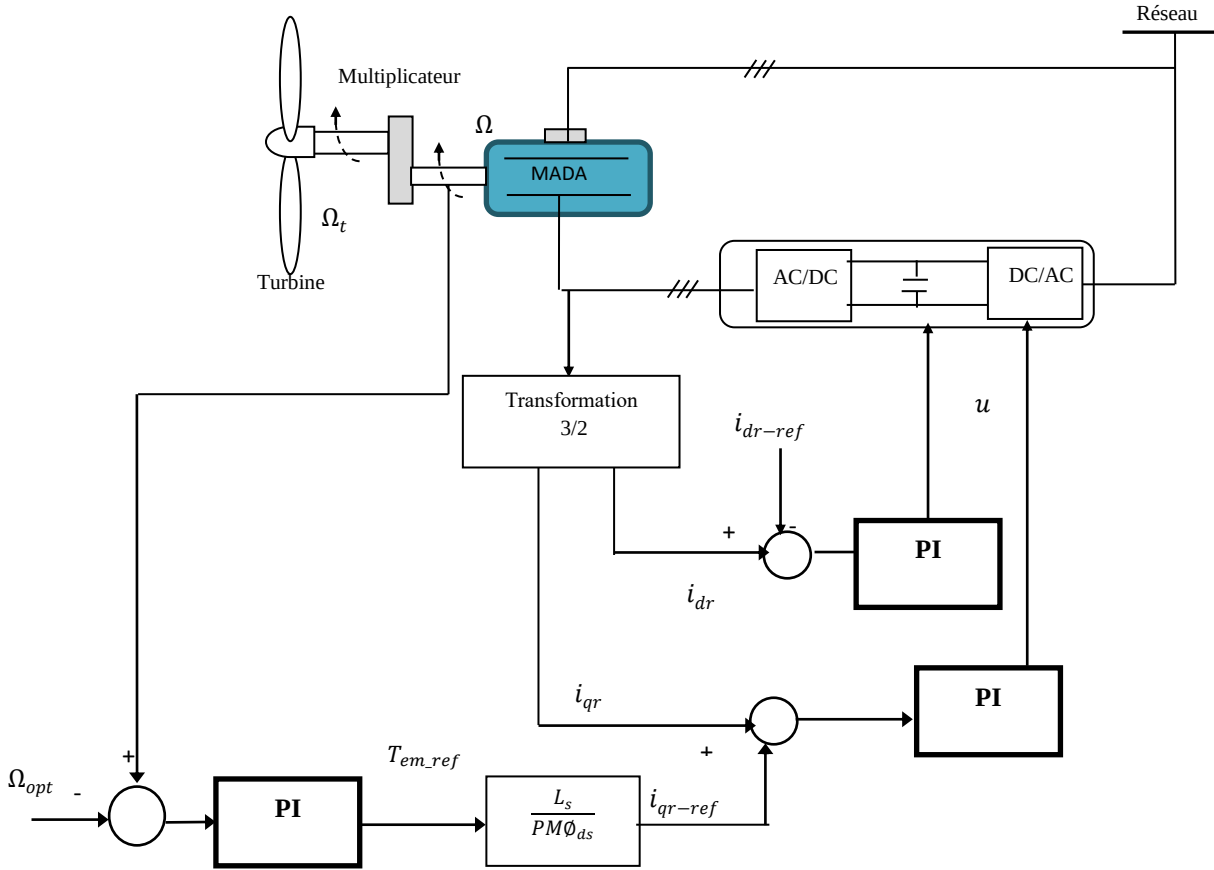


Figure III.16 : Principe de la commande vectorielle de l'aérogénérateur mode 3.

III.7. Résultats de simulation

Nous présenterons dans cette partie les résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre (les paramètres du système sont donnés en annexe). Les paramètres du régulateur PI sont :

- ✓ **Vitesse** Ω : $k_p = 5, K_i = 2$
- ✓ **Courant** i_{dr} : $k_p 3, K_i = 3$
- ✓ **Courant** i_{qr} : $k_p 3, K_i = 3$

Le modèle du vent est illustré sur la figure (III.17), le maximum du coefficient de puissance $C_{p_max}(\lambda) = 0.553$ se atteint pour une valeur optimale de $\lambda = 6.2$.

Considérons que la variation de vitesse du vent est gérée par l'équation suivante :

$$v(t) = 10 + \sin(0.2t) + \sin(1.5t - 0.5) + 3(0.5t + 2) \quad (III.29)$$

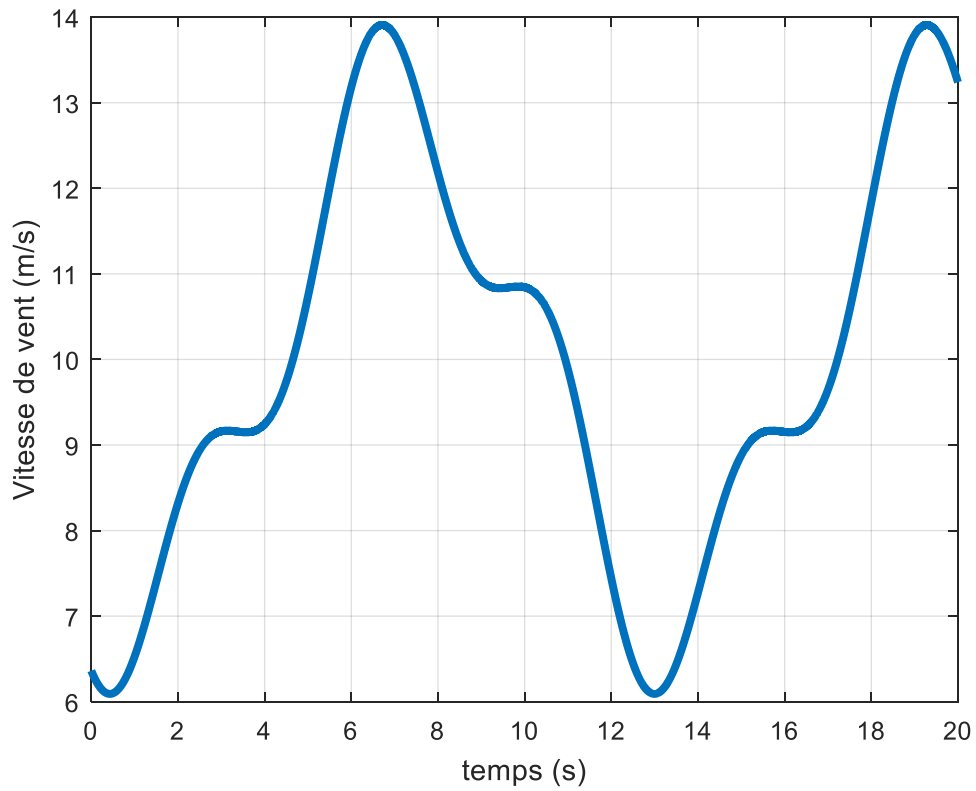
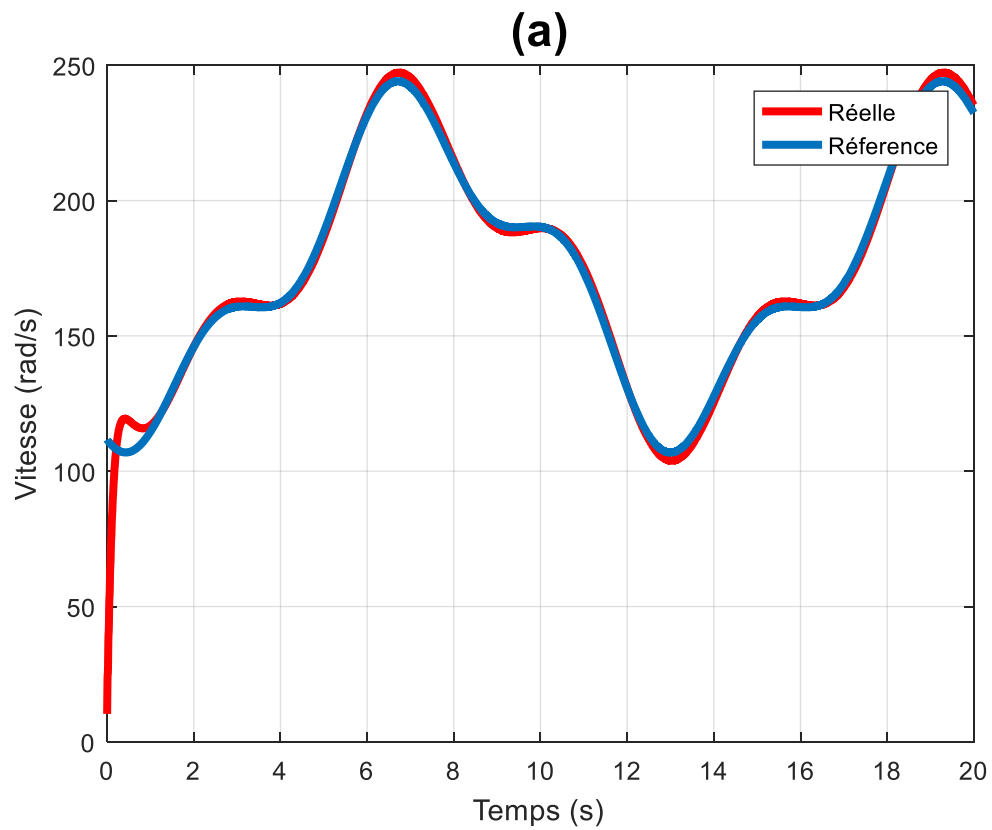
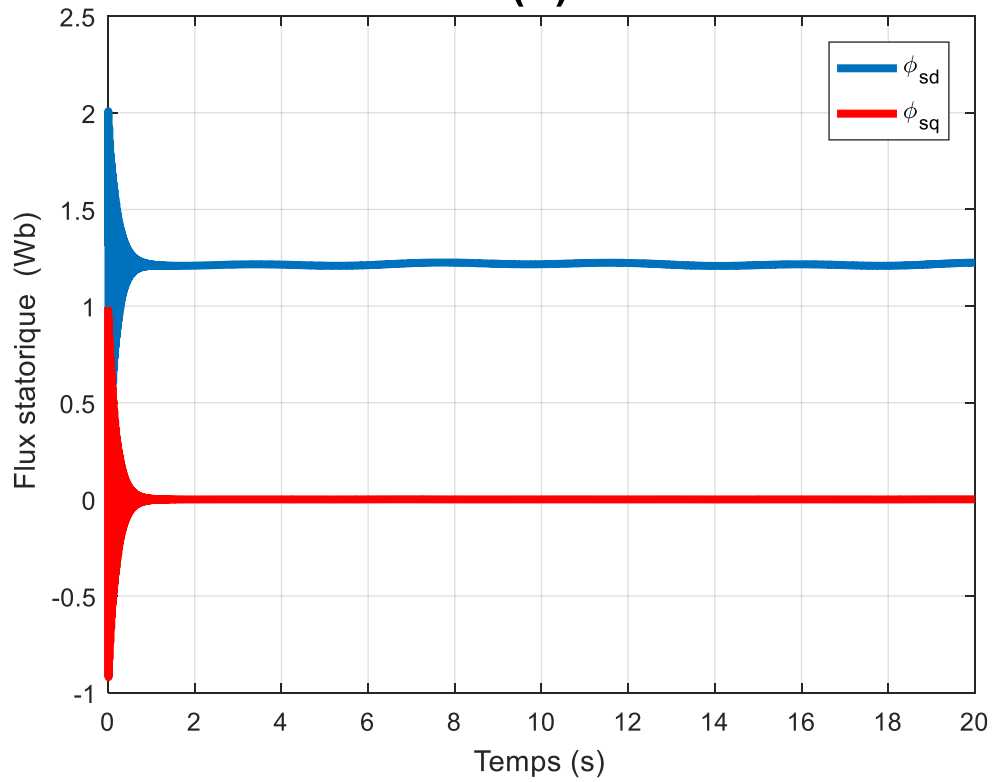


Figure III.17 : Equation du vent utilisé dans la simulation.

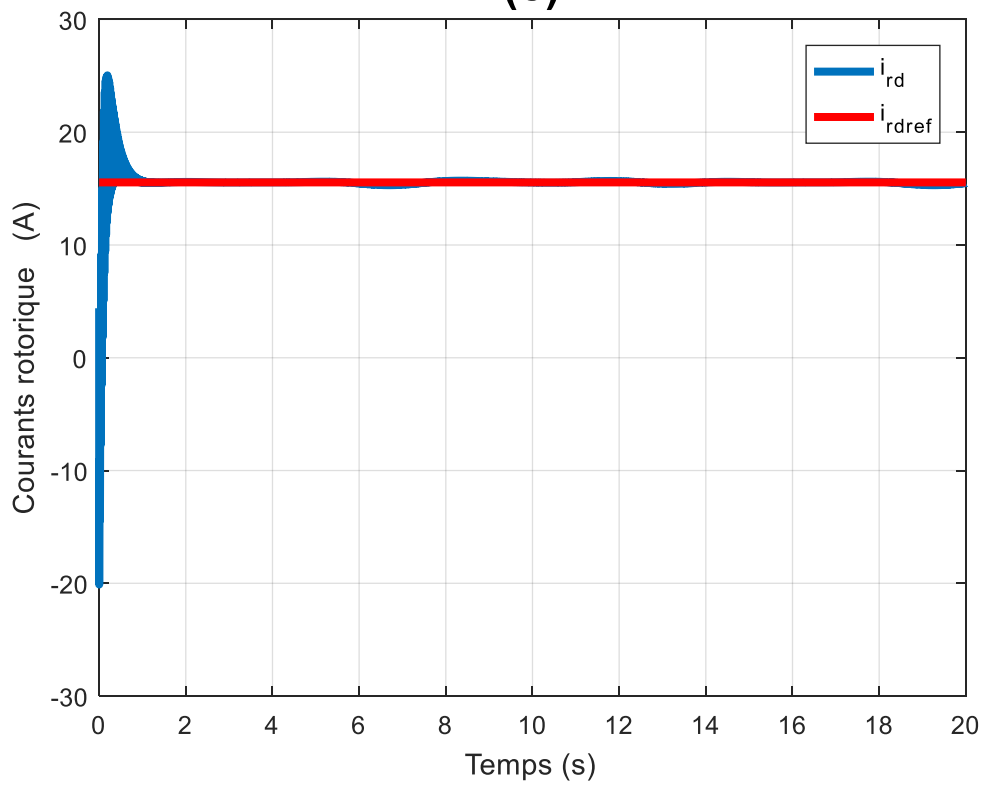
III.7.1. Test sous conditions nominales

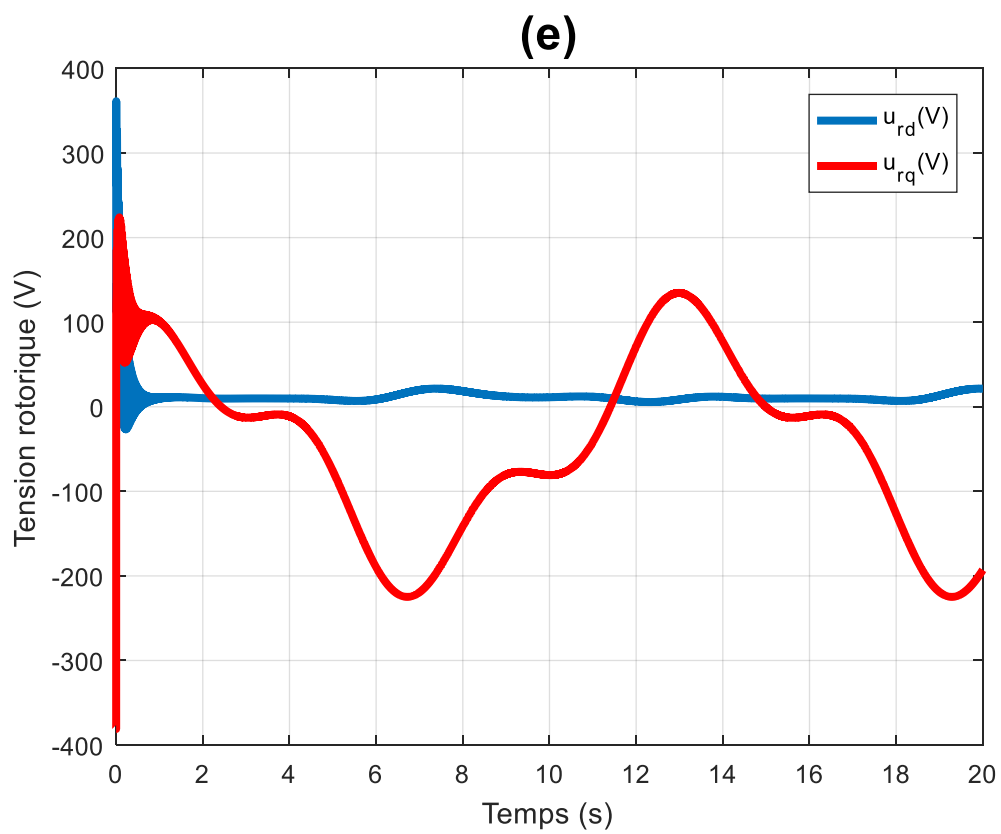
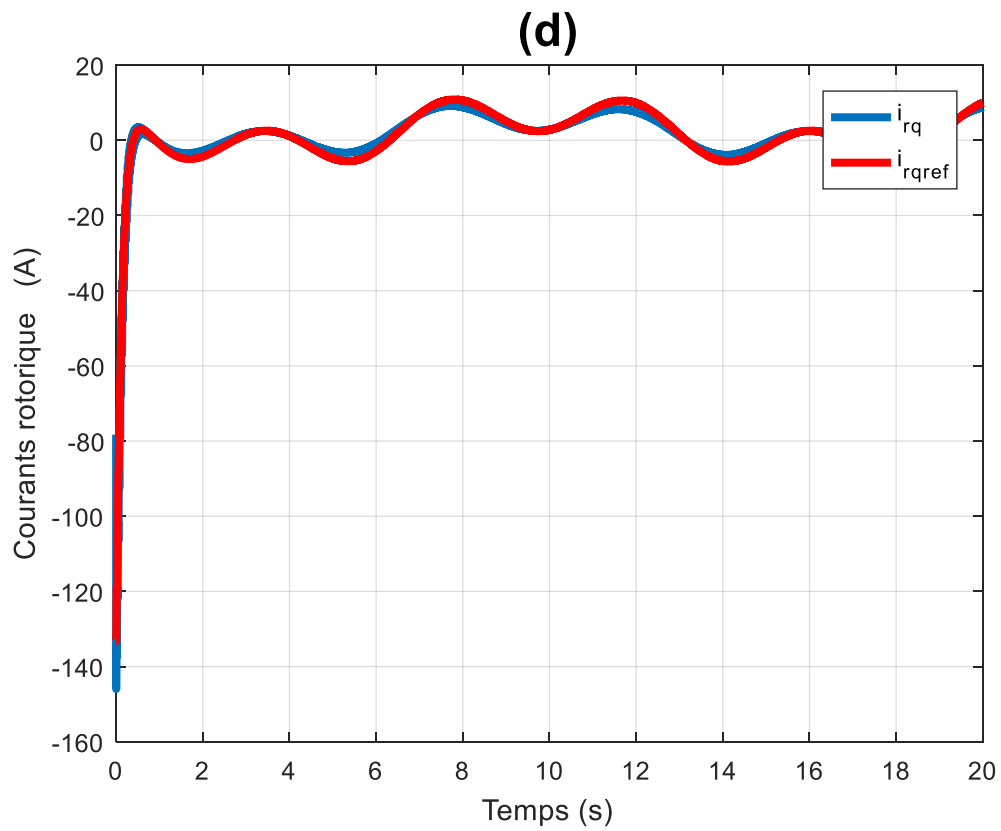


(b)

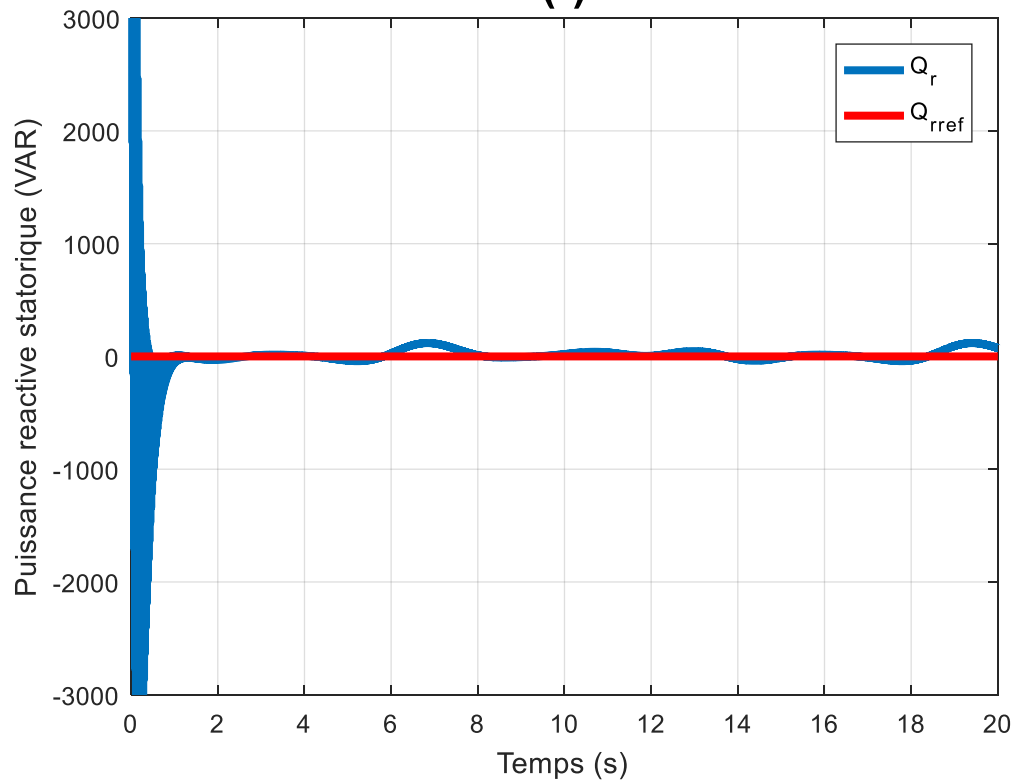


(c)

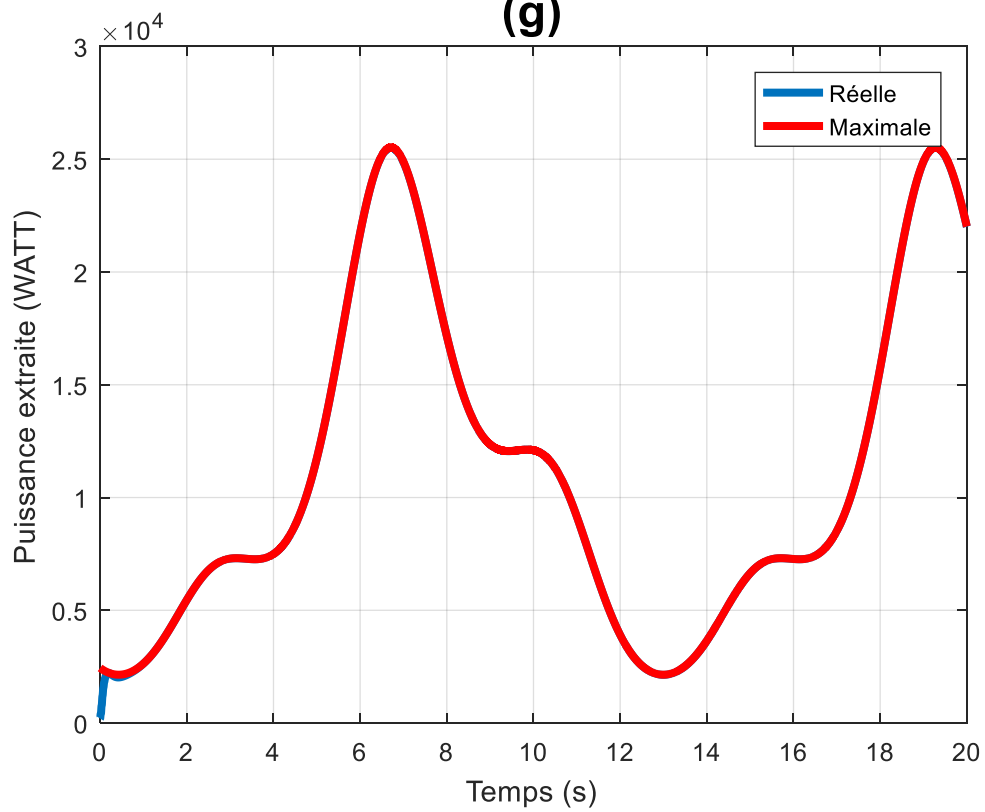




(f)



(g)



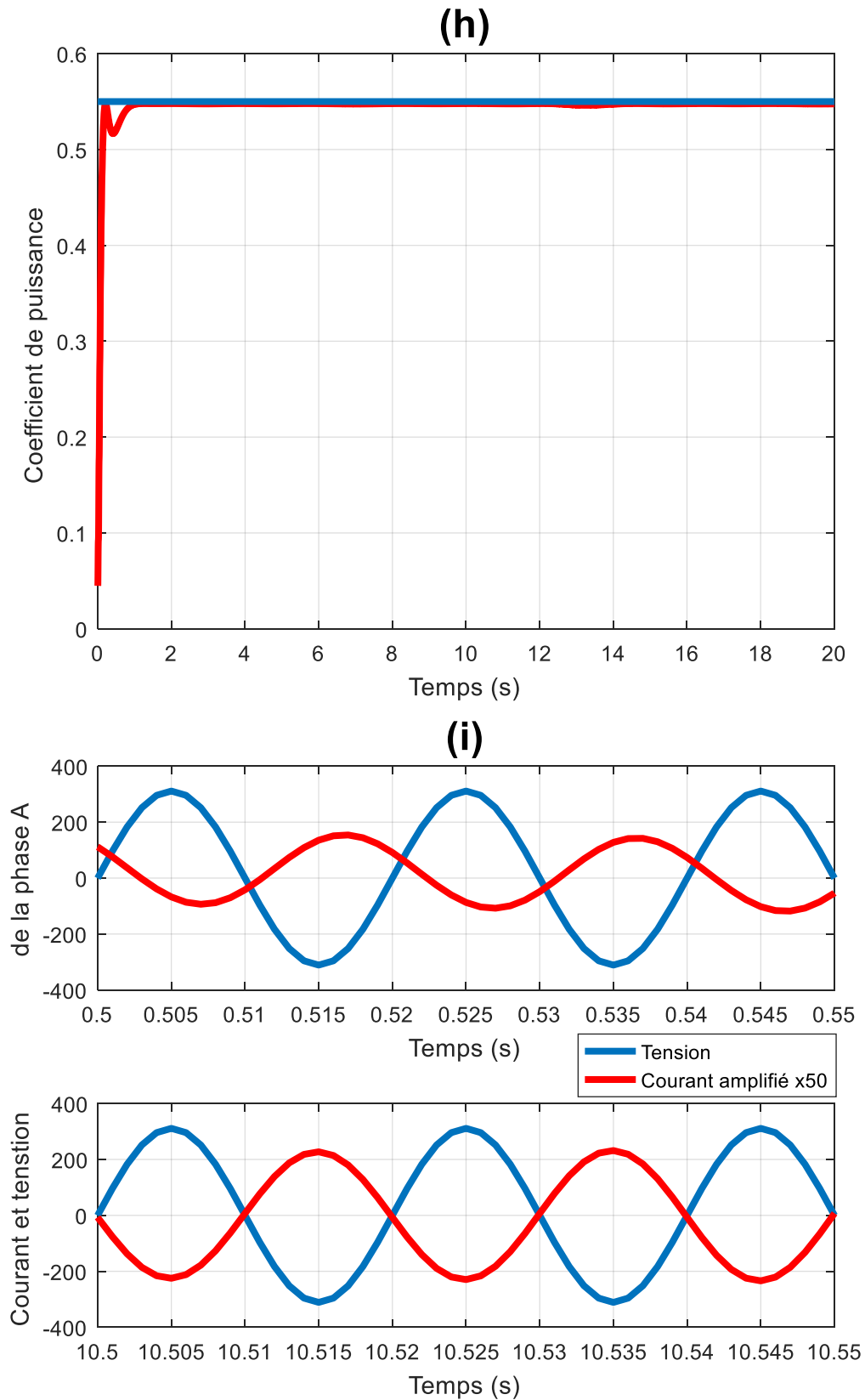


Figure III.18 : Résultats de simulation de la commande vectorielle sous conditions nominales.

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande, à savoir :

- ✓ Découplage (orientation du flux statorique) ;

- ✓ Production de puissance maximale (MPPT) ;
- ✓ Production avec un facteur de puissance statorique unitaire ;
- ✓ Poursuite des courants ;
- ✓ Qualité des signaux de commande ;

- Découplage

La figure (III.18.b) montre une bonne orientation du flux ce qui donne un bon découplage entre le flux statorique et le couple de la GADA.

-Production de puissance maximale (MPPT)

La réalisation de cet objectif peut être vérifiée en regardant la réponse de la vitesse de rotation de la MADA la figure (III.18.a) et la puissance délivrée la figure (III.18.g). ou bien l'évolution du coefficient de puissance C_p la figure (III.18.h). On remarque que la vitesse de la génératrice suit parfaitement son profil optimal donnant lieu à une extraction maximale de la puissance (puissance active), ceci peut être également confirmé en regardant l'allure du coefficient de puissance C_p qui ne change pas beaucoup de valeur, il reste pratiquement égal à sa valeur de référence optimale 0.553 ; ceci conforme que le système éolien extrait le maximum de puissance.

-Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

La figure (III.18.i) présente le courant statorique amplifié fois un facteur de 50 et la tension du stator dans le régime transitoire à $t = 0.5s$ et le régime permanent à $10s$. Le courant statorique délivré par le système éolien est en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$) par rapport à la tension du réseau ceci confirme que le système éolien n'injecte que de la puissance active ($p_s = u_s i_s \cos \varphi = -u_s i_s$) dans le réseau, donc une puissance réactive nulle ($Q_s = u_s i_s \cos(\varphi) = 0$) ce qui est confirmé dans la figure (III.18.f).

-Poursuite des courants

Les courants rotoriques sont représentés dans les Figure (III.18.c) et (Figure III.18.d). Les deux figures montrent la bonne régulation de courants directe et la bonne poursuite de courant quadratique.

-Qualité des signaux de commande

La (Figure III.18.e) montre l'évolution des tensions rotorique (tension de commande de l'aérogénérateur) ou on constate que les amplitudes de ces tensions restent dans les limites tolérées par la MADA (né dépassent pas leurs valeurs nominales).

III.7.2. Fonctionnement en régime hyper-synchrone

La figure III.19 montre la possibilité du fonctionnement de l'aérogénérateur en mode hyper-synchrone (fonctionnement au-dessus de la vitesse du synchronisme 157rd/s). On remarque que :

- **En mode hypo-synchrone** : la puissance est fournie au réseau par le stator (puissance statorique P_s toujours de signe négatif). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator (puissance rotorique P_r toujours de signe positif, donc le rotor consomme). À noter qu'avec une MAS, on ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.
- **En mode hyper-synchrone** la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s négatif) et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau (P_r négatif, donc le rotor fournit aussi de la puissance au réseau). À noter qu'avec une MAS, on peut également avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement (P_r) est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

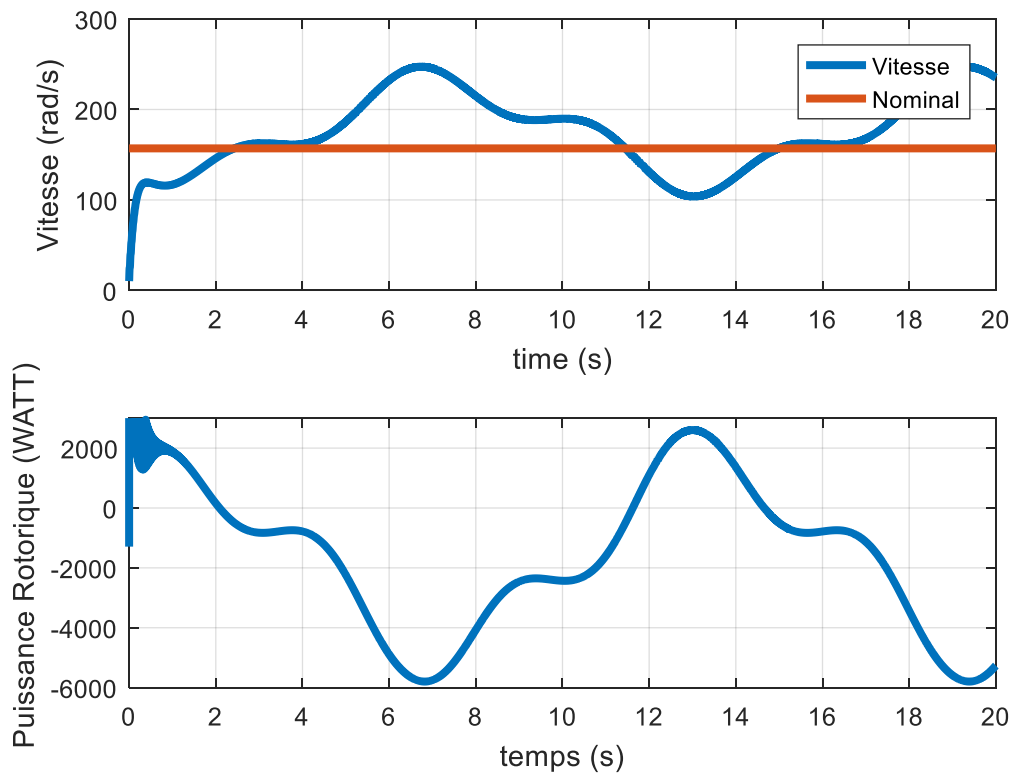
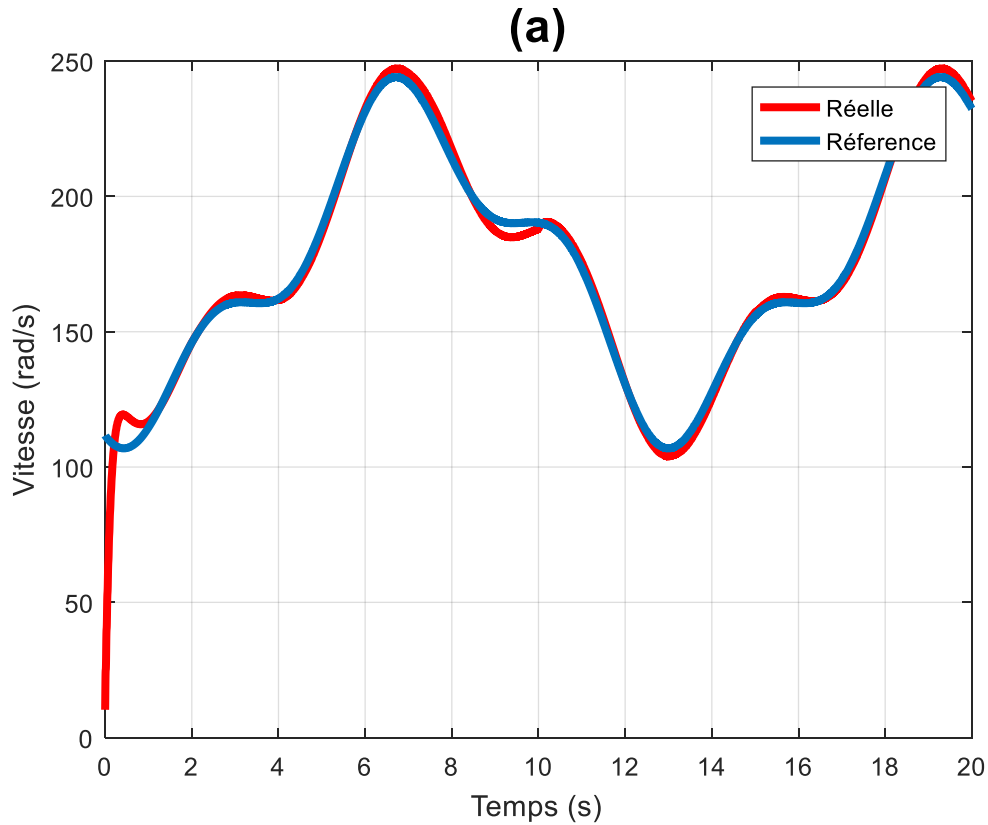


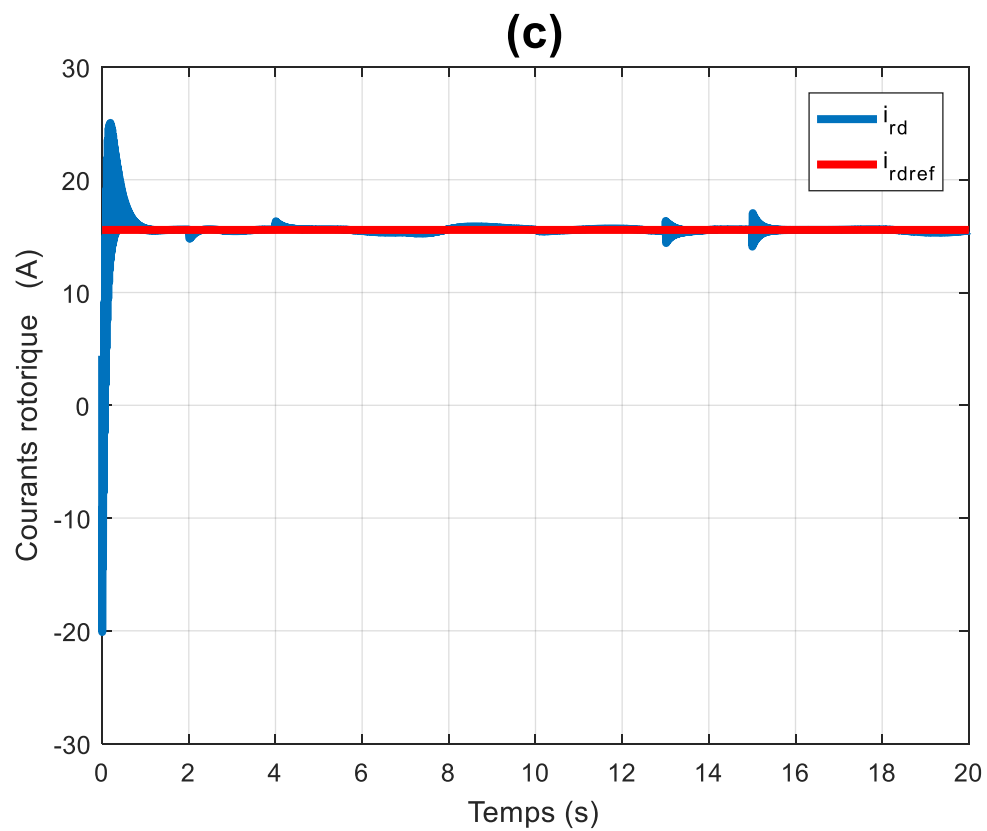
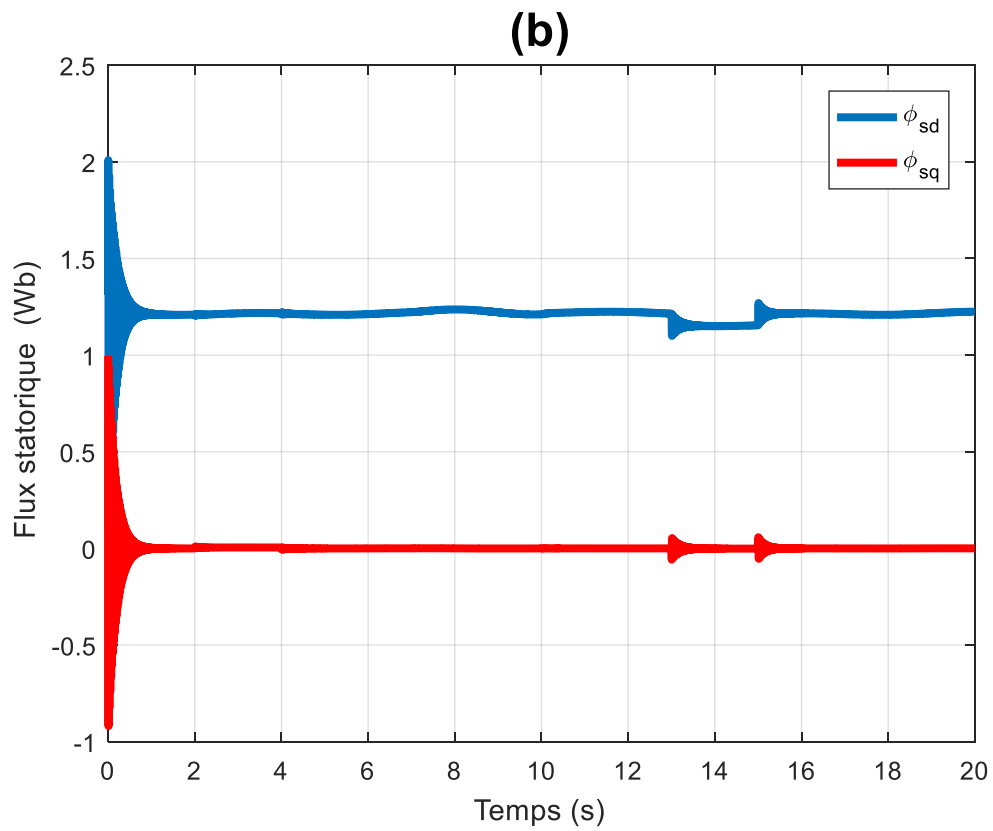
Figure III.19 : Puissance active du stator et du rotor en modes hypo/hyper-synchrone

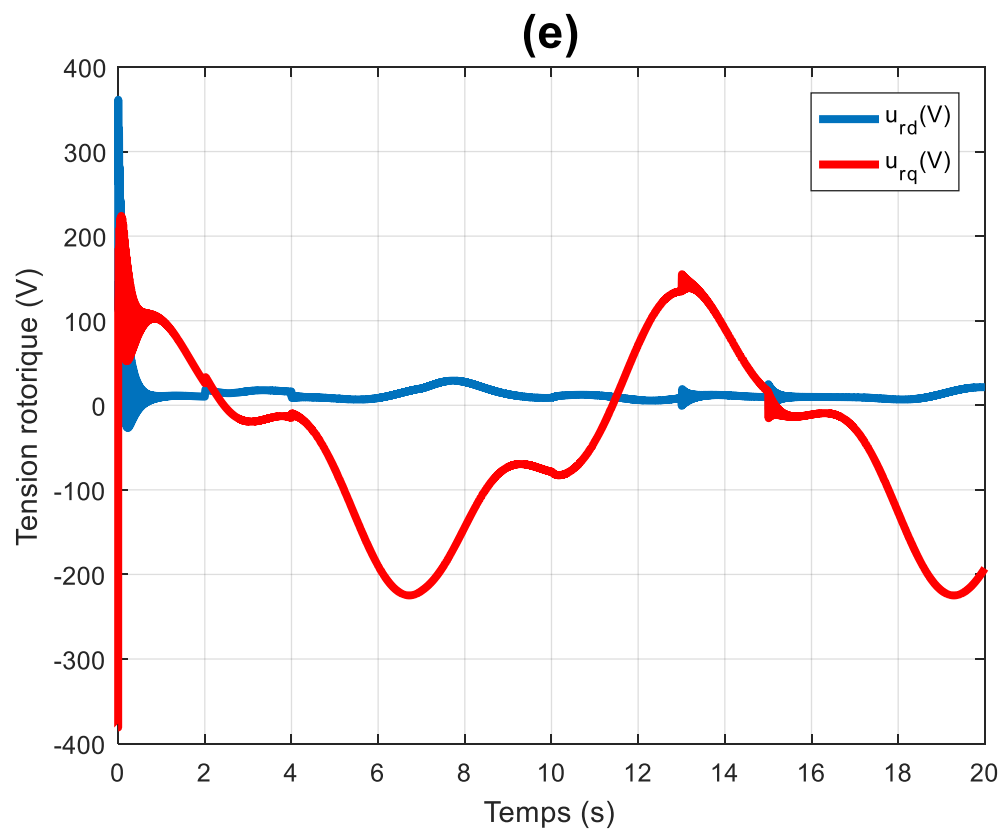
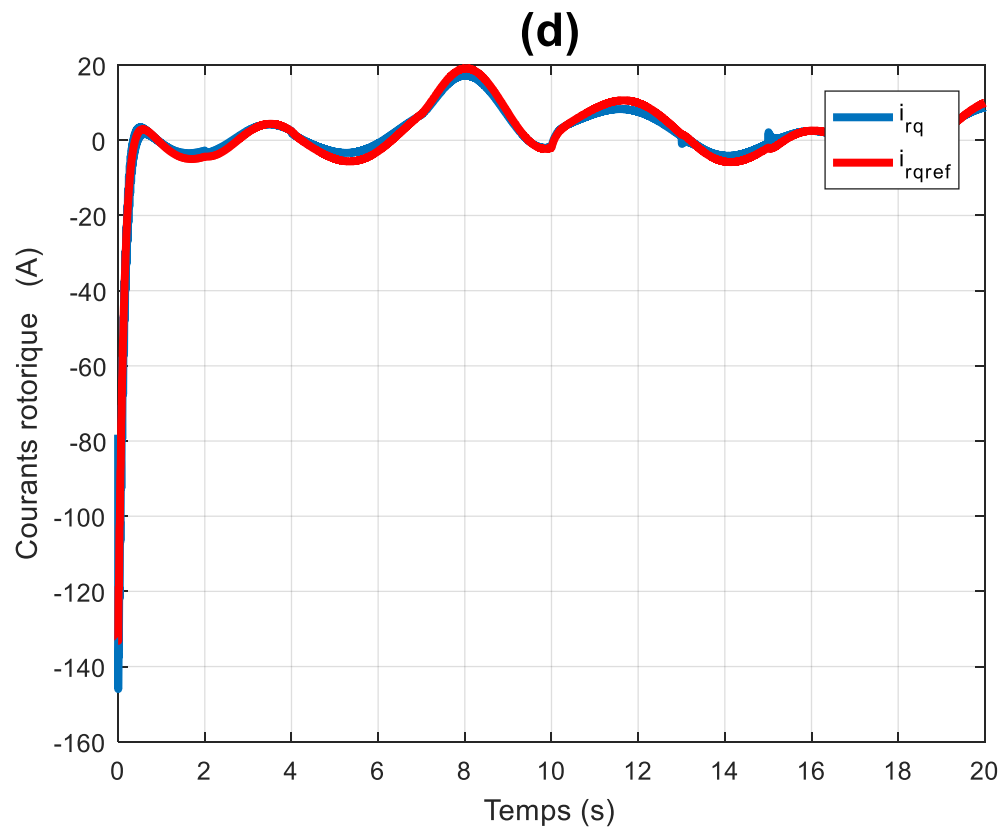
III.7.3. Test de robustesse

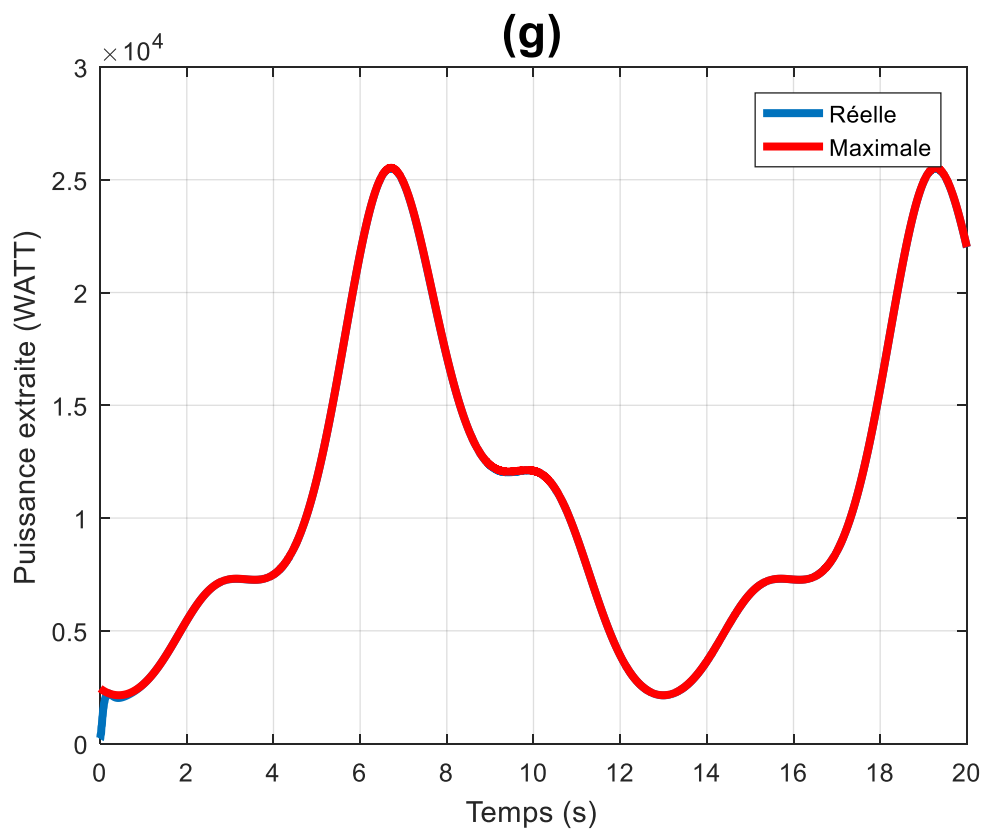
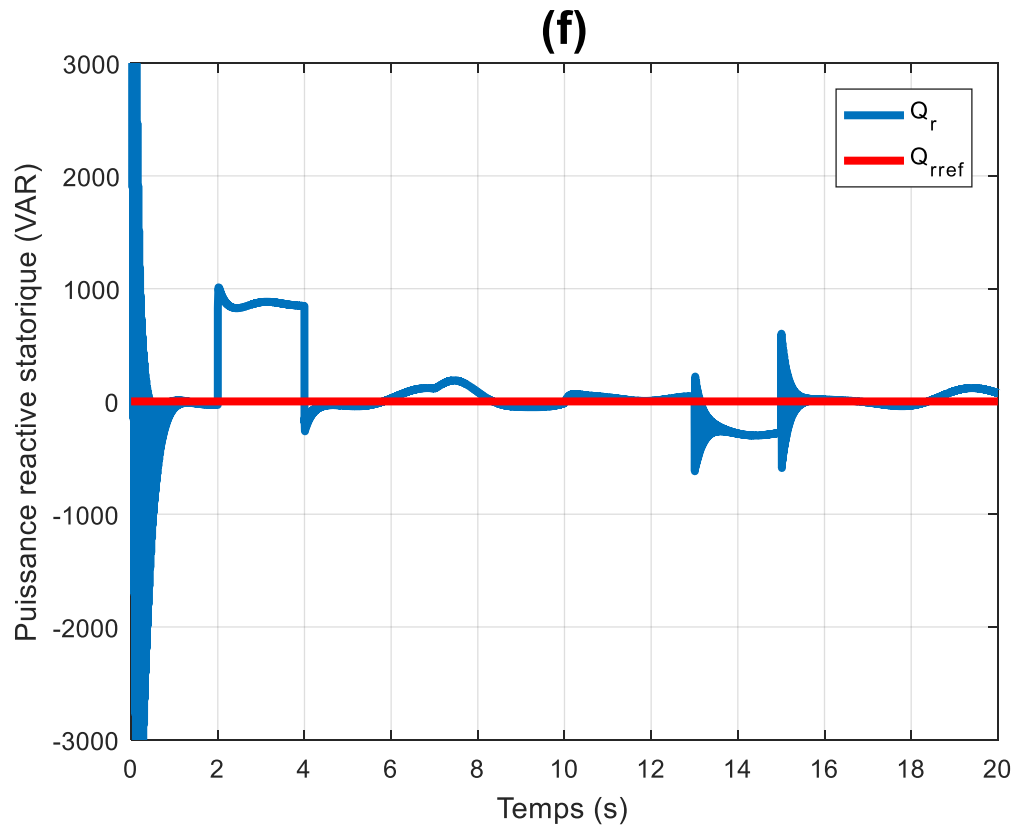
Afin de tester la robustesse de la commande utilisée (commande vectorielle), des changements paramétriques ont été appliqués sur le système éolien.

- Paramètres électriques : variation de -80% de l'inductance mutuelle (M), variation de 300% des inductance propres (L_r et L_s), et variation de 50% des résistance (R_r et R_s) à $t=3s$ jusqu'à $t=5s$
- Paramètres mécaniques : à l'instant $t=8s$ jusqu'à $t=10s$ une variation de 500% de coefficient de frottement (f_r) une variation de 300% de l'inertie (J).
- Paramètres du réseau : variation de 10% de la fréquence (f) introduite à $t=13s$ jusqu'à $t=15s$.









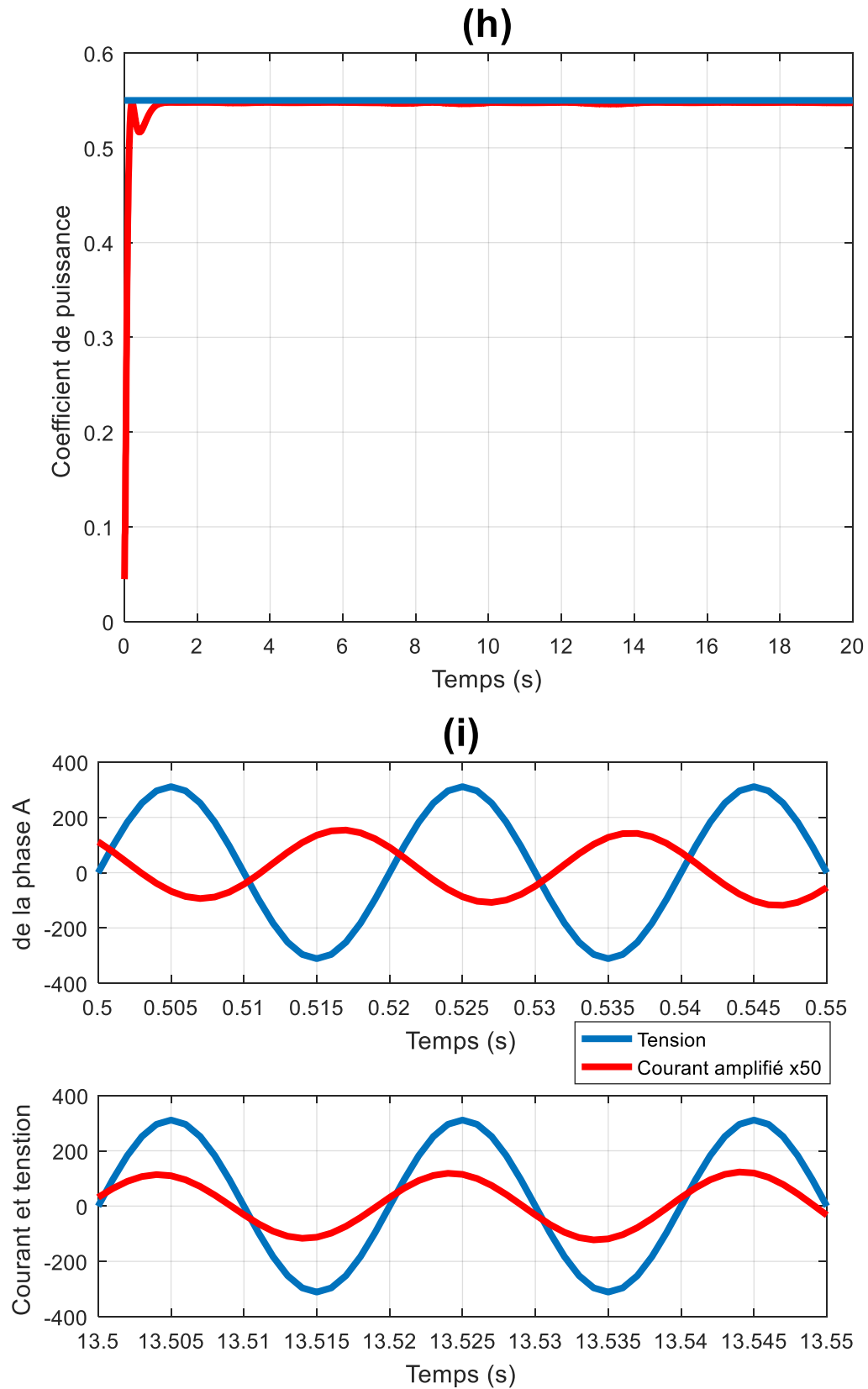


Figure III.20 : Résultats de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

L'analyse des résultats obtenus se fait toujours en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

✓ *Découplage*

La figure (III.20.b) montre une perte de découplage entre le flux statorique et le couple de la GADA lors des variations paramétriques. Cette rupture de découplage affecte directement la dynamique globale du système.

✓ *Production de puissance maximale (MPPT)*

La figure (III.20.a) indique que la vitesse de rotation ne suit plus sa trajectoire optimale. Cette déviation impacte immédiatement la puissance extraite, qui cesse d'être maximale, comme illustré dans la figure (III.20.g).

✓ *Production avec un facteur de puissance statorique unitaire*

À $t = 13$ s, avec l'apparition des variations paramétriques, le courant statorique n'est plus en opposition de phase ($\varphi < 180^\circ$) par rapport à la tension du réseau (figures (III.20.f) et (III.20.i)). Le système ne fonctionne donc plus à facteur de puissance unitaire et commence à échanger de la puissance réactive.

✓ *Poursuite des courants*

Les courants rotoriques présentés dans les figures (III.20.c) et (III.20.d) montrent une dégradation notable de la qualité de poursuite dès l'application des perturbations paramétriques. Le cahier des charges n'est plus respecté dans ces conditions.

✓ *Qualité des signaux de commande*

La figure (III.20.e) met en évidence une augmentation de l'effort de commande (tensions rotoriques). Le contrôleur tente naturellement de compenser les perturbations, mais cette hausse peut devenir problématique si les variations paramétriques augmentent, au risque de dépasser les limites admissibles de la machine.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse a porté sur la commande linéaire d'un aérogénérateur basé sur une GADA en utilisant la commande vectorielle orientée flux. Cette méthode permet de piloter la machine d'une manière comparable à une machine à courant continu, avec un découplage clair entre les grandeurs électromagnétiques internes.

Commande linéaire de l'aérogénérateur à base de GADA

La stratégie MPPT a été intégrée afin d'assurer l'extraction de la puissance maximale disponible dans le vent. Les simulations montrent que cette commande offre de bonnes performances dans des conditions normales de fonctionnement. Néanmoins, les résultats mettent en évidence une sensibilité notable aux variations paramétriques, aux perturbations externes et à la dynamique non linéaire du système. Ces limites réduisent l'efficacité de la commande linéaire dès que le fonctionnement s'éloigne du régime nominal. Compte tenu de la nature non linéaire et multivariable de l'aérogénérateur, ainsi que des perturbations auxquelles il est exposé, il devient nécessaire d'adopter des stratégies de commande plus robustes. Le chapitre 4 sera donc consacré à l'étude et au développement d'approches de commande non linéaires, mieux adaptées aux exigences réelles du système.

Chapitre 4

Commande par

Backstepping de

l'aérogénérateur à base

de la GADA

Chapitre IV

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de MADA

IV.1. Introduction

Dans la commande des systèmes non linéaires, les approches classiques montrent rapidement leurs limites. Les systèmes réels présentent en effet des dynamiques complexes, fortement non linéaires, ce qui rend nécessaire l'utilisation de stratégies de commande avancées, mieux adaptées et plus performantes. Dans ce contexte, d'importants progrès ont été réalisés au cours des dernières décennies. Parmi ces avancées, la technique du Backstepping occupe une place particulière. Elle repose sur une décomposition du système global, souvent multivariable (MIMO) et d'ordre élevé, en une cascade de sous-systèmes élémentaires de premier ordre, facilitant ainsi la conception d'une loi de commande stabilisante.

Ce chapitre commence par un rappel des notions de stabilité, notamment au sens de Lyapunov. La méthodologie du Backstepping est ensuite présentée pour un système d'ordre n sous forme strictement triangulaire inférieure, condition indispensable à son application. Le modèle de la MADA est ensuite reformulé afin d'être compatible avec cette approche. Le chapitre se termine par des résultats de simulation illustrant les performances de la commande développée.

IV.2 Stabilité des systèmes non linéaires

IV.2.1 Définitions

➤ Équilibre

Physiquement, un système est en équilibre lorsqu'il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela est équivalent à dire que la dérivée de son vecteur d'état est nulle [73]. Pour un système :

$$\dot{x} = \varphi(x) \quad (\text{IV.1})$$

L'état (ou les états) d'équilibre est la solution de l'équation algébrique :

$$\varphi(x) = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Dans le cas linéaire : $\varphi(x) = Ax$, alors, l'on comprend qu'il peut exister un seul ou plusieurs états d'équilibre selon le rang de la matrice A . Si A est régulière, alors il existe un seul état d'équilibre qui est l'origine ($x = 0$). Dans le cas contraire (A est singulière) alors, il existe une infinité d'états d'équilibre.

Dans le cas non linéaire : La solution est moins évidente et l'origine n'est pas forcément un point d'équilibre, c.-à-d. le système peut avoir plusieurs points d'équilibre [7,10].

➤ la stabilité

De façon générale, on dit qu'un système est stable, s'il est déplacé de sa position d'équilibre, il tend à y revenir; instable, s'il tend à s'en écarter d'avantage.

➤ Stabilité selon Lyapunov

Considérons le système invariable décrit par l'équation suivante :

$$\dot{x} = f(x) \quad (\text{IV.3})$$

Commençons à l'état initial $x(0)$. Supposons que x_e est un point d'équilibre du système, $f(x_e) = 0$. Nous disons que le point d'équilibre est :

➤ Stable, si pour chaque $\varepsilon > 0$ existe, $\delta(\varepsilon) > 0$ tel que :

$$\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < \varepsilon, \text{ pour tout, } t \geq 0.$$

➤ Asymptotiquement stable, s'il est stable et en plus il existe $r > 0$ tel que,

$$\|x(0) - x_e\| < r \Rightarrow x(t) \rightarrow x_e, \text{ lorsque, } t \rightarrow \infty.$$

➤ Globalement asymptotiquement stable, s'il est asymptotiquement stable pour tous les états initiaux.

IV.2.2 Méthode d'analyse de la stabilité

On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité : la méthode de linéarisation et la méthode directe. La première concerne la stabilité locale autour d'un point d'équilibre. Par contre, la deuxième détermine la stabilité des systèmes en construisant une fonction scalaire des états du système dont on examinera la variation temporelle. Par la suite on s'intéressera par la méthode directe de Lyapunov, car le Backstepping est basé sur cette méthode.

a) Première méthode de Lyapunov (Méthode de linéarisation)

Le principe de cette méthode consiste à étudier la stabilité d'un système en considérant sa version linéarisée [74].

Théorème 1 : (Première méthode de Lyapunov)

- Si le système linéarisé est asymptotiquement stable (ou instable), alors le système est asymptotiquement stable (ou instable).
- Si le système linéarisé est simplement stable, on ne peut rien dire quant à la stabilité du système, c'est le cas critique de Lyapunov. Dans ce cas, la stabilité ou l'instabilité dépend des termes de puissance supérieure à un et négligés lors de la linéarisation du système.

b) Deuxième méthode de Lyapunov (Méthode directe)

Le principe de cette méthode repose sur le concept d'énergie dans un système [73]. L'énergie dans un système physique est une fonction définie positive, elle reste constante si le système est conservatif, elle décroît si le système est dissipatif. Dans les deux cas, on peut dire que le système est stable. Par contre, le système est dit instable si son énergie croît. Cette méthode consiste à étudier les variations d'une fonction (représentative de l'énergie du système) le long de la trajectoire du système.

Théorème 2 : (Deuxième méthode de Lyapunov)

On considère le système : $\dot{x} = f(x)$ et la fonction scalaire $V(x)$ telle que :

- Nulle à l'origine $V(0) = 0$,
- Définie positive, c.-à-d., $V(x) > 0 \quad \forall x \neq 0$,
- Radialement non bornée $V(x) \rightarrow \infty$ si $x \rightarrow \infty$.

Si la dérivée temporelle de $V(x)$ est définie négative ($\dot{V}(x) < 0$), donc l'équilibre est asymptotiquement stable,

- est semi-définie négative ($\dot{V}(x) \leq 0$), donc l'équilibre est simplement stable,
- est définie positive ($\dot{V}(x) > 0$), il y a instabilité.

Lemme de Barbalat [75]

Si $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t f(\tau) d\tau$ existe et est finie, et $f(t)$ est une fonction uniformément continue, alors $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$.

Dans le paragraphe qui suit, nous introduisons un rappel sur la technique du Backstepping.

IV.3 Commande par Backstepping

La commande par Backstepping est une méthode de conception dédiée aux systèmes de forme dite *strict-feedback* (c.-à-d. triangulaire) [4, 16]. Dans cette section, nous présentons dans

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

un premier temps un bref historique sur la commande par Backstepping (non-adaptative). Ensuite, nous faisons un rappel sur le principe général de cette commande.

IV.3.1 Bref historique sur la commande par Backstepping

La technique de Backstepping a été développée par Kanellakopoulos et al [76]. en 1991, elle est inspirée des travaux initiaux de Feurer et Morse [77] Tsinias [78], Kokotovic et Sussmann [79]. Cette technique est une méthode systématique et récursive de synthèse des lois de commande non linéaire. Elle utilise également le principe de stabilité de Lyapunov et peut s'appliquer à une classe relativement large des systèmes non linéaires ayant une forme dite triangulaire inférieure.

IV.3.2 Principe de la commande par Backstepping

La plupart des techniques de commande non linéaire sont basées sur la théorie de la stabilité de Lyapunov. L'objectif est de trouver une loi de commande qui rend la dérivée d'une fonction de Lyapunov, choisie a priori, définie ou semi-définie négative. La principale difficulté réside alors dans le choix d'une fonction de Lyapunov convenable. La technique du Backstepping surmonte cette difficulté en construisant progressivement une fonction de Lyapunov adaptée au système, et permet de déduire la commande qui rend la dérivée de cette fonction définie négative [74].

Le principe de la commande par Backstepping est illustré par la Figure (IV.1) Tout d'abord, nous calculons la première commande virtuelle à partir de l'erreur de poursuite

$e_1 = x_1 - y_r$, qui va être utilisée au second étage en tant que signal de référence pour l'état suivant. L'opération est répétée jusqu'au $n^{ème}$ étage qui nous permet d'avoir la commande réelle à appliquer par la suite au système [73].

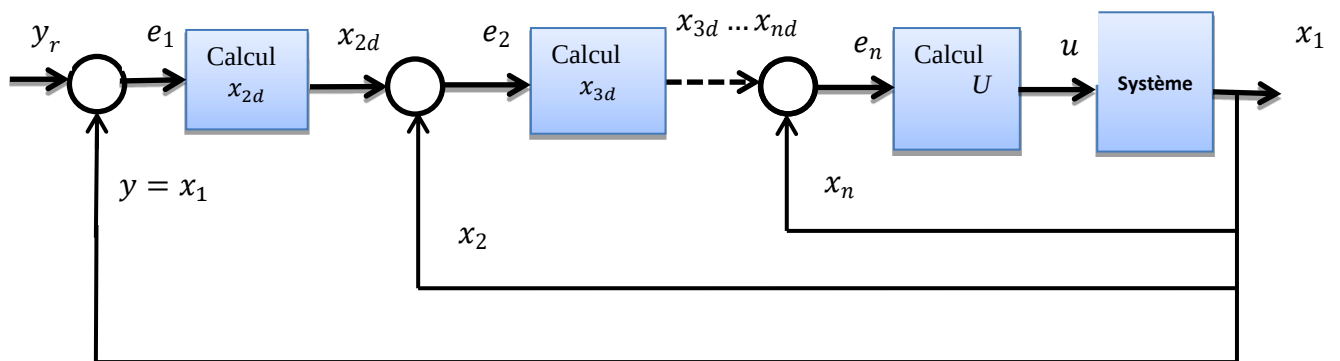


Figure IV.1: Schéma de principe de la commande par Backstepping

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Afin de comprendre la synthèse d'une loi de commande avec la technique Backstepping, nous allons concevoir une commande par Backstepping pour un système d'ordre n ayant une forme strict-feedback donné par [50, 75-76] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) + g_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)x_{i+1}, i = 3, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)u \\ y = x_1 \end{array} \right. \quad (IV.4)$$

Où $\dot{x}_i$, $i = 3, \dots, n$ sont les états du système, u et y sont respectivement l'entrée et la sortie du système, $f_i(\cdot)$ et $g_i(\cdot)$ sont des fonctions non linéaires continues, avec $f_i(0) = 0$ (l'origine est un point d'équilibre).

Notons que :

$g_i(x) \neq 0, \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ et $i = 1, \dots, n-1$ (c'est une condition de commandabilité).

L'objectif est de concevoir une commande u qui permet de forcer la sortie du système y à suivre une sortie désirée. y_r . Ou $\dot{y}_r$, $\ddot{y}_r$ et $y_r^{(n)}$ sont supposées connues et uniformément bornée. aussi on suppose que toutes les fonctions $f_i(\cdot)$, $g_i(\cdot)$ $i = 1, \dots, n$ sont connues.

La synthèse de la commande par Backstepping se déroulera en $n-2$ étapes.

Première étape

La procédure itération commence par le premier sous-système donné par :

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad (IV.5)$$

Puisque x_2 n'est pas en fait la commande réelle de x_1 , nous la considérons alors comme une commande virtuelle (appelée aussi *commande intermédiaire* ou *fonction stabilisante*) qui peut rendre la fonction de Lyapunov définie négative et qui garantit la convergence de la sortie x_1 vers sa valeur désirée x_{1d} . La première référence désirée est notée :

$$x_{1d} = \alpha_0 = y_r \quad (IV.6)$$

L'erreur de poursuite est définie comme :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (IV.7)$$

Ainsi sa dynamique est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 \\ &= f_1 + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0 \end{aligned} \quad (IV.8)$$

Pour un tel sous système, nous construisons tout d'abord la première fonction candidate de Lyapunov de type quadratique suivante (qui représente l'énergie de l'erreur) :

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (IV.9)$$

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(e_1) &= e_1 \dot{e}_1 \\ &= e_1 [f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0]\end{aligned}\quad (IV.10)$$

Le but est choisir la commande virtuelle qui rend la dérivée de la fonction de Lyapunov $\dot{V}_1$ définie négative, alors on pose :

$$x_{2d} = \alpha_1 = \frac{1}{g_1} [-f_1 - k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0] \quad (IV.11)$$

Où k_1 est un paramètre de conception positif.

Remplacement de cette commande, dans la dérivée de la fonction de Lyapunov (IV. 6), donne

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + g_1 e_1 e_2 \quad (IV.12)$$

Le terme $g_1 e_1 e_2$ sera annulé dans l'étape suivante.

❖ Deuxième étape

Comme dans la première étape, on fait appel au sous-système qui décrit la dynamique de la deuxième variable d'état :

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \quad (IV.13)$$

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande virtuelle pour le sous-système précédent (IV. 5) :

$$x_{2d} = \alpha_1 \quad (IV.14)$$

D'où l'erreur de poursuite est :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (IV.15)$$

La dynamique des erreurs de poursuite e_1 et e_2 et donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1 e_1 + g_1 e_2 \\ \dot{e}_2 = f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1 \end{cases} \quad (IV.16)$$

Et la nouvelle fonction de Lyapunov devient une version augmentée de la précédente :

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2] \quad (IV.17)$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [f_2 + g_2 x_3 + g_1 e_1 - \dot{\alpha}_1] \quad (IV.18)$$

Un choix adéquat de la valeur désirée (c.-à-d., la commande stabilisante) de x_3 peut être donné par :

$$x_{3d} = \alpha_2 = \frac{1}{g_2} [-f_2 - g_1 e_1 - k_2 e_2 + \dot{\alpha}_1] \quad (IV.19)$$

Où k_2 est un paramètre de conception positif, et $\dot{\alpha}_1$ peut être calculé analytiquement comme suit :

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_1} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (\text{IV.20})$$

Un tel choix implique que :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + g_2 e_2 e_3 = - \sum_{j=1}^2 k_j e_j^2 + g_2 e_2 e_3 \quad (\text{IV.21})$$

❖ **La $i^{\text{ème}}$ étape (pour $i = 2, \dots, n-1$)**

La $i^{\text{ème}}$ sous système est :

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) + g_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) x_{i+1} \quad (\text{IV.22})$$

La commande virtuelle de ce sous système est x_{i+1} . La nouvelle référence désirée est :

$$x_{(i+1)d} = \alpha_i \quad (\text{IV.23})$$

L'erreur de poursuite correspondant est donnée par :

$$e_i = x_i - \alpha_{i-1} \quad (\text{IV.24})$$

Donc, la dynamique des erreurs de poursuite devient :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1 e_1 + g_1 e_2 \\ \dot{e}_2 = -g_1 e_1 - k_2 e_2 + g_2 e_3 \\ \dot{e}_i = f_i + g_i x_i - \dot{\alpha}_{i-1}, (i = 3, \dots, n-1) \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

La loi de la commande virtuelle est conçue pour rendre définie négative la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V_i(e_1, e_2, \dots, e_i) = V_{i-1}(e_1, e_2, \dots, e_{i-1}) + \frac{1}{2} e_i^2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_i^2] \quad (\text{IV.26})$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(e_1, e_2, \dots, e_i) &= \dot{V}_{i-1}(e_1, e_2, \dots, e_{i-1}) + e_i \dot{e}_i \\ &= - \int_{j=1}^{i-1} k_j e_j^2 + e_i [f_i + g_i x_{i+1} + g_{i-1} e_{i-1} - \dot{\alpha}_{i-1}] \end{aligned} \quad (\text{IV.27})$$

Un choix approprié de la commande x_{i+1} peut-être :

$$x_{(i+1)d} = \alpha_i = \frac{1}{g_i} [-f_i - g_{i-1} e_{i-1} - k_i e_i + \dot{\alpha}_{i-1}] \quad (\text{IV.28})$$

où k_i est paramètre de conception positif et $\dot{\alpha}_{i-1}$ peut être calculée analytiquement comme suit :

$$\dot{\alpha}_{i-1} = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial t} = \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} \dot{x}_k + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{(k-1)}} y_r^{(k)} \quad (\text{IV.29})$$

À partir de (IV.24), l'expression (IV.23) devient :

$$\dot{V}_i = -k_1 e_1^2 - \dots - k_i e_i^2 + g_i e_i e_{i+1} = - \sum_{j=1}^i k_j e_j^2 + g_i e_i e_{i+1} \quad (\text{IV.30})$$

Le terme $g_i e_i e_{i+1}$, sera annulé dans l'étape dernière étape (c.-à-d., dans l'étape n).

❖ **La $n^{\text{ème}}$ étape**

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

A l'étape n , on remarque que la commande virtuelle de ce sous système n'est que la commande u du système global. De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$x_{nd} = \alpha_{n-1} \quad (IV.31)$$

L'erreur de poursuite est déterminée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1 e_1 + g_1 e_2 \\ \dot{e}_2 = -g_1 e_1 - k_2 e_2 + g_2 e_3 \\ \dot{e}_i = f_i + g_i x_i - \dot{\alpha}_{i-1}, (i = 3, \dots, n-1) \\ \dot{e}_n = f_n + g_n u - \dot{\alpha}_{n-1} \end{cases} \quad (IV.32)$$

Pour la stabilisation de tout le système(IV. 29), la fonction de Lyapunov globale est :

$$V_n(e_1, e_2, \dots, e_n) = V_{n-1}(e_1, e_2, \dots, e_{n-1}) + \frac{1}{2} e_n^2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2] \quad (IV.33)$$

La dérivée temporelle de cette fonction est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_n(e_1, e_2, \dots, e_n) &= \dot{V}_{n-1}(e_1, e_2, \dots, e_{n-1}) + e_n \dot{e}_n \\ &= -\sum_{j=1}^{n-1} k_j e_j^2 + e_n [f_n + g_n u + g_{n-1} e_{n-1} - \dot{\alpha}_{n-1}] \end{aligned} \quad (IV.34)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier. Pour garantir la stabilité de la dynamique(IV.29), la loi de commande u est choisie comme suit :

$$u = \frac{1}{g_n} [-f_n - g_{n-1} e_{n-1} - k_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1}] \quad (IV.35)$$

où k_n est un paramètre de conception positif.

Le remplacement de cette commande dans (IV.32) donne :

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 = -\sum_{j=1}^n k_j e_j^2 \leq 0 \quad (IV.36)$$

Selon l'approche de Lyapunov, le système en boucle fermée un point d'équilibre globalement asymptotiquement stable (GAS) a $e_j = 0$.

La stabilité du système est prouvée en utilisant des simples fonctions de Lyapunov quadratiques. L'avantage principal de la technique du Backstepping est sa flexibilité par le choix simple des fonctions stabilisantes α_i sans l'élimination des non-linéarités afin de rendre négative la fonction V_i .

IV.4. Stratégie de commande de l'aérogénérateur

La commande non linéaire de l'aérogénérateur poursuit les mêmes objectifs que la commande linéaire : maximiser la puissance active injectée au réseau en respectant la loi MPPT, tout en minimisant les pertes liées à la puissance réactive au stator de la GADA.

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Le chapitre précédent a présenté la synthèse d'une commande linéaire basée sur la commande vectorielle avec régulateurs PI.

D'après la relation de la puissance réactive (II.46), l'objectif est d'imposer une puissance réactive nulle. Pour y parvenir, il est nécessaire de réguler le flux statorique de la machine à la valeur suivante ::

$$\phi_{ds_ref} = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (IV.37)$$

Considérons le modèle constitué par les trois équations habituelles (dynamiques des courants rotoriques et équation mécanique) auxquelles on ajoute une quatrième équation (dynamique de la puissance réactive):

$$\begin{cases} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{pM}{JL_s}(\phi_{ds}i_{qr}) + \frac{1}{J}\left(\frac{p_t}{\Omega}\right) - \frac{f_r}{J}\Omega \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \omega \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} \\ \frac{d\phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} \end{cases} \quad (IV.38)$$

Prenons :

$$\dot{x}_1 = \frac{d\Omega}{dt} \quad , \quad \dot{x}_2 = \frac{di_{qr}}{dt} \quad , \quad \dot{x}_3 = \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad , \quad \dot{x}_4 = \frac{di_{dr}}{dt}$$

Sous forme compacte, l'équation (IV.38) devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 + g_1 x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2 + g_2 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = f_3 + g_3 x_4 \\ \dot{x}_4 = f_4 + g_4 v_{dr} \end{cases} \quad (IV.39)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} f_1 = \frac{1}{J} \left(\frac{p_t}{\Omega} \right) - \frac{f_r}{J} \Omega \\ g_1 = \frac{pM}{JL_s} \cdot \phi_{ds} \\ f_2 = -\gamma_r \cdot i_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \omega \cdot \beta \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} \\ g_2 = \frac{1}{\sigma_r} \\ f_3 = -\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + v_{ds} \\ g_3 = \alpha_s \cdot M \\ f_4 = -\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \phi_{ds} - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} \\ g_4 = \frac{1}{\sigma_r} \end{cases}$$

Par rapport aux travaux réalisés dans [50,80-81] cette stratégie présente les avantages suivants :

- La vitesse est indirectement contrôlée sans avoir besoin d'un troisième régulateur (de vitesse).
- Le contrôle de la puissance réactive se fait à travers le flux et le courant direct.

IV.5. Application de la commande par Backstepping à l'aérogénérateur

Le degré relatif du système est égal à deux, donc la recherche de la commande par Backstepping se fait en deux étapes.

- Étape 1

La procédure itération commence par le premier sous-système donné par :

$$x_{1d} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v \cdot G}{R} = \alpha_0 \quad (IV.40)$$

$$x_{3d} = \frac{V_s}{W_s} = \alpha_2 \quad (IV.41)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{pM}{JL_s} (\phi_{ds} i_{qr}) + \frac{1}{J} \left(\frac{p_t}{\Omega} \right) - \frac{f_r}{J} \quad (IV.42)$$

$$\dot{x}_3 = -\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + v_{ds} \quad (IV.43)$$

On définit les erreurs de poursuite de la vitesse de rotation

$$e_1 = x_1 - \frac{\lambda_{opt} \cdot v \cdot G}{R} \quad (IV.44)$$

$$e_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (IV.45)$$

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Leurs dérivées sont :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{IV.46})$$

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 \quad (\text{IV.47})$$

$$\dot{e}_1 = \frac{pM}{JL_s}(\Lambda i_{qr}) + \frac{1}{J}\left(\frac{p_t}{\Omega}\right) - \frac{f_r}{J} - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{IV.48})$$

$$\dot{e}_3 = -\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + v_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} - \dot{\alpha}_2 \quad (\text{IV.49})$$

On choisit la fonction de lyapunov :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{IV.50})$$

$$V_3 = \frac{1}{2} e_3^2 \quad (\text{IV.51})$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left(\frac{pM}{JL_s}(\phi_{ds} i_{qr}) + \frac{1}{J}\left(\frac{p_t}{\Omega}\right) - \frac{f_r}{J} - \dot{\alpha}_0 \right) \quad (\text{IV.52})$$

$$\dot{V}_3 = e_3 \dot{e}_3 = e_3 (-\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + v_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} - \dot{\alpha}_2) \quad (\text{IV.53})$$

Le but est choisir la commande virtuelle qui rend la dérivée de la fonction de Lyapunov définie négative, alors on pose :

$$i_{qr_d} = \alpha_1 = \frac{JL_s}{pM\phi_{ds}} \left(-\frac{1}{J}\left(\frac{p_t}{\Omega}\right) + \frac{f_r}{J}\Omega - k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 \right) \quad (\text{IV.54})$$

$$i_{dr_d} = \alpha_3 = \frac{1}{\alpha_s \cdot M} (+\alpha_s \cdot \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} - v_{ds} - k_3 e_3 + \dot{\alpha}_2) \quad (\text{IV.55})$$

k_1, k_3 sont des paramètres de conception positifs.

Remplacement de cette commande, dans la dérivée de la fonction de Lyapunov on obtien :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + g_1 e_1 e_2 \quad (\text{IV.56})$$

$$\dot{V}_3 = -k_3 e_3^2 + g_3 e_3 e_4 \quad (\text{IV.57})$$

Le terme $g_1 e_1 e_2$ et $g_3 e_3 e_4$ sera annulé dans l'étape suivante.

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

- Étape 2

$$\dot{x}_2 = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \omega \cdot \beta \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} \quad (\text{IV.58})$$

$$\dot{x}_4 = -\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} \quad (\text{IV.59})$$

La nouvelle référence désirée sera la variable de commande virtuelle

$$x_{2d} = i_{qr_d} = \alpha_1 \quad (\text{IV.60})$$

$$x_{4d} = i_{dr_d} = \alpha_3 \quad (\text{IV.61})$$

On définit les erreurs de poursuite des courants rotoriques :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{IV.62})$$

$$e_4 = x_4 - \alpha_3 \quad (\text{IV.63})$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (\text{IV.64})$$

$$\dot{e}_2 = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \omega \cdot \beta \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} - \dot{\alpha}_1$$

$$\dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \dot{\alpha}_3 \quad (\text{IV.65})$$

$$\dot{e}_4 = -\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \phi_{ds} - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} - \dot{\alpha}_3 \quad (\text{IV.66})$$

La nouvelle fonction de Lyapunov devient une version augmentée de la précédente :

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{IV.67})$$

$$V_4(e_3, e_4) = V_3 + \frac{1}{2} e_4^2 = \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2} e_4^2 \quad (\text{IV.68})$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= -k_1 e_1^2 + e_2 \left(\frac{p_M}{J L_s} \phi_{ds} e_1 + (-\gamma_r \cdot i_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} - \dot{\alpha}_1 \right) \end{aligned} \quad (\text{IV.69})$$

$$\dot{V}_4 = e_3 \dot{e}_3 + e_4 \dot{e}_4$$

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

$$= -k_3 e_3^2 + e_4 \left(\alpha_s \cdot M e_3 + (-\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Lambda - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds}) + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} - \dot{\alpha}_3 \right) \quad (IV.70)$$

Si on choisit une loi de commande

$$v_{qs} = \sigma_r \left(-\frac{pM}{JL_s} \Lambda e_1 - (\gamma_r \cdot i_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \omega \cdot \beta \cdot \Lambda - \beta \cdot v_{qs}) + \dot{\alpha}_1 - k_1 e_1 \right) \quad k_1 > 0 \quad (IV.71)$$

$$v_{dr} = \sigma_r \left(-\frac{M}{L_s} v_{qs} e_3 - (-\gamma_s \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Lambda - \omega \cdot \beta \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds}) + \dot{\alpha}_3 - k_3 e_3 \right) \quad k_3 > 0 \quad (IV.72)$$

Remplacent ces lois de commande dans la dérive de fonction de Lyapunov on obtient :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad (IV.73)$$

$$\dot{V}_4 = -k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 \quad (IV.74)$$

Ce qui implique que l'origine du système (e_1, e_2) , (e_3, e_4) est Globalement Asymptotiquement Stable (GAS).

Le schéma de commande général par Backtepping est présenté dans la figure suivante :

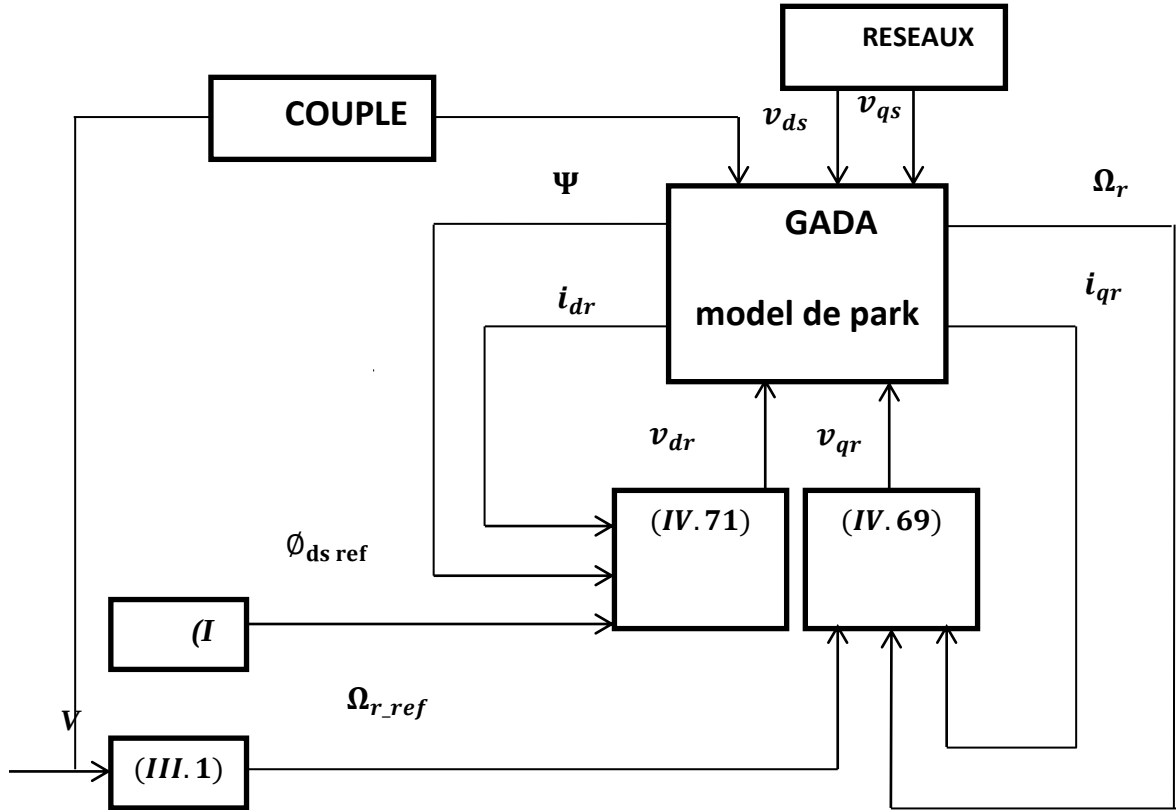


Figure IV.2 : Le schéma de commande générale non linéaire.

IV.5.1. Résultats de simulation

La commande par Backstepping a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre avec les paramètres suivants :

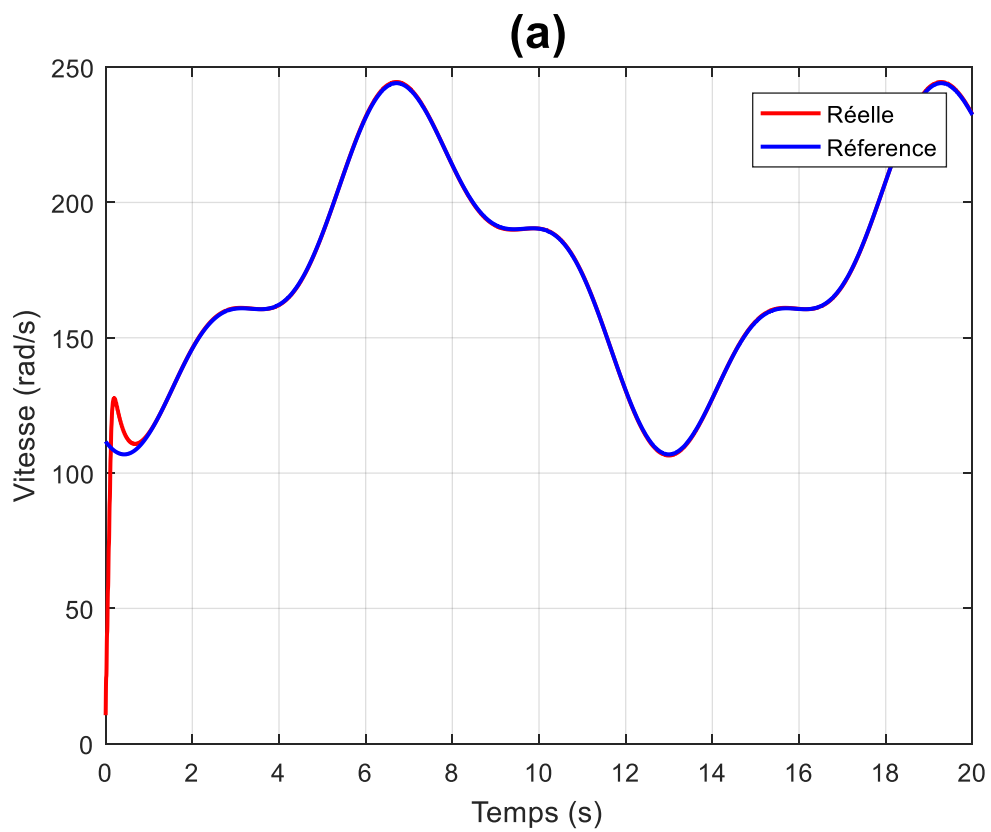
$$k_1 = 200$$

$$k_2 = 300$$

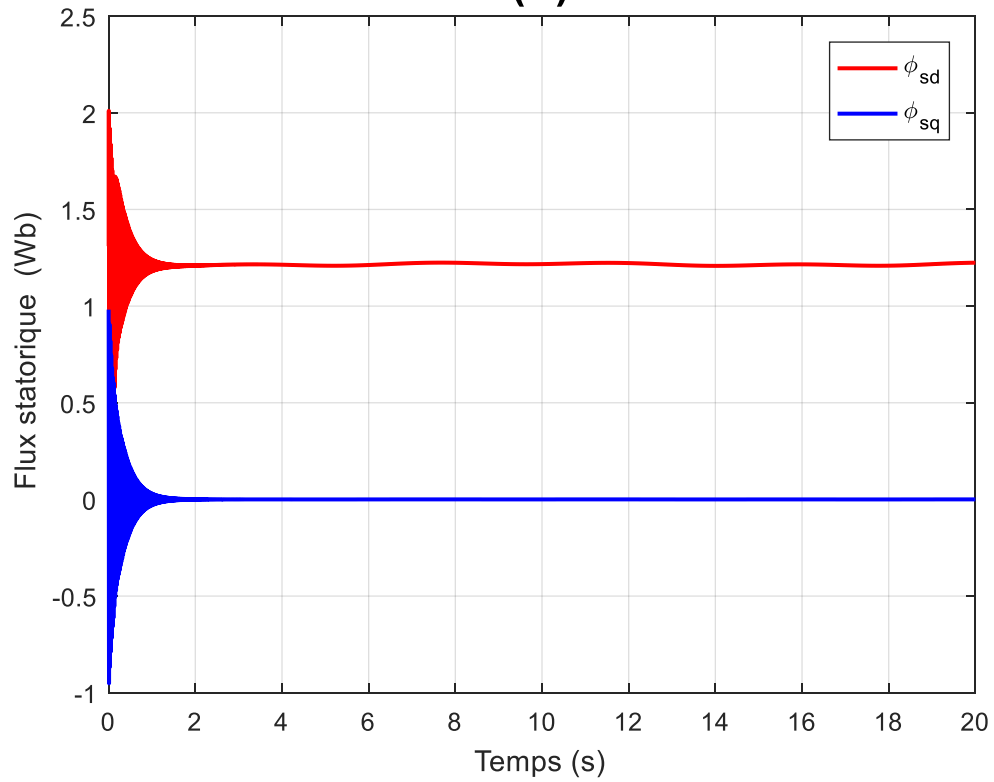
$$k_3 = 1000$$

$$k_4 = 5000.$$

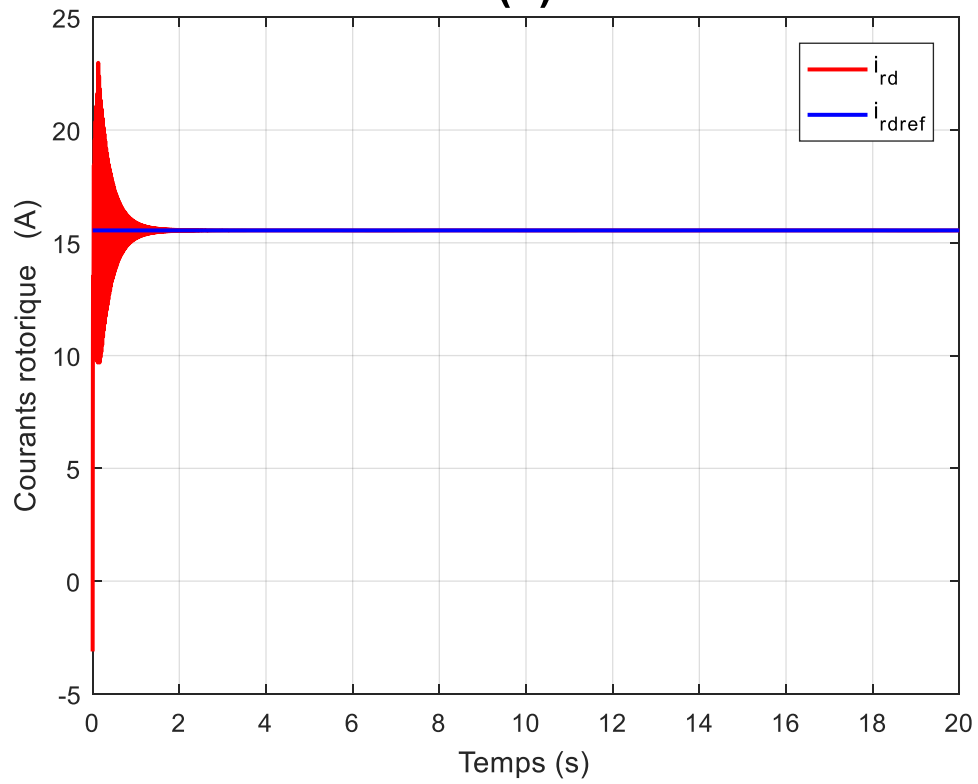
IV.5.2. Test sous les conditions nominales

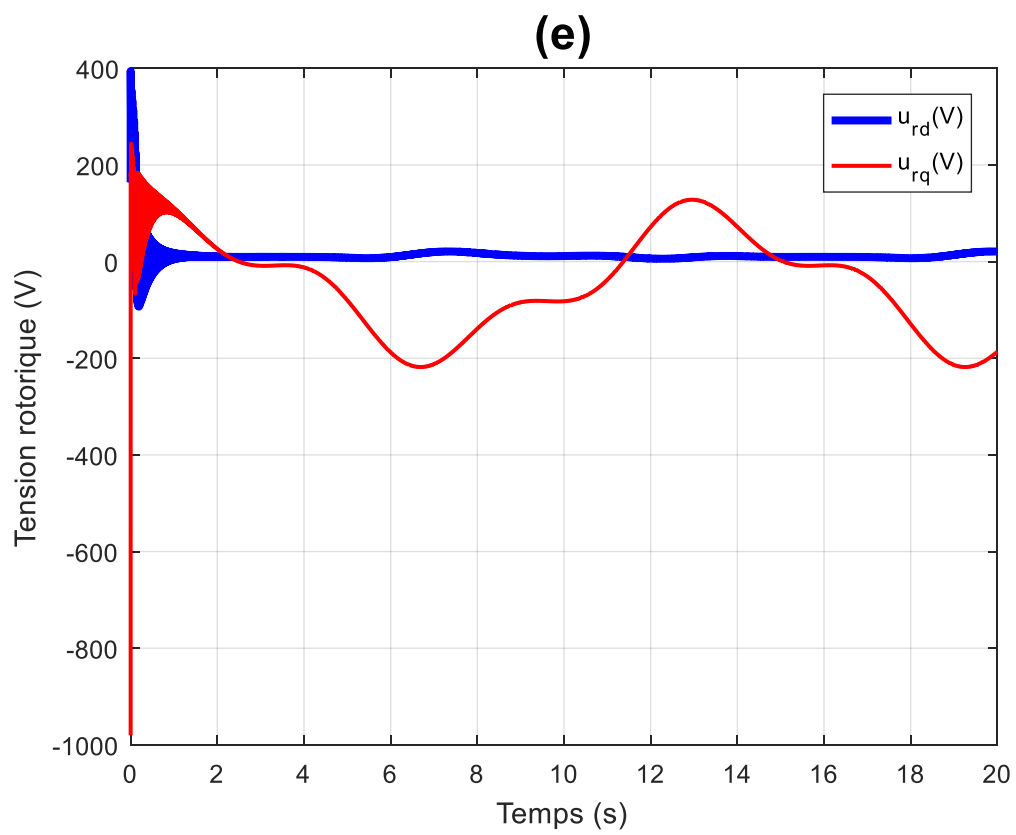
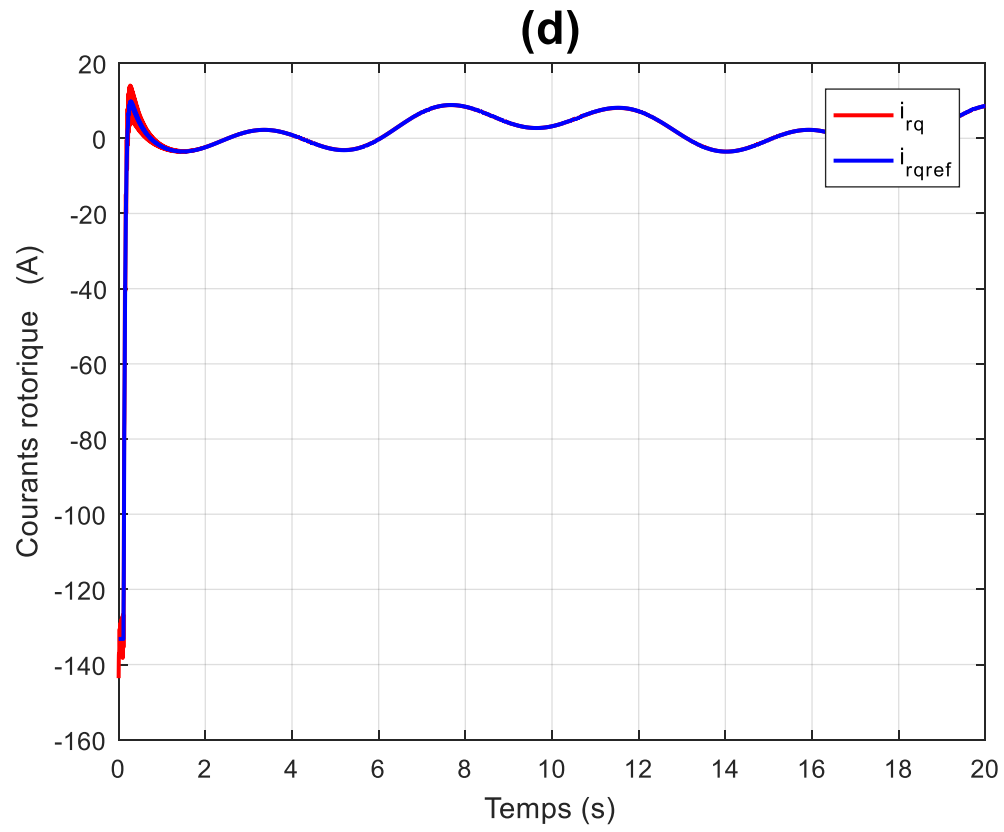


(b)

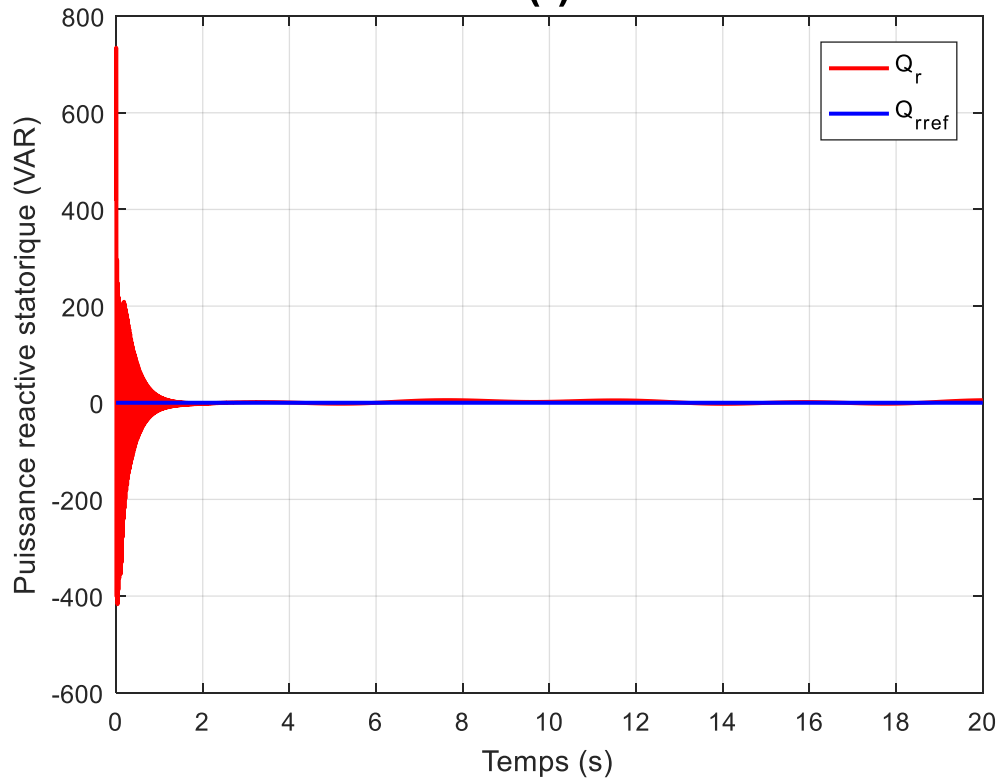


(c)

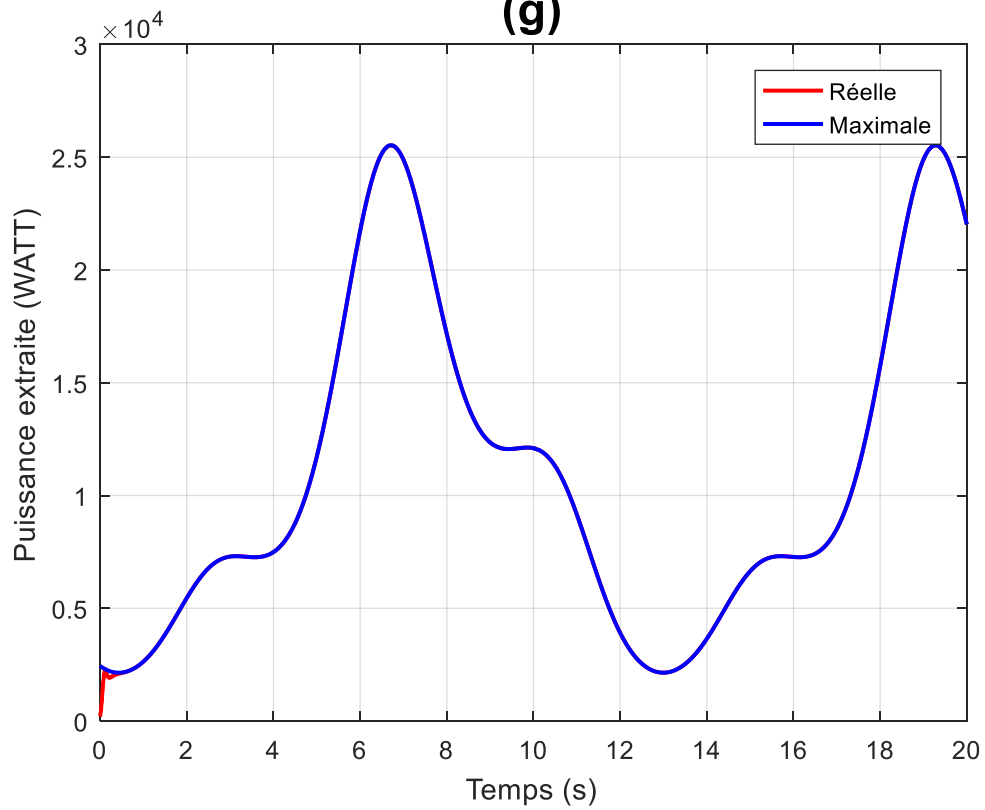




(f)



(g)



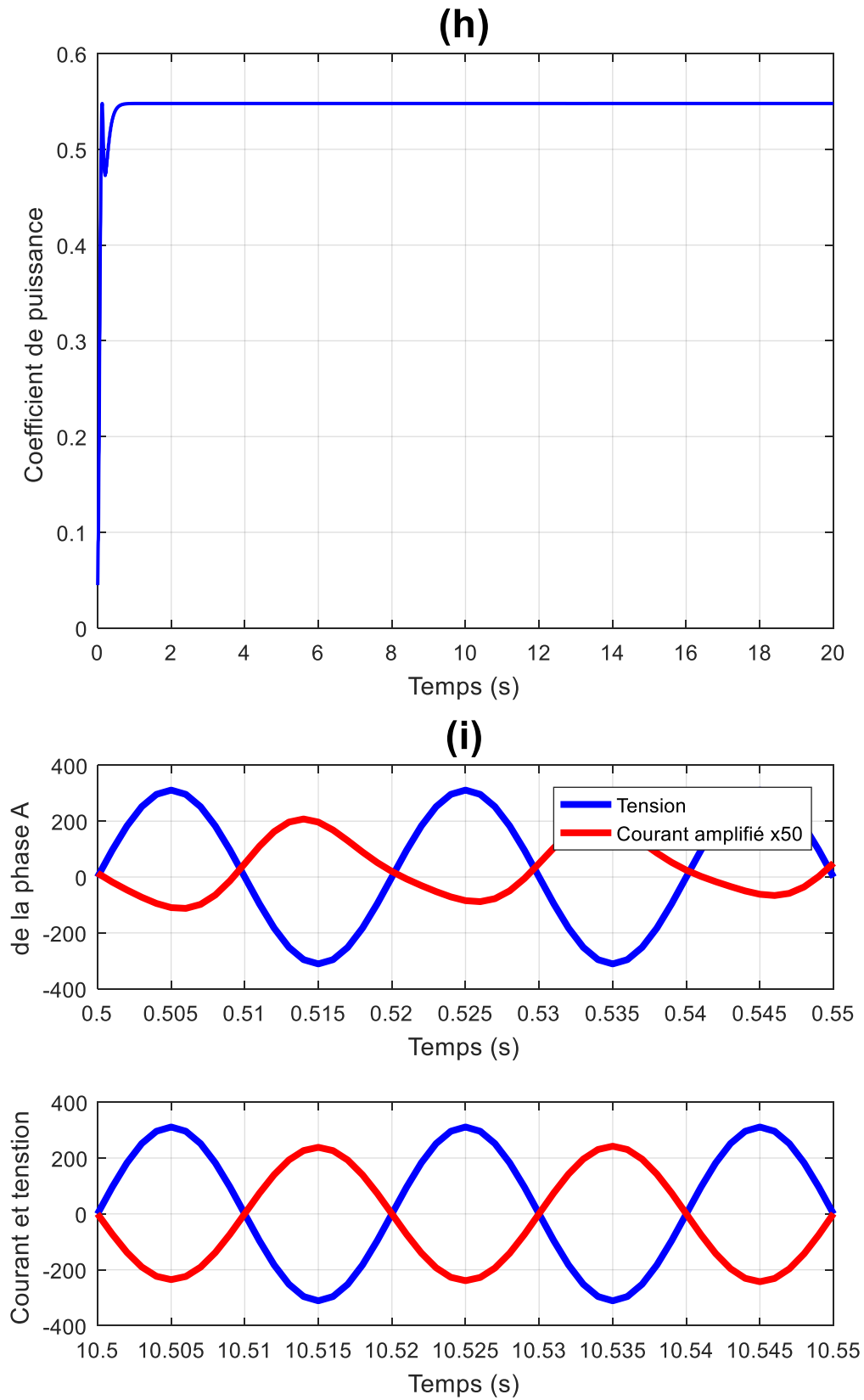


Figure IV.3 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping sous conditions nominales

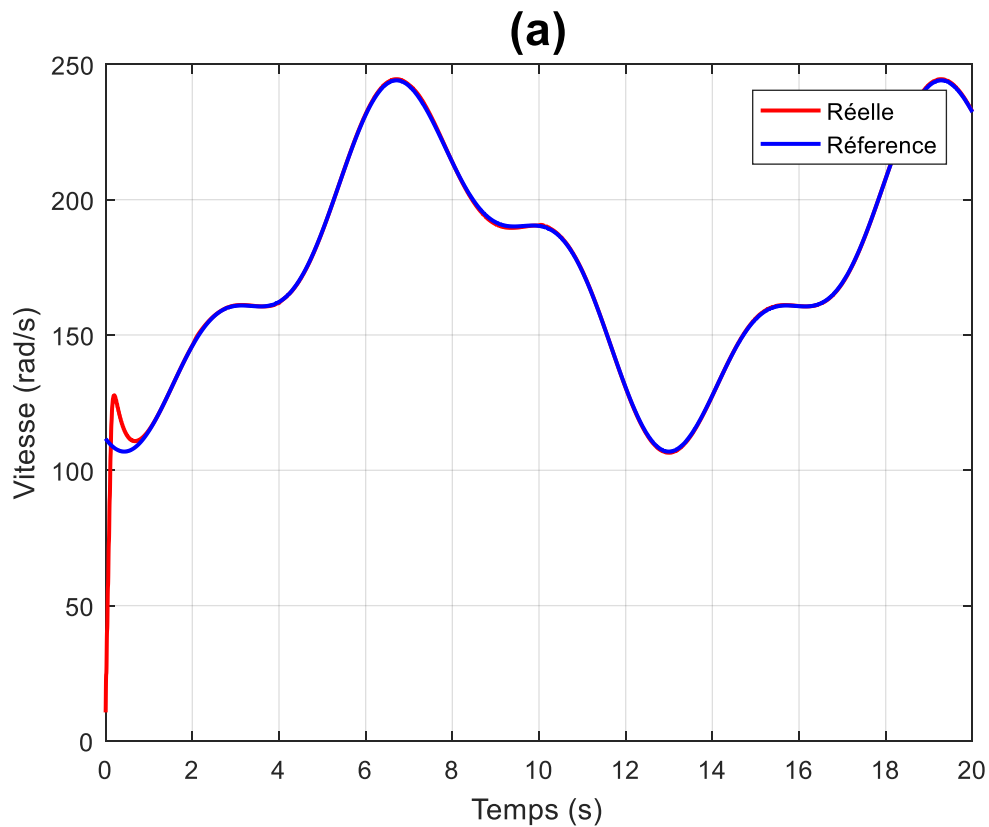
Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

Les résultats de simulation de la commande par Backstepping sous conditions nominales sont légèrement meilleurs à ceux obtenus dans le chapitre précédent (commande vectorielle linéaire).

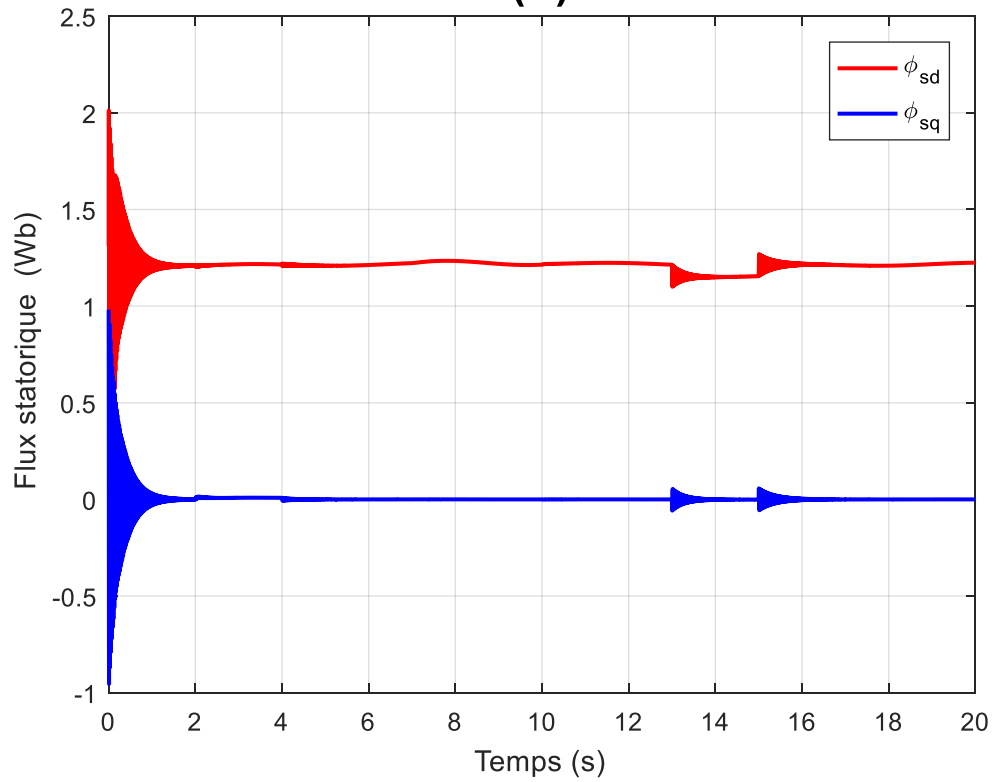
IV.5.3. Test de robustesse

Afin de tester la robustesse de la commande Backstepping et pouvoir comparer les résultats avec celles obtenues avec la commande vectorielle à base de PI classiques, on considère le même profil de vent utilisé dans le chapitre précédent, tout en gardant les mêmes conditions de fonctionnement (perturbations).

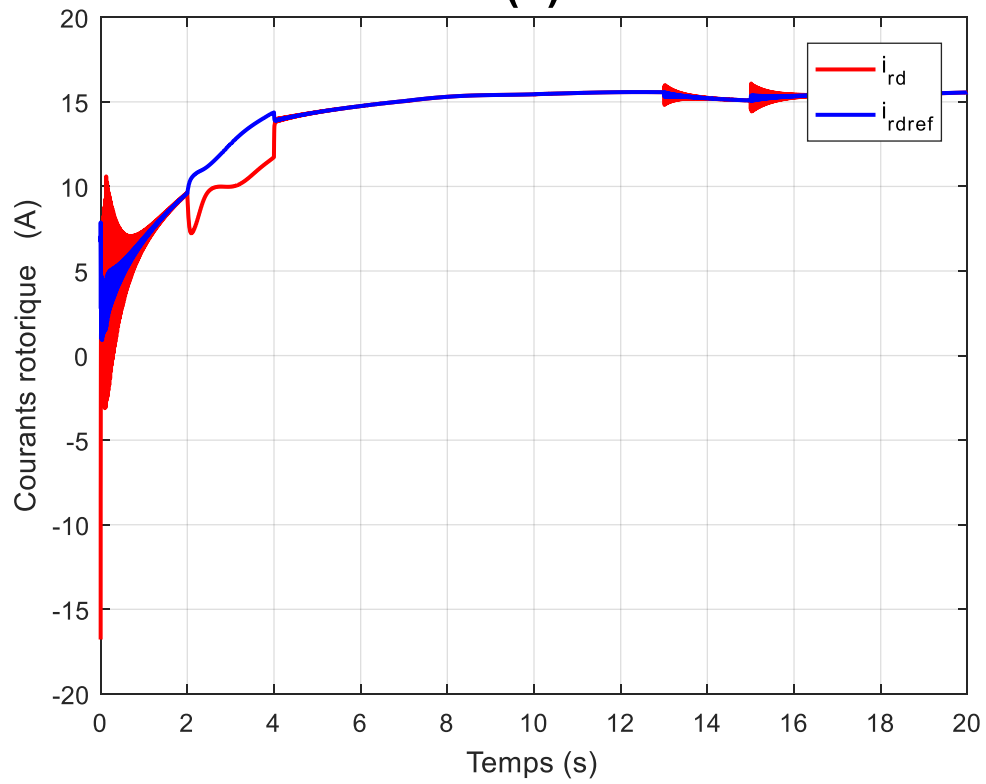
La robustesse de cette loi de commande a été testée en gardant un profil de perturbation identique à celui appliqué précédemment (pour les autres lois de commande).

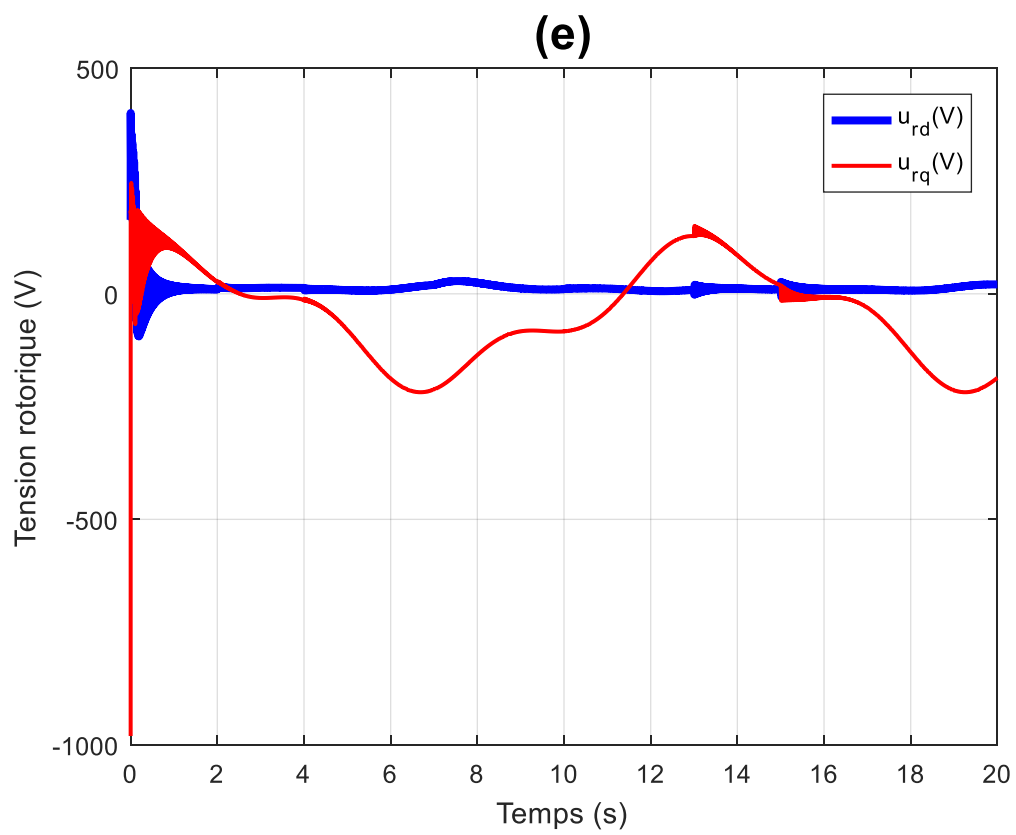
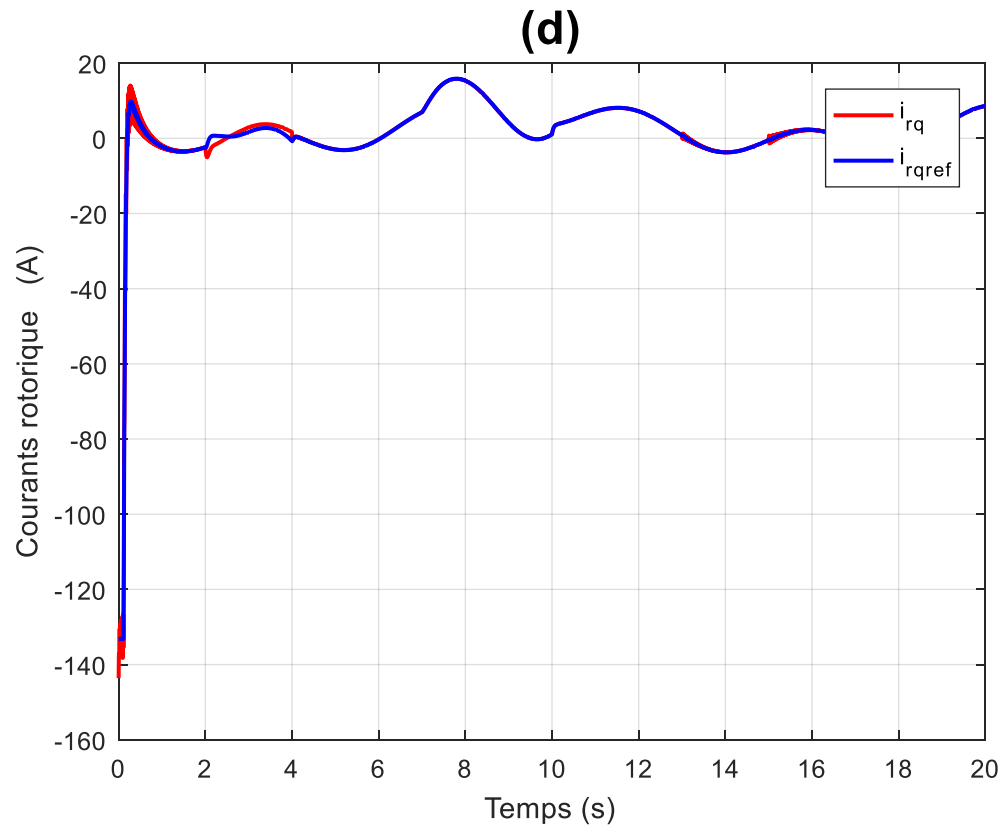


(b)

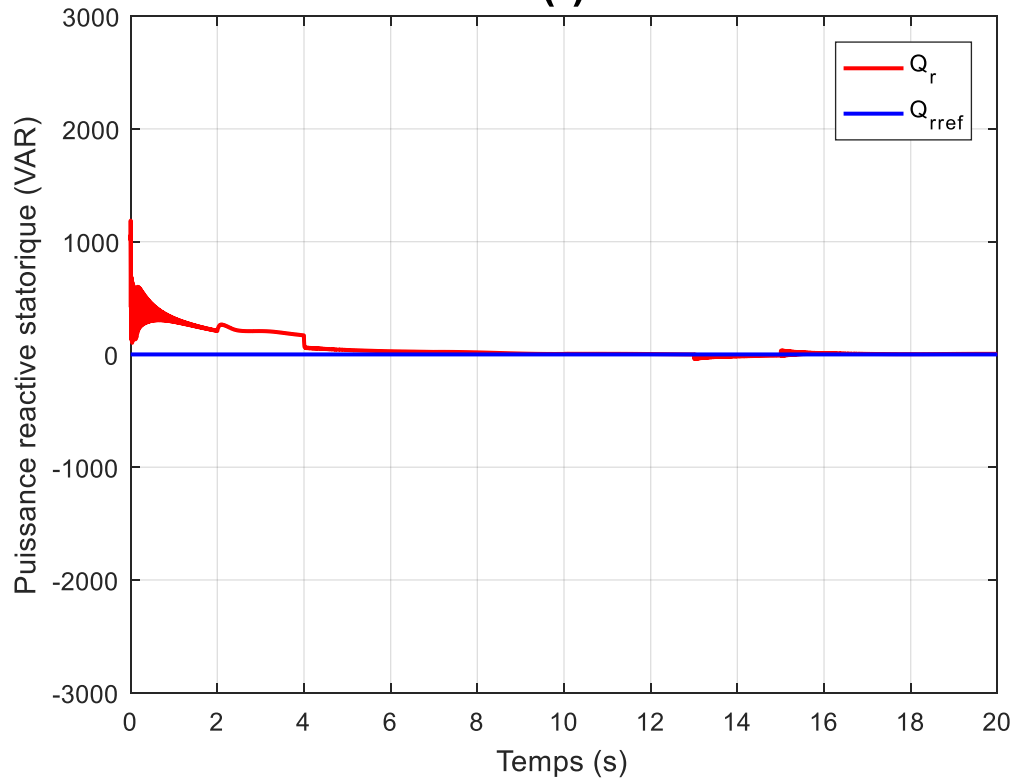


(c)

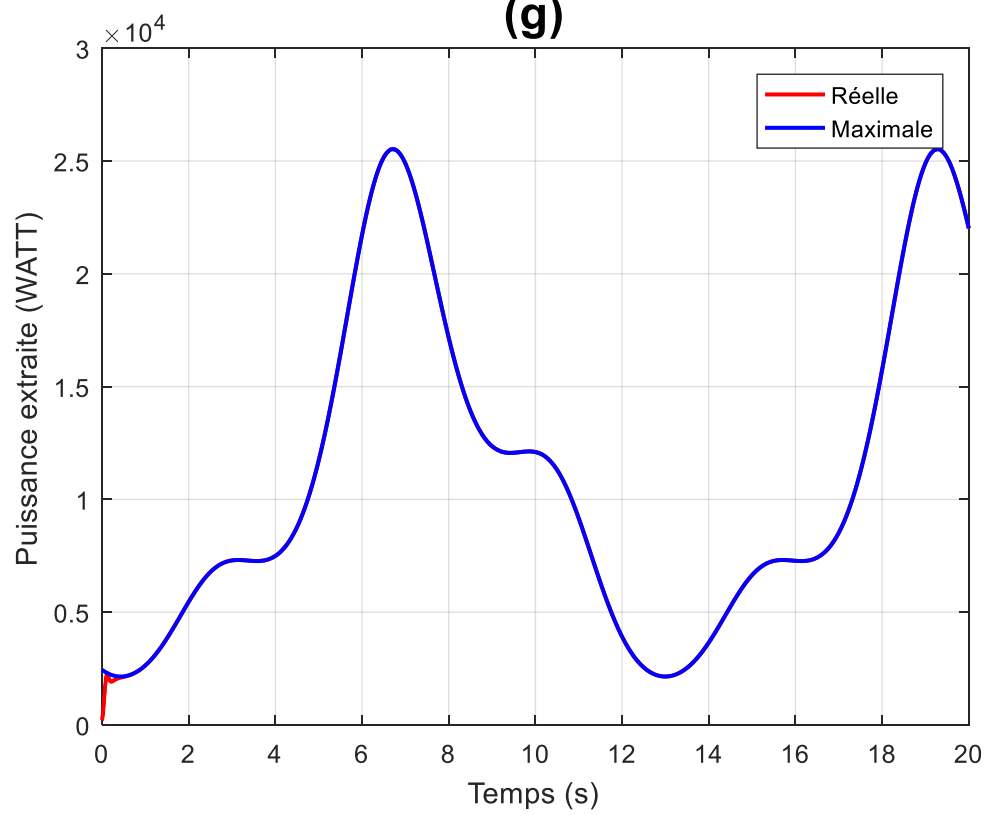




(f)



(g)



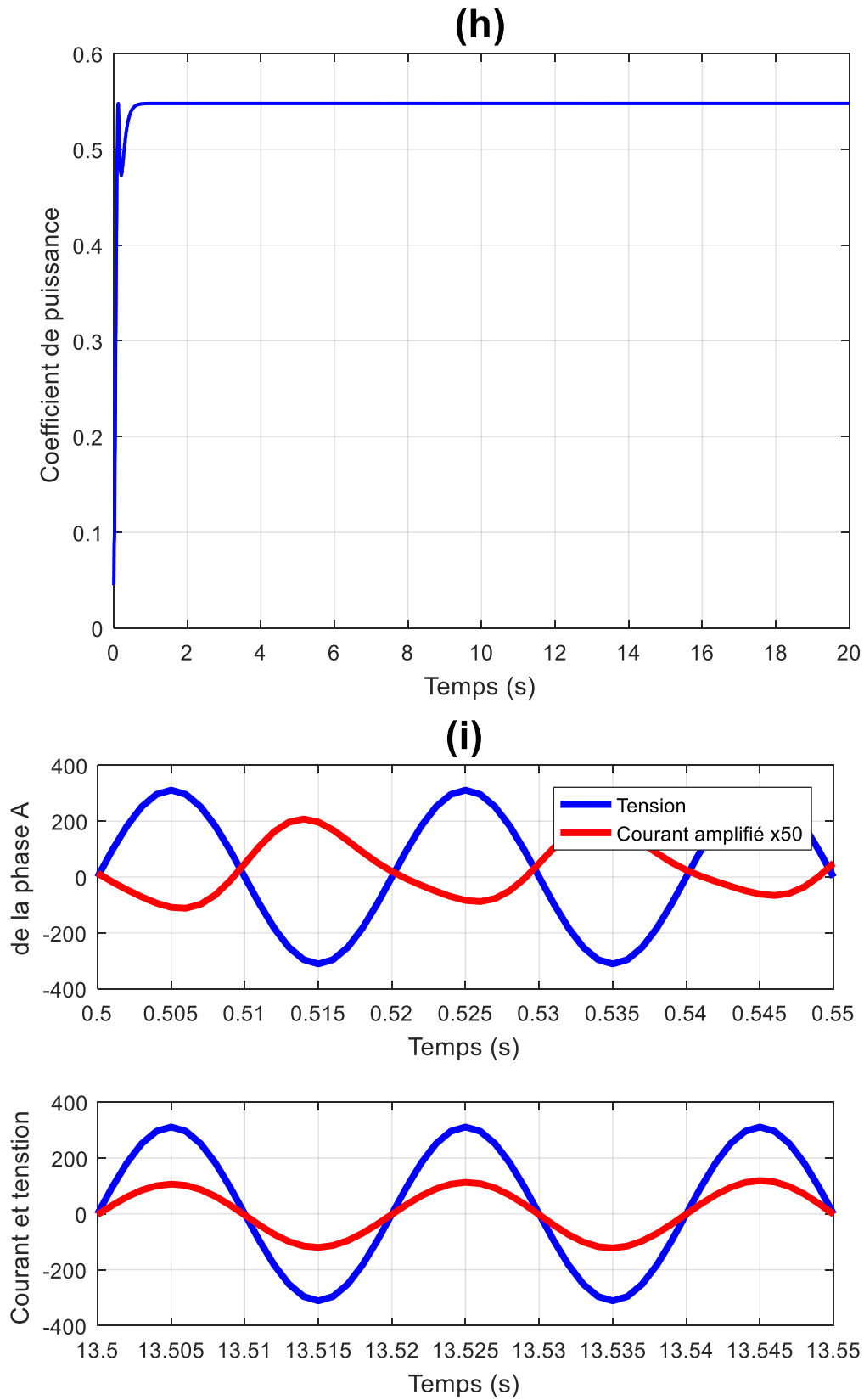


Figure IV.4 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping –test de robustesse

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

L'analyse des résultats obtenus se fait toujours en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

✓ *Production de puissance maximale (MPPT)*

Les figures IV.3.a et IV.4.a illustrent la vitesse de la MADA et sa référence, respectivement en régime nominal et en présence de perturbations.

En régime nominal, la poursuite est satisfaisante, avec un temps de réponse nettement amélioré par rapport au régulateur PI.

En revanche, la figure IV.4.a montre, sous perturbations, une déviation notable par rapport au profil optimal de vitesse. Cette erreur se répercute directement sur la puissance extraite, qui n'atteint plus sa valeur maximale, comme le montre la figure IV.4.g..

✓ *Production avec un facteur de puissance statorique unitaire*

Sous perturbations, le courant statorique n'est plus en opposition de phase avec la tension réseau (figure IV.4.f), ce qui entraîne une puissance réactive non nulle.

Cependant, malgré cette dégradation, la réponse obtenue reste meilleure que celle obtenue avec la commande linéaire.

✓ *Poursuite des courants*

Les courants rotoriques, représentés dans les figures IV.3.c–d et IV.4.c–d, correspondent aux commandes virtuelles du Backstepping. En régime nominal, le temps de réponse est amélioré par rapport à la commande PI.

Toutefois, en présence de variations paramétriques, la qualité de poursuite se détériore clairement, ce qui compromet partiellement les performances attendues..

✓ *Qualité des signaux de commande*

Sur les figure (IV.3.e), (IV.4.e), on présente les signaux de commande réelle, ils sont borné et lisse avec un peu d'effort augmente lorsque on applique les perturbations.

L'inconvénient m major de la commande par Backstepping quelle exige la connaissance exacte du modèle de système ses performances sous changement paramétriques sont dégradées

Commande par Backstepping de l'aérogénérateur à base de la GADA

elle n'arrive pas à satisfaire nos objectifs, pour cela on propose la commande par Backstepping neuronale.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude a porté sur la commande non linéaire du système éolien à base de GADA. Après avoir rappelé quelques notions essentielles sur la stabilité au sens de Lyapunov, la machine a été reformulée sous une structure triangulaire inférieure, permettant la synthèse d'une commande Backstepping.

Cette loi de commande a été construite étape par étape, en garantissant la stabilité en boucle fermée grâce au choix approprié des fonctions de Lyapunov à chaque niveau de conception.

Les performances obtenues sont globalement satisfaisantes : les objectifs de commande sont atteints, tant pour l'extraction maximale de puissance que pour la régulation de la puissance réactive statorique.

Cependant, la commande Backstepping classique présente une limite majeure : sa sensibilité aux incertitudes et aux variations paramétriques, puisqu'elle repose sur une connaissance précise du modèle.

Pour renforcer la robustesse face aux perturbations, le chapitre suivant introduit une version neuronale et adaptative du Backstepping, qui fera l'objet d'une comparaison avec les autres stratégies de commande développées dans ce travail..

Chapitre 5

Commande Robuste

Neuronal de

L'aérogénérateur à

Base de la GADA

Chapitre V

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la MADA

V.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels ont trouvé une large utilisation dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. Ceci est dû à leur propriété d'approximation universelle qui les rend capables d'approcher n'importe quelle fonction non linéaire [82-84]. Les réseaux à base de perceptrons multicouches et les fonctions à base radiales sont les plus utilisés. Les premières applications des réseaux de neurones en commande n'étaient pas basées sur des analyses de stabilité rigoureuses. Plus tard, la théorie de Lyapunov a été introduite pour calculer des lois adaptatives garantissant la stabilité du système en boucle fermée. Les réseaux de neurones sont utilisés soit pour approcher directement la loi de commande soit pour approcher les non-linéarités, formant ainsi une loi de commande neuronale adaptative indirecte.

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation générale sur la commande non linéaire robuste qui ont une bonne réputation dans la littérature. Ensuite on va justifier notre choix d'appliquer la commande par réseaux de neurones. Nous allons expliquer comment les chercheurs ont inspiré le modèle du neurone formel à partir de celui du neurone biologique. Également, nous donnons un aperçu sur les éléments de base (poids, fonctions d'activation, et apprentissage) qui entrent dans leur constitution. Les différentes structures des réseaux de neurones formels sont présentées. Ensuite, nous rappelons le théorème d'approximateur universel relatif aux réseaux de neurones qui seront exploités dans la synthèse de la loi de commande adaptative neuronale par Backstepping pour notre éolienne connecté au réseau.

V.2. La commande par modes glissants

V.2.1 Principe de la commande par modes glissants

La commande par modes glissants est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $S(x)$ [85-88]. Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci.

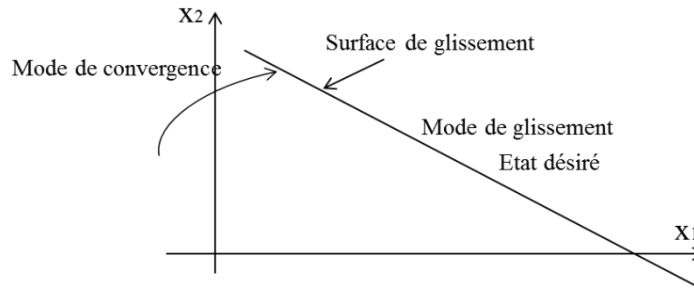


Figure V.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

V.2.2. Synthèse de la loi de commande

- Choix de la surface de glissement
- Établir la condition de convergence.
- Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

a) Choix de la surface de glissement

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(r)} = f(x, t) + g(x, t)u \\ y = S(x, t) \end{cases} \quad (V.1)$$

où f et g sont des fonctions non linéaires. r est le degré relatif du système, il présente le nombre de fois dont il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande. u est l'entrée du système et x représente l'état du système.

Soit x_d la consigne désirée et e l'erreur de poursuite définie par : $e = x - x_d$ La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit [85] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (V.2)$$

Où n est l'ordre du système, λ : est une constante positive.

b) Condition d'existence du mode de glissement

Le choix de la fonction de glissement étant fait, la deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer ($S = 0$). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que S soit attractive. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante [85-86] :

$$v(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (V.3)$$

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $S(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle de v soit définie négative [85] :

$$S.\dot{S} \leq 0 \quad (V.4)$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par S^2 ; diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal.

c) Calcul de la commande

L'objectif de la loi de commande est de contraindre les trajectoires d'état du système à atteindre et ensuite à rester sur la surface de glissement malgré la présence d'incertitudes sur le système. En d'autres termes, la loi de commande doit rendre la surface de glissement localement attractive (c.-à-d. au voisinage de la surface de glissement, toutes les trajectoires du système doivent être dirigées vers elle). Ainsi, la loi de commande doit être calculée en vérifiant une condition assurant la stabilité de $S(x, t) = 0$. Une telle condition est appelée condition d'attractivité.

L'algorithme de commande est défini par la relation

$$u = u_{eq} + u_n \quad (V.5)$$

ou
$$u_n = -K \operatorname{sign}(S(X))$$

avec : u est grandeur de commande, u_{eq} est la grandeur de commande équivalente, u_n est le terme discontinu de la commande, sign est la fonction $\operatorname{sign}(\cdot)$, K constante positive. [11]

$$\operatorname{sign}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (V.6)$$

V.2.3. Le broutement (chattering)

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner le chattering. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement.

Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont dues au terme de la commande discontinue. Les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes

mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

- *Solutions pour diminuer le phénomène de chattering :*

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, modes glissants flous, modes glissants d'ordre supérieur, approach law, etc[89-91].

V.3. La commande *adaptive*

V.3.1. Introduction à la commande *adaptive*

La commande adaptative est une technique de commande qui permet d'estimer en ligne les paramètres de régulateur (commande adaptative directe) ou du modèle (commande adaptative indirecte). L'idée de base est de construire un contrôleur composé d'une part, d'une loi d'estimation qui fournit, comme son nom l'indique des estimés pour les paramètres inconnus, d'autre part, d'une loi de commande qui génère un signal à partir des mesures du système et des estimés des paramètres inconnus [92-95]. Le principe général de la commande adaptative est illustré dans la figure (V.2)

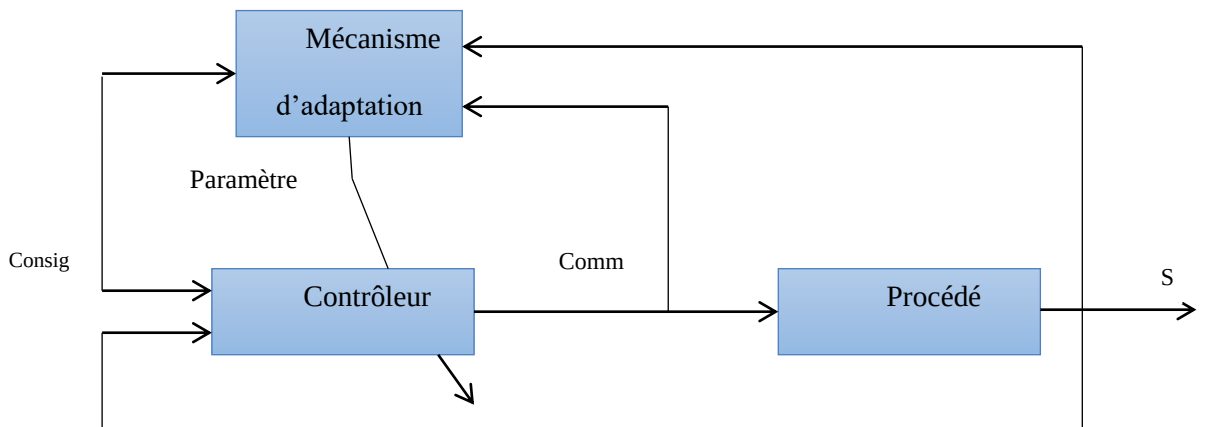


Figure V.2 : Principe de commande adaptative

➤ *Approche directe*

Elle conduit directement à l'estimation en ligne des paramètres de la loi de commande. Ce type de schéma est obtenu en réécrivant le modèle du processus en fonction des paramètres de la loi de commande. Le schéma illustratif de ce type de commande est donné par la figure (IV.3).

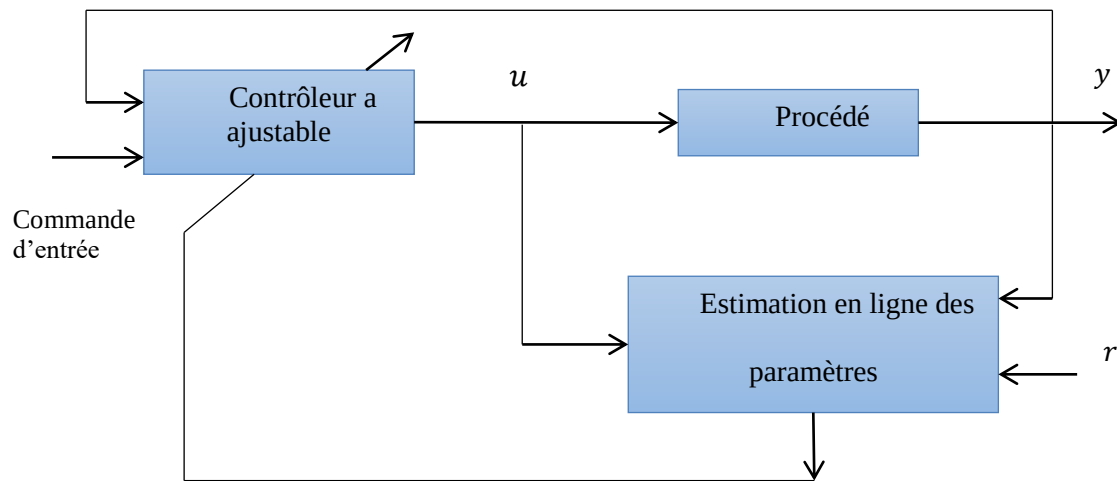


Figure V.3 : Commande adaptative directe

➤ *Approche indirecte*

Contrairement à la commande adaptative directe, dans cette approche, la détermination des paramètres du contrôleur s'effectue en deux étapes :

1. Estimation en ligne des paramètres du modèle.
2. Calcul des paramètres du contrôleur à partir des paramètres estimés du modèle.

Le schéma de principe de ce type de commande est illustré par la figure (IV.4)

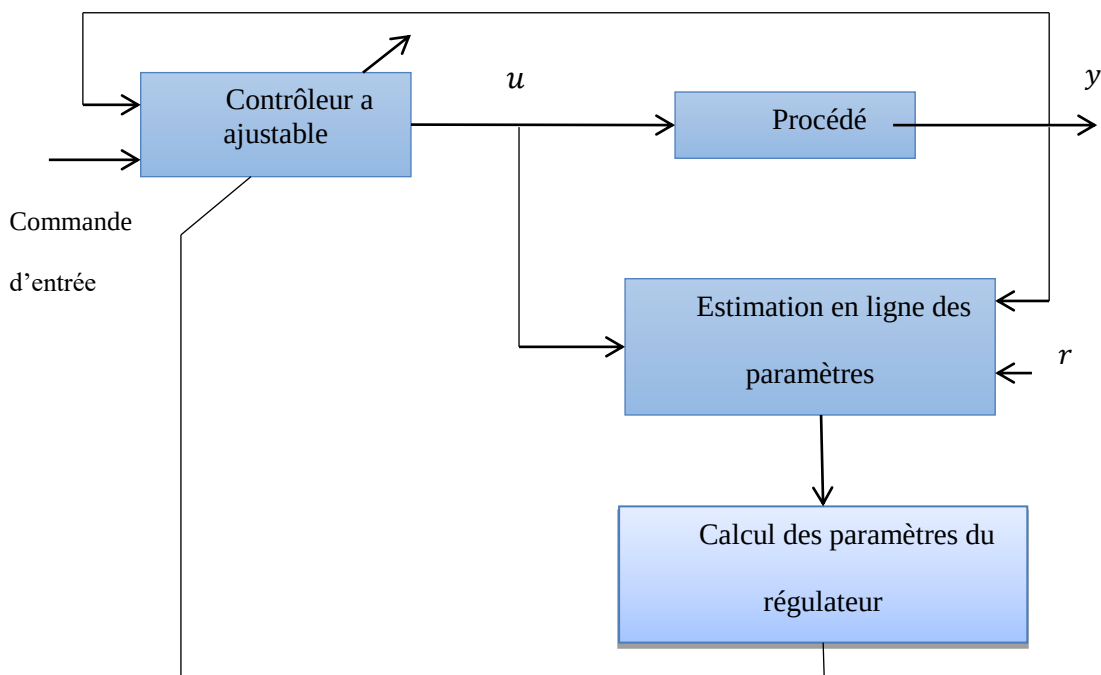


Figure IV. 4: Commande adaptative indirecte

V.3.2. Principe de la commande adaptative

Les trois étapes suivantes sont essentielles pour la conception d'une commande adaptative :

1. Choix de la loi de commande contenant des paramètres variables,
2. Conception des lois d'adaptation pour ajuster ces paramètres,
3. Analyse des propriétés de convergence des erreurs (erreurs d'estimation paramétrique et de poursuite) et démonstration de la bornitude de tous les signaux impliqués dans la boucle fermée.

Comparativement à la commande non adaptative, la commande adaptative présente plusieurs avantages, à savoir :

- La connaissance parfaite du modèle n'est pas nécessaire pour concevoir une telle loi de commande.
- Les performances de commande sont généralement améliorées en utilisant une commande adaptative.

Dans la littérature [92-95], on peut trouver plusieurs versions de la commande adaptative, à savoir commande adaptative par modèle de référence, par la méthode de Lyapunov, par identification du modèle, par gain préprogrammé, commande adaptative basée sur les approximateurs universels (à savoir les systèmes flous, les réseaux de neurones...etc.).

V.3.3. Exemple sur la commande adaptative

Considérons le système non linéaire suivant [92] :

$$\dot{x}_1 = \varphi^T(x_1)\theta + u, \quad (V.7)$$

où $\theta \in \mathbb{R}$ est le vecteur contenant les paramètres inconnus du système, $\varphi(x_1)$ est le vecteur de fonctions non linéaires connues, avec $\varphi(0) = 0$. En général, le vecteur φ est appelé vecteur régression.

On définit l'erreur de poursuite comme :

$$z = x_1 - y_r \quad (V.8)$$

où y_r est un signal de référence dérivable et bornée.

La fonction candidate de Lyapunov associée à cette erreur z est définie comme suit :

$$V(z) = \frac{1}{2}z^2 \quad (V.9)$$

La dérivée temporelle de $V(z)$ est donnée par :

$$\dot{V} = z\dot{z} = z[-\dot{y}_r + \varphi^T(x_1)\theta + u] \quad (IV.10)$$

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

Pour assurer la négativité de V , on peut choisir u comme suit :

$$u = -c(x_1 - y_r) - \varphi^T(x_1)\theta + \dot{y}_r \quad (V.11)$$

avec $c > 0$ est une constante de conception.

Selon l'expression de la loi de commande (3.8), il en résulte que dans le cas où θ est inconnu ou mal connu, il sera impossible d'implémenter cette loi de commande. Donc, la solution est d'estimer ce vecteur θ via des lois d'adaptation.

Pour concevoir la loi d'adaptation, on va donc augmenter la fonction de Lyapunov (IV.39) par un terme définissant l'erreur entre le vecteur des paramètres estimés et sa valeur réelle.

$$V = \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (V.12)$$

où $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ est l'erreur d'estimation paramétrique (qui représente l'écart inconnu entre la valeur réelle θ et la valeur estimée $\hat{\theta}$) et Γ est une matrice diagonale et définie positive, dite matrice des gains d'adaptation positive.

La dérivée temporelle de cette erreur d'estimation paramétrique donne :

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}} \quad (V.13)$$

En utilisant la valeur estimée $\hat{\theta}$, la commande (3.8) devient donc :

$$u = -c(x_1 - y_r) - \varphi^T(x_1)\hat{\theta} + \dot{y}_r \quad (V.14)$$

Ce qui conduit à :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z\dot{z} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = z[\varphi^T(x_1)\theta + u - \dot{y}_r] - \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \\ &= z[\varphi^T(x_1)\tilde{\theta} + \varphi^T(x_1)\hat{\theta} + u - \dot{y}_r] - \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \end{aligned} \quad (V.15)$$

Après le remplacement de la loi de commande (V.14) dans (V.15), et afin de rendre $\dot{V}$ négative, sa loi d'adaptation associée devrait être choisie comme suit :

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma z \varphi(x_1) \quad (V.16)$$

Donc, l'expression (3.12) devient

$$\dot{V} = -cz^2 \quad (V.17)$$

D'après le théorème de LaSalle, on en conclut que z converge asymptotiquement vers l'origine et $\hat{\theta}$ tend vers une valeur constante (qui n'est pas nécessairement sa valeur réelle) dépendant des conditions initiales et du gain d'adaptation. Cependant, on peut avoir une convergence de $\hat{\theta}$ vers sa valeur réelle, si le signal de référence y_r est vérifiée la propriété d'excitation persistante.

V.4. La commande par réseaux de Neurones

V.4.1. Neurone biologique

Le cerveau humain est composé d'un réseau de neurones très compliqués, dont il contient plus que 100 milliards cellules nerveuses connectées entre eux. La cellule nerveuse ou le neurone biologique est composé d'un corps cellulaire (ou bien soma), d'un axone et de plusieurs dendrites [83] comme il est présenté par la Figure V.5.

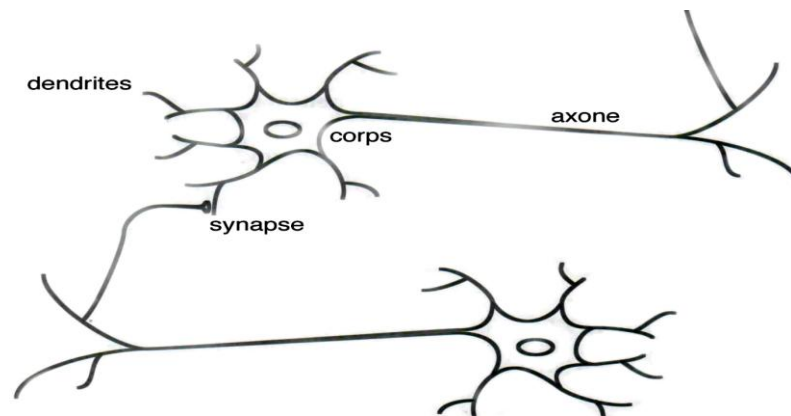


Figure V.5 : Neurone biologique.

Le principe de transmission des signaux entre les cellules nerveuses est très simple. Les **dendrites** transmettent les signaux de l'extérieur vers le **corps cellulaire** de neurone. Ce dernier est responsable sur la sommation et le seuillage des signaux. C'est-à-dire, si la somme résultante dépasse certaine seuil, le neurone envoie un signal par son **axone** vers un autre neurone. Dans le cas contraire, la somme sera détruite rapidement et aucune action ne sera prête [84].

L'espace intercellulaire entre l'axone et les dendrites s'appelle **synapse**. Elle est de nature chimique ayant un effet électrique qu'on peut le mesurer. L'importance de ces synapses réside dans la capacité de changement lorsque le cerveau est en phase d'apprentissage.

En se basant sur les notions : dendrites, corps cellulaire, axone, synapse, et le principe de transmission des signaux, les chercheurs ont créés un modèle approximatif à la cellule nerveuse, c'est le neurone formel.

V.4.2 Neurone formel

Le premier neurone formel est proposé par Mc Culloch et W. Pittsen 1943 [83], c'est une approximation très grossière de l'opération du neurone biologique. Le neurone formel donc est

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

une modélisation mathématique qui reprend les principes fonctionnement du neurone biologique.

En général, un neurone formel (artificiel) est un processus élémentaire (automate) à n entrées et une seule sortie. Chaque entrée est associée à un poids synaptiques V qui représente la force de la connexion (voir la Figure V.6).

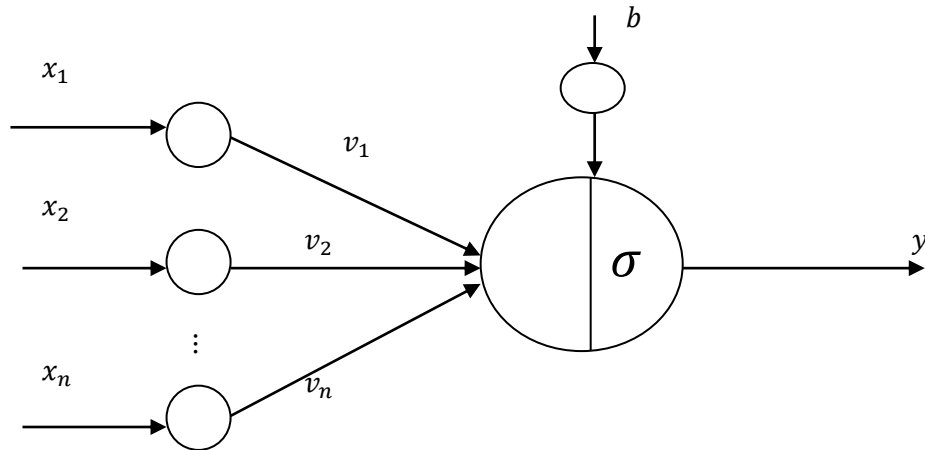


Figure V.6 : Neurone formel.

Le neurone formel est composé de trois parties comme suit [83] :

✓ Poids

Les coefficients v_i sont les poids associés à chaque entrée x_i . Chaque entrée est multipliée par le poids qui lui correspond et le résultat sera $(V^T X)$ avec :

$$V = [v_1 \dots v_n]^T \quad \text{et} \quad X = [x_1 \dots x_n]^T$$

✓ Seuil

Le biais b présente le seuil de neurone formel, ce paramètre additionnel est considéré comme le poids de l'entrée unité.

✓ Fonction d'activation

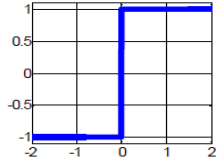
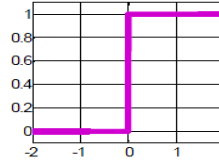
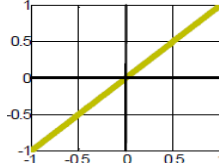
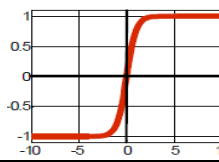
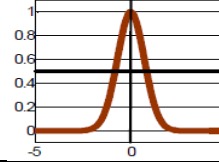
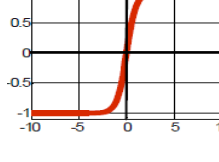
La fonction d'activation calcule l'état du neurone, cette valeur sera transmise aux neurones aval. Il existe de nombreuses formes possibles de la fonction d'activation, les plus courantes sont présentées dans le tableau V.1.

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

Comme conclusion, le résultat de cet automate s'exprime par un simple produit scalaire entre le vecteur d'entrée (X) et le vecteur des poids (V), ensuite le seuillage par un biais b et la fonction d'activation σ sont appliqués au résultat obtenu et la sortie finale du neurone sera :

$$y = \sigma(V^T X + b) \quad (V.18)$$

Tableau V.1 : Fonctions d'activations.

Fonction d'activation	Modèle mathématique	Graphes
Fonction signe	$\sigma(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$	
Fonction seuil	$\sigma(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > s \\ 0 & \text{si } x \leq s \end{cases}$	
Fonction linéaire	$\sigma(x) = x$	
Fonction sigmoïde	$\sigma(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$	
Fonction gaussienne	$\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'} e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma'^2}}$	
Fonction tangente hyperbolique	$\sigma(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

Il est à noter que le neurone biologique a une sortie de nature binaire, c'est-à-dire le neurone peut prendre deux états seulement (activé ou désactivé), par contre l'utilisation des fonctions d'activation continues ci-dessous permet d'avoir une infinité de valeurs possibles pour la sortie de neurone formel.

V.4.3 Réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est un ensemble de neurones formels associés en couches et fonctionnent en parallèle. Chaque couche fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse à la couche suivante. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches intermédiaires (dites couches cachées). Habituellement (excepté pour les couches d'entrée et de sortie), chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante [84].

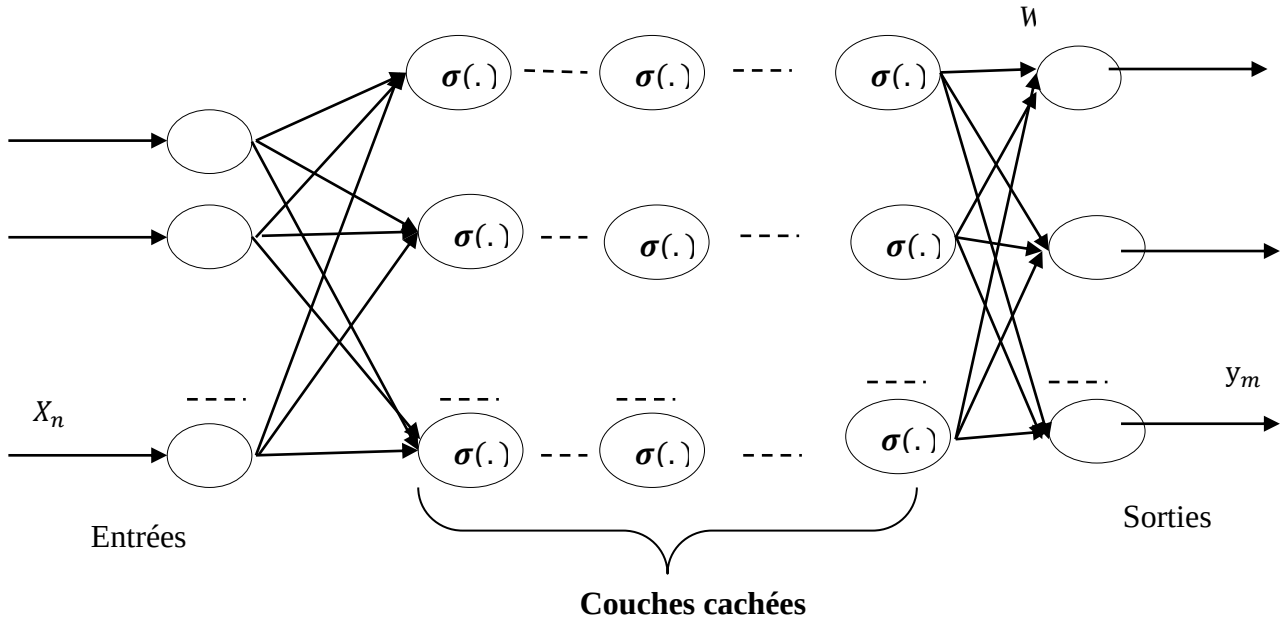


Figure V.7 : Représentation d'un réseau de neurones artificiels.

La sortie du réseau est la suivante :

$$y_i = \sum_{j=1}^l \left(w_{ij} \sigma \left[\sum_{k=1}^n v_{jk} x_k \right] \right) ; i = 1, \dots, m \quad (V.19)$$

- $X \in R^n$: vecteur d'entrée avec $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$.
- $Y \in R^m$: vecteur d'entrée avec $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]$.
- L : nombre de neurones de la couche cachée.
- $V^T \in R^{l \times n}$: matrice des poids (entrée/couche cachée).
- $W^T \in R^{m \times l}$: matrice des poids (couche cachée/sortie).
- $\sigma(\cdot)$: la fonction d'activation.

Finalement, l'équation (V.18) peut être écrite sous la forme matricielle suivante :

$$Y = W^T \sigma(V^T X) \quad (V.20)$$

V.5. Types de réseaux de neurones artificiels

Deux grandes familles de RNA sont présentées dans la littérature [84]. En l'occurrence, il s'agit des réseaux à fonctions de base radiales (RBF, pour Radial Basis Function) et les réseaux à perceptron multi-couches (MLP, pour Multi Layer Perceptron).

V.5.1. Réseau perceptron multicouches (MLP)

Le MLP a une longue histoire, et il est de loin le réseau le plus appliqué dans le domaine du contrôle. Ce dernier est composé d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie et d'une /ou de plusieurs couches cachées, comme il est illustré sur la Figure (V.4). Ce réseau est capable de traiter tous les problèmes linéairement séparables ou non [27]. Pour les problèmes non linéaires, il est nécessaire d'intégrer plusieurs neurones sous formes d'un réseau à topologie spécifique.

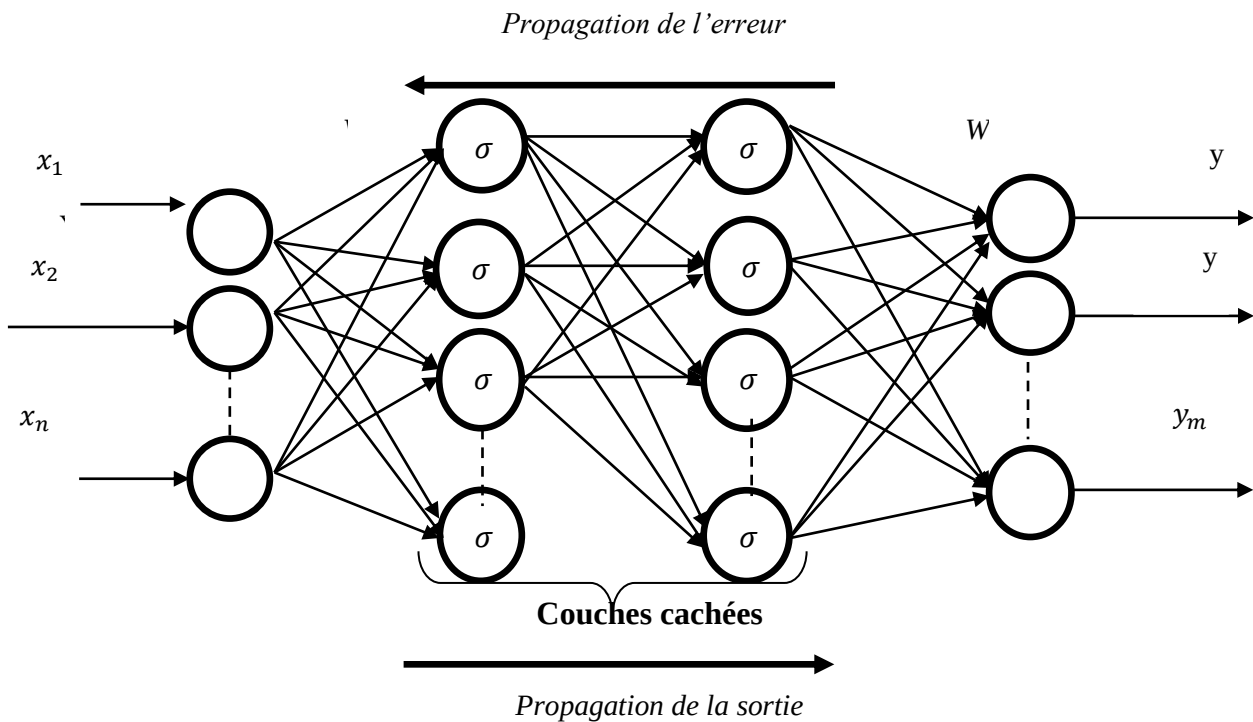


Figure V.8 : Perceptron multicouche.

Le perceptron multicouche est un réseau à propagation avant (feed-forward), dont l'information se propage dans un sens unique, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Son apprentissage est de type supervisé, par correction des erreurs. Dans ce cas uniquement, le

signal d'erreur est «rétropropagé» vers les entrées pour mettre `à jour les poids des neurones [84]. La fonction d'activation σ est située dans les couches cachées.

V.5.2. Réseaux de neurones à fonctions de base radiale (RBF)

L'emploi d'une fonction d'activation sigmoïdale a permis une large utilisation des RNA. Cependant, les fonctions sigmoïdes ne sont pas adoptées pour tous les domaines à titre d'exemple le traitement de signaux [84]. Pour cette raison d'autres types de réseaux ont été développés, à savoir entre autres : les réseaux RBF. Comme les perceptrons multicouches, les réseaux de neurones à fonctions de base radiale sont des réseaux à propagation avant avec une fonction d'activation de type gaussienne (voir Tableau V.1). La Figure (V.9) montre, un réseau RBF à deux entrées et avec quatre neurones dans la couche cachée.

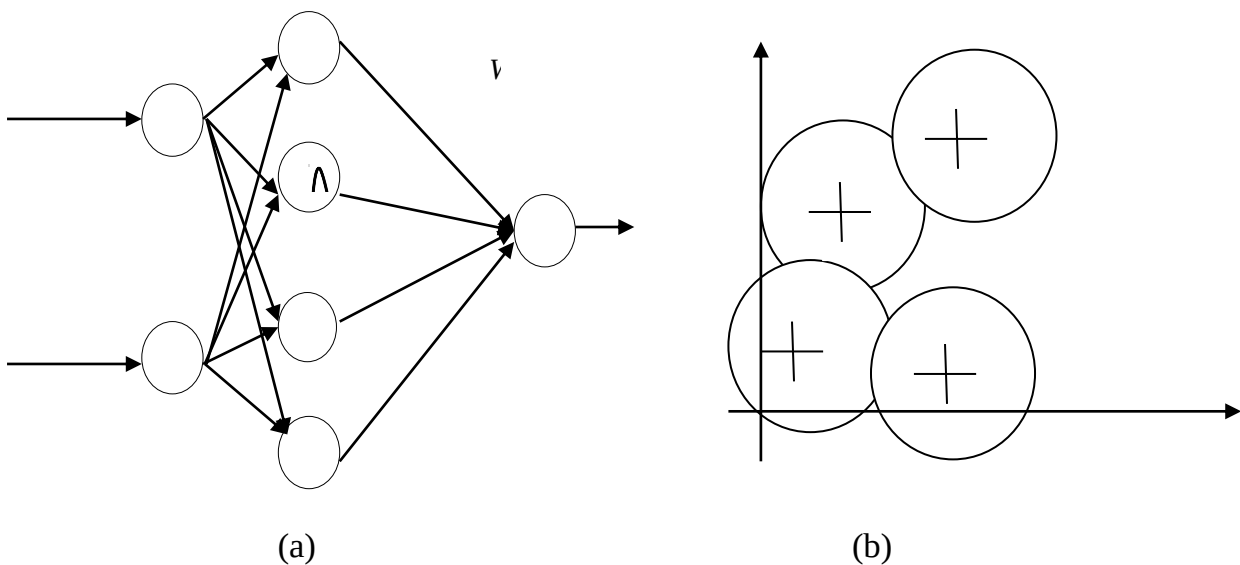


Figure V.9 : Réseau RBF: (a) : Structure du réseau RBF, (b) : distribution des centres.

Contrairement aux réseaux de neurones multicouches, les neurones cachés d'un réseau de neurones RBF sont activés au voisinage des centres des fonctions gaussiennes seulement de plus, les connexions provenant des neurones d'entrée ne sont pas pondérées.

Il existe deux types de ce réseau, le premier est à centres fixes, mais l'inconvénient major de ce type est la nécessité d'utiliser un nombre très important de neurones cachés pour pallier tout l'espace d'état. Le deuxième type est les RBFs à centres variables. Avec ce type, on minimise le nombre de neurones des couches cachées. Alors, l'apprentissage des RBFs consiste, dans ce cas, à ajuster les poids de la couche de sortie et les centres des fonctions gaussiennes via un algorithme approprié [82].

V.6. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage d'un réseau de neurones est un problème d'optimisation qui consiste à trouver les poids synaptiques qui minimisent une certaine fonction de coût (l'erreur). On peut différencier plusieurs types d'apprentissages. Les trois méthodes les plus utilisées sont [83] :

✓ Apprentissage supervisé

Pour lequel on dispose de la sortie désirée et qui consiste à ajuster les poids synaptiques de telle sorte à minimiser l'écart entre la sortie désirée et la sortie du réseau.

✓ Apprentissage non supervisé

Pour lequel le réseau de neurones organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser un critère de performances interne.

✓ Apprentissage par renforcement

Pour lequel le réseau de neurones est informé d'une manière indirecte sur l'effet de son action choisie. Cette action est renforcée si elle conduit à une amélioration des performances.

Une autre classification est possible selon la nature d'apprentissage [83], à savoir :

✓ Apprentissage hors ligne

Le mode de fonctionnement hors-ligne sépare les phases d'apprentissage et d'utilisation. Dans un premier temps, le système est entraîné de manière statique ou incrémentale à partir d'un ensemble d'entraînement. Ensuite, dans un deuxième temps, le système préalablement appris est utilisé.

✓ Apprentissage en ligne

Le mode de fonctionnement en-ligne ne sépare pas l'apprentissage et l'utilisation du système, les deux tâches sont effectuées de manière conjointe. Tout au long de son utilisation, le système continue d'apprendre dès qu'une nouvelle donnée est disponible afin d'améliorer ses performances.

L'avantage des systèmes en-ligne par rapport aux systèmes hors-ligne est qu'ils vont pouvoir s'ajuster très précisément à l'utilisateur final, en continuant à apprendre tout au long de leur utilisation. L'ensemble d'apprentissage initial n'a plus besoin d'être aussi conséquent et diversifié puis que le système s'adaptera pendant son utilisation.

V.6.1. Algorithme de rétro-propagation à base de gradient (pour les RN type MLP)

L'algorithme de rétro propagation (Backpropagation) est basé sur la méthode du gradient descendant [82-84]. Cet apprentissage est de type supervisé. L'ajustement des poids se fait dans le sens inverse de la couche de sortie vers la couche d'entrée d'où l'appellation rétro propagation (Backpropagation). Au début, la sortie du réseau est calculée et comparée avec la sortie désirée, ensuite l'erreur résultante est utilisée pour l'apprentissage des poids de la couche de sortie et de la dernière couche cachée. De la même manière, l'erreur du réseau se propage pour l'ajustement des poids des autres couches cachées jusqu'à la couche d'entrée.

L'algorithme de rétropropagation d'un réseau de neurones MLP à une seule couche cachée est représenté sur la figure (V.6).

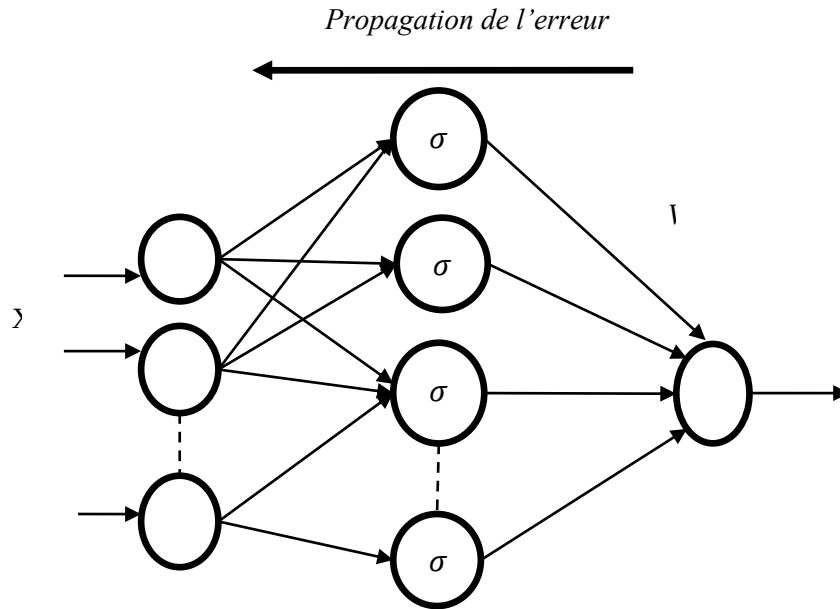


Figure V.10 : Réseau de neurones MLP à une seule couche cachée.

La sortie du réseau de neurones à deux couches ci-dessus est donnée par l'équation suivante :

$$Y = W\sigma(V.X) \quad (V.21)$$

Dans le reste de chapitre, c'est la fonction d'activation de type sigmoïdale

(c.-à-d. $\sigma(z) = \frac{1}{1+\exp(-z)}$) qui sera utilisée dans notre RN MLP.

L'algorithme du gradient est basé sur la minimisation d'une fonction coût, pour l'apprentissage de ce réseau MLP, cette fonction est donnée par :

$$J = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (y_d - Y)^2 \quad (V.22)$$

avec $e = y_d - Y$ est l'erreur du neurone de sortie, y_d est la sortie désirée du neurone de sortie, et Y est la sortie réelle du neurone de sortie.

Les lois de la mise à jour des poids estimés sont obtenues par différentiation de (V.5) par rapport à ces poids. L'application de l'algorithme du gradient pour la recherche d'un minimum local de (V.5) donne [84] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}} = -\Gamma_w \frac{\partial J}{\partial \hat{W}} = -\Gamma_w e \frac{\partial e}{\partial \hat{W}} \\ \dot{\hat{V}} = -\Gamma_v \frac{\partial J}{\partial \hat{V}} = -\Gamma_v e \frac{\partial e}{\partial \hat{V}} \end{cases} \quad (V.23)$$

avec $\Gamma_w = \delta_w \cdot I > 0$ et $\Gamma_v = \delta_v \cdot I > 0$ sont des taux d'apprentissage positifs et e est l'erreur d'approximation.

En utilisant (V.5) et (V.4) et la règle des chainages [31], on obtient l'algorithme de la rétropropagation pour la mise à jour des poids :

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}} = -\Gamma_w \left(e \cdot \sigma'(\hat{V}^T \cdot X) \right) \\ \dot{\hat{V}} = -\Gamma_v \left(e \cdot X \cdot \hat{W}^T \cdot \sigma'(\hat{V}^T \cdot X) \right) \end{cases} \quad (V.24)$$

où $\sigma'(\hat{V}^T \cdot X) = \text{diag}\{\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_l\}$ et $\sigma'_i = \frac{d[\sigma(X)]}{dX} \Big|_{x=a_i}$, $\hat{V}^T \cdot X = [a_1, a_2, \dots, a_l]^T$.

V.6.2. Théorème d'approximation universelle

Parmi les propriétés des réseaux de neurones, l'approximation universelle est la plus importante du point de vue de l'identification et la commande. L'approximation universelle a fait le sujet de beaucoup de travaux de recherche et plusieurs démonstrations pour des réseaux de neurones avec différentes fonctions d'activation [83]. On dispose d'un nombre important de publications montrant que les réseaux de neurones (RN) sont bien des approximateurs universels, c'est-à-dire, pour toute fonction continue $f(x)$ définie sur un ensemble compact Ω , et pour toute constante positive ε , il existe un RN d'ordre supérieur, avec k neurones dans la couche cachée, telle que:

$$\sup_{x \in \Omega} |f(x) - \hat{f}(x)| \leq \varepsilon \quad (V.25)$$

avec $\hat{f}(x)$ est l'approximation neuronale de $f(x)$ et ε est une petite constante positive définie l'erreur d'approximation neuronale [83].

V.7. Commande Backstepping adaptative neuronale de la MADA

Commande Robuste Neuronale de L'aérogénérateur à Base de la GADA

Les RN sont utilisées soit pour approcher directement la loi de commande, soit pour approcher les non linéarités formant ainsi une loi de commande neuronale adaptative indirecte.

Dans ce travail, les RN sont utilisés pour approcher les fonctions non linéaires incertaines du système, en exploitant les propriétés d'approximation universelle. Les RN utilisés sont de type MLP avec une seule couche cachée et une fonction d'activation de type sigmoïde.

Dans ce qui suit, nous allons concevoir une commande adaptative neuronale par Backstepping. Notons que l'utilisation des RN dans ce schéma de commande adaptative permet de relâcher l'hypothèse qui concerne la paramétrisation linéaire des incertitudes. Notre schéma de principe est donné par la figure (V.11). Le signal d'erreur dans cette figure est utilisé pour l'apprentissage. Les lois d'adaptation associées sont déduites de l'étude de la stabilité par l'approche de Lyapunov.

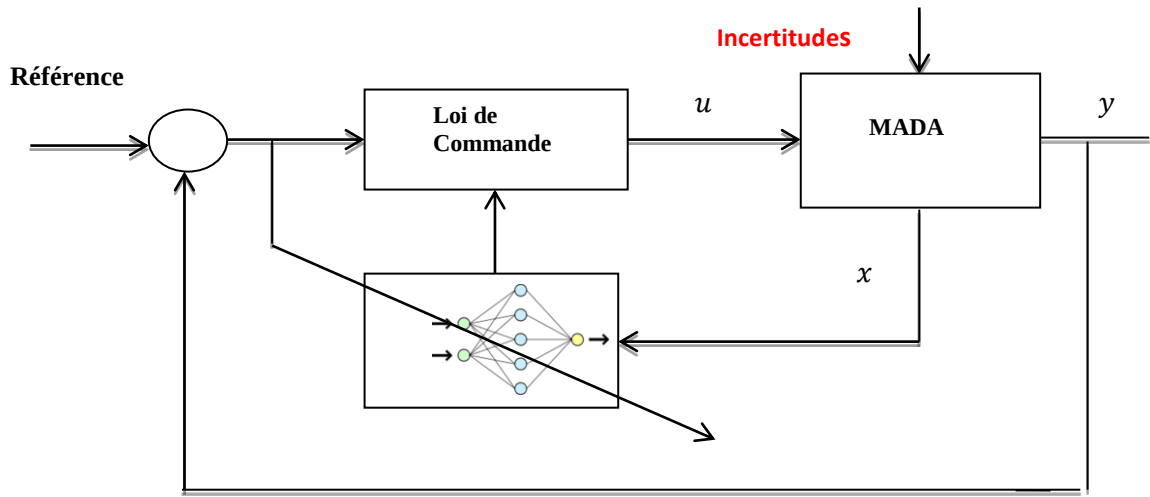


Figure V.11 : Schéma de principe de la commande adaptative neuronale indirecte.

V.7.1. Conception de la commande Backstepping neuronale

Dans cette partie, nous concevons et appliquons une commande neuronale par Backstepping à notre système connecté au réseau. Le modèle de ce dernier est supposé avec incertitudes et perturbations inconnues et ses états sont supposés complètement mesurables.

Prenons de nouveau le modèle (2.34) en lui ajoutant des incertitudes et des perturbations :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = F_0(x) + G_0(x)X_2 \\ \dot{X}_2 = F_1(x) + G_1(x)u + \Delta F(x) + \Delta G(x)u + d(t) \end{cases} \quad (V.26)$$

Ici on considère que les perturbation les plus important $\Delta F(x) + \Delta G(x)$ sont dans la boucle interne des courants.

On peut écrire (V.26) comme suite :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = F_0(x) + G_0(x)X_2 \\ \dot{X}_2 = F_0(x) + G_0(x)u + \Delta(x, u) + d(t) \end{cases} \quad (V.27)$$

avec $\Delta(x) = [\Delta_1(x, u), \Delta_2(x, u)]^T = \Delta F(x) + \Delta G(x)u$ représente les éventuelles incertitudes.

V.7.2. Application de la commande Backstepping neuronale

Pour le modèle (V.10), la synthèse de la loi de commande Backstepping neuronale consiste en deux étapes.

- **Étape 1**

On considère le 1^{er} sous-système :

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (V.28)$$

La variable X_2 est la commande virtuelle de ce sous-système. La référence désirée de X_1 est notée par :

$$X_{d1} = \alpha_0 = [\Omega_{r_ref}, \phi_{ds_ref}]^T \quad (V.29)$$

Donc, on peut définir l'erreur de poursuite comme :

$$e_1 = X_1 - \alpha_0 \quad (V.30)$$

Sa dynamique est donnée par

$$\dot{e}_1 = \dot{X}_1 - \dot{\alpha}_0 = X_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (V.31)$$

Pour ce système, on construit la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^T e_1 \quad (V.32)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V}_1 = e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T [(X_2 - X_{d2}) + X_{d2} - \dot{\alpha}_0] = e_1^T [e_2 + X_{d2} - \dot{\alpha}_0] \quad (V.33)$$

avec $e_2 = X_2 - X_{d2}$ et X_{d2} est la valeur désirée de la commande virtuelle X_2 .

D'après (V.33), on peut concevoir X_{d2} comme suit : $X_{d2} = \alpha_1 = \dot{X}_{d1} - K_1 e_1 = \dot{\alpha}_0 - K_1 e_1$

avec K_1 est une matrice de conception diagonale et définie positive.

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

En remplaçant (V.33) dans (V.32), $\dot{V}_1$ devient :

$$\dot{V}_1 = -e_1^T K_1 e_1 + e_1^T e_2 \quad (V.34)$$

L'étape suivante consiste à stabiliser l'erreur e_2 .

- **Étape 2:**

La dynamique de e_2 est donnée par :

$$\dot{e}_2 = F_0(q, \dot{q}) + G_0(q, \dot{q})\tau + \Delta(q, \dot{q}, \tau) - \dot{\alpha}_1 + e_1 - e_1 + d(t) \quad (V.35)$$

Posons $H(X) = \Delta(x, u) - \dot{\alpha}_1 + e_1$,

La dynamique de e_2 devient :

$$\dot{e}_2 = F_0(q, \dot{q}) + G_0(q, \dot{q})\tau + H(X) - e_1 + d(t) \quad (V.36)$$

En utilisant le théorème d'approximation universel relative aux RN multicouches, la fonction vecteur $H(X)$ peut-être écrite comme suit :

$$H(X) = W^T \sigma(V^T X) + \varepsilon(X) \quad (V.37)$$

où $\varepsilon(X)$ est l'erreur d'approximation neuronale qui est toujours supposée bornée.

En remplaçant (V.21) dans (V.20), on trouve :

$$\dot{e}_2 = F_0(q, \dot{q}) + G_0(q, \dot{q})\tau + W^T \sigma(V^T X) + \varepsilon(X) - e_1 + d(t) \quad (V.38)$$

Pour stabiliser la dynamique (V.22), on peut choisir la commande suivante :

$$\tau = G_0^{-1}[-F_0(q, \dot{q}) - \widehat{W}^T \sigma(\widehat{V}^T X) - K_2 e_2 + v_r] \quad (V.39)$$

où K_2 est une matrice de conception diagonale et définie-positive. $\widehat{W}$ et $\widehat{V}$ sont les estimées respectives des poids optimaux W et V . v_r est un terme de commande robuste qui sera construite par la suite.

En appliquant la commande réelle (V.23) au système, la dynamique (V.22) devient :

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 + v_r + W^T \sigma(V^T X) - \widehat{W}^T \sigma(\widehat{V}^T X) - e_1 + d(t) + \varepsilon(X) \quad (V.40)$$

Définissons les erreurs d'estimation des poids comme :

$$\widetilde{V} = V - \widehat{V}, \quad \widetilde{W} = W - \widehat{W} \quad (V.41)$$

et $\widetilde{Z} = Z - \widehat{Z}$, avec $Z = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix}$ et $\widehat{Z} = \begin{bmatrix} \widehat{W} & 0 \\ 0 & \widehat{V} \end{bmatrix}$

Pour une entrée X , l'erreur de sortie de la couche cachée est :

$$\tilde{\sigma} = \sigma - \hat{\sigma} = \sigma(V^T X) - \hat{\sigma}(\hat{V}^T X) \quad (V.42)$$

Le développement en série de Taylor pour une fonction d'activation $\sigma(V^T X)$ [84] :

$$\sigma(V^T X) = \hat{\sigma}(\hat{V}^T X) + \sigma'(\hat{V}^T X) \tilde{V}^T X + O(\tilde{V}^T X)^2 \quad (V.43)$$

où $\sigma'(\hat{z}) = d\sigma(z)/dz|_{z=\hat{z}}$, et $O(\tilde{V}^T X)$ présente les termes d'ordre 2.

En notant $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}(\hat{V}^T X)$, on a :

$$\tilde{\sigma} = \sigma'(\hat{V}^T X) \tilde{V}^T X + O(\tilde{V}^T X)^2 = \hat{\sigma}' \tilde{V}^T X + O(\tilde{V}^T X)^2 \quad (V.44)$$

Lemme 4.1 [84] : pour les fonctions d'activation de types sigmoïdales et tanh, les termes d'ordres supérieurs dans la série de Taylor sont bornés comme suit :

$$\|O(\tilde{V}^T X)^2\| \leq c_3 + c_4 \|\tilde{V}\| + c_5 \|\tilde{V}\| \|E\| \quad (V.45)$$

où c_i sont des constants positives calculables et $E^T = [e_1^T, e_2^T]$.

En ajoutant et en soustrayant $W^T \hat{\sigma}$ dans (V.24), on obtient :

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 + v_r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + W^T \tilde{\sigma} - e_1 + d(t) + \varepsilon(X) \quad (V.46)$$

où σ et $\hat{\sigma}$ sont déjà définies dans (V.42).

Maintenant, en ajoutant et en soustrayant $\tilde{W}^T \tilde{\sigma}$ dans (V.46), on trouve :

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 + v_r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + \tilde{W}^T \tilde{\sigma} + \tilde{W}^T \tilde{\sigma} - e_1 + d(t) + \varepsilon(X) \quad (V.47)$$

En utilisant l'approximation en série de Taylor (V.45) de $\tilde{\sigma}$, la dynamique (V.47) devient :

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 + v_r + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + \tilde{W}^T \hat{\sigma}' \tilde{V}^T X - e_1 + \omega \quad (V.48)$$

où le terme de perturbation devient :

$$\omega = [\omega_1(t), \omega_2(t)]^T = d(t) + \varepsilon(X) + \tilde{W}^T \hat{\sigma}' \tilde{V}^T X + W^T O(\tilde{V}^T X)^2 \quad (V.49)$$

Lemme 4.2 [84] : La perturbation (V.49) est bornée comme suit :

$$\|\omega_i(t)\| \leq C_i^T \varphi_i = c_{4i} + c_{5i} \|\hat{Z}\| + c_{6i} \|\hat{Z}\| \|E\|, \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (V.50)$$

où $C_i^T = [c_{4i}, c_{5i}, c_{6i}]$ est un vecteur inconnu, $\varphi_i^T = [1, \|\hat{Z}\|, \|\hat{Z}\| \|E\|]$,

et $E^T = [e_1^T, e_2^T]$.

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

La loi de commande robuste v_r peut être conçue comme suit :

$$v_r = \begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{C}_1^T \varphi_1 \text{sign}(e_{21}) \\ -\hat{C}_2^T \varphi_2 \text{sign}(e_{22}) \end{bmatrix} \quad (\text{V.51})$$

où $\hat{C}_1$ et $\hat{C}_2$ sont les estimées respectives de C_1 et C_2 .

Les lois d'adaptation associées à notre commande sont conçues comme suit :

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma_1 \hat{\sigma} e_2^T \quad (\text{V.52})$$

$$\dot{\hat{V}} = \Gamma_2 X (\hat{\sigma}'^T \hat{W} e_2)^T \quad (\text{V.53})$$

$$\dot{\hat{C}}_1 = \Gamma_3 \varphi_1 e_{21} \quad (\text{V.54})$$

$$\dot{\hat{C}}_2 = \Gamma_4 \varphi_2 e_{22} \quad (\text{V.55})$$

où $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ et Γ_4 sont des matrices constantes définies positives de conception de dimension appropriée.

Pour étudier la stabilité du système globale (sous-système 1+ sous-système 2). On considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 + \frac{1}{2} \text{tr} [\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \tilde{W}] + \frac{1}{2} \text{tr} [\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \tilde{V}] + \frac{1}{2} \tilde{C}_1^T \Gamma_3^{-1} \tilde{C}_1 + \frac{1}{2} \tilde{C}_2^T \Gamma_4^{-1} \tilde{C}_2 \quad (\text{V.56})$$

$$\tilde{C}_1 = C_1 - \hat{C}_1, \quad \tilde{C}_2 = C_2 - \hat{C}_2 \quad (\text{V.57})$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2^T \dot{e}_2 + \text{tr} [\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}}] + \text{tr} [\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}}] + \tilde{C}_1^T \Gamma_3^{-1} \dot{\tilde{C}}_1 + \tilde{C}_2^T \Gamma_4^{-1} \dot{\tilde{C}}_2 \quad (\text{V.58})$$

Le remplacement de (V.32) dans (V.42) donne :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2 + e_2^T v_r + e_2^T \omega - \tilde{C}_1^T \Gamma_3^{-1} \dot{\tilde{C}}_1 - \tilde{C}_2^T \Gamma_4^{-1} \dot{\tilde{C}}_2 + \text{tr} [\tilde{W}^T (-\Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}} + \hat{\sigma} e_2^T)] + \\ & \text{tr} [\tilde{V}^T (-\Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}} + X e_2^T \tilde{W}^T \hat{\sigma}')] \end{aligned} \quad (\text{V.59})$$

En utilisant l'expression de v_r (V.35) et Lemme 4.2, on a :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2 - |e_{21}| \hat{C}_1^T \varphi_1 + |e_{21}| \tilde{C}_1^T \varphi_1 - |e_{22}| \hat{C}_2^T \varphi_2 + |e_{22}| \tilde{C}_2^T \varphi_2 - \tilde{C}_1^T \Gamma_3^{-1} \dot{\tilde{C}}_1 \\ & - \tilde{C}_2^T \Gamma_4^{-1} \dot{\tilde{C}}_2 + \text{tr} [\tilde{W}^T (-\Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}} + \hat{\sigma} e_2^T)] + \text{tr} [\tilde{V}^T (-\Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}} + X e_2^T \tilde{W}^T \hat{\sigma}')] \\ & = -e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2 + |e_{21}| \tilde{C}_1^T \varphi_1 + |e_{22}| \tilde{C}_2^T \varphi_2 - \tilde{C}_1^T \Gamma_3^{-1} \dot{\tilde{C}}_1 - \tilde{C}_2^T \Gamma_4^{-1} \dot{\tilde{C}}_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & tr \left[\tilde{W}^T \left(-\Gamma_1^{-1} \dot{\hat{W}} + \hat{\sigma} e_2^T \right) \right] + tr \left[\tilde{V}^T \left(-\Gamma_2^{-1} \dot{\hat{V}} + X e_2^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' \right) \right] \\
 &= -e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2 + \tilde{C}_1^T \left[-\Gamma_3^{-1} \dot{\hat{C}}_1 + |e_{21}| \varphi_1 \right] + \tilde{C}_2^T \left[-\Gamma_4^{-1} \dot{\hat{C}}_2 + |e_{22}| \varphi_2 \right] \\
 &+ tr \left[\tilde{W}^T \left(-\Gamma_1^{-1} \dot{\hat{W}} + \hat{\sigma} e_2^T \right) \right] + tr \left[\tilde{V}^T \left(-\Gamma_2^{-1} \dot{\hat{V}} + X e_2^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' \right) \right] \tag{V.60}
 \end{aligned}$$

on choisissait les lois d'adaptations comme (V.52)-(V.55), $\dot{V}_2$ peut-être bornée comme suite :

$$\dot{V}_2 \leq -e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2 \tag{V.61}$$

A partir de (V.61), il est clair que le système en boucle fermée est stable, c.-à-d. tous les signaux impliqués dans la boucle sont bornés. En utilisant le théorème de Barbalat [84], on peut facilement démontrer la convergence asymptotique de e_1 et e_2 vers l'origine.

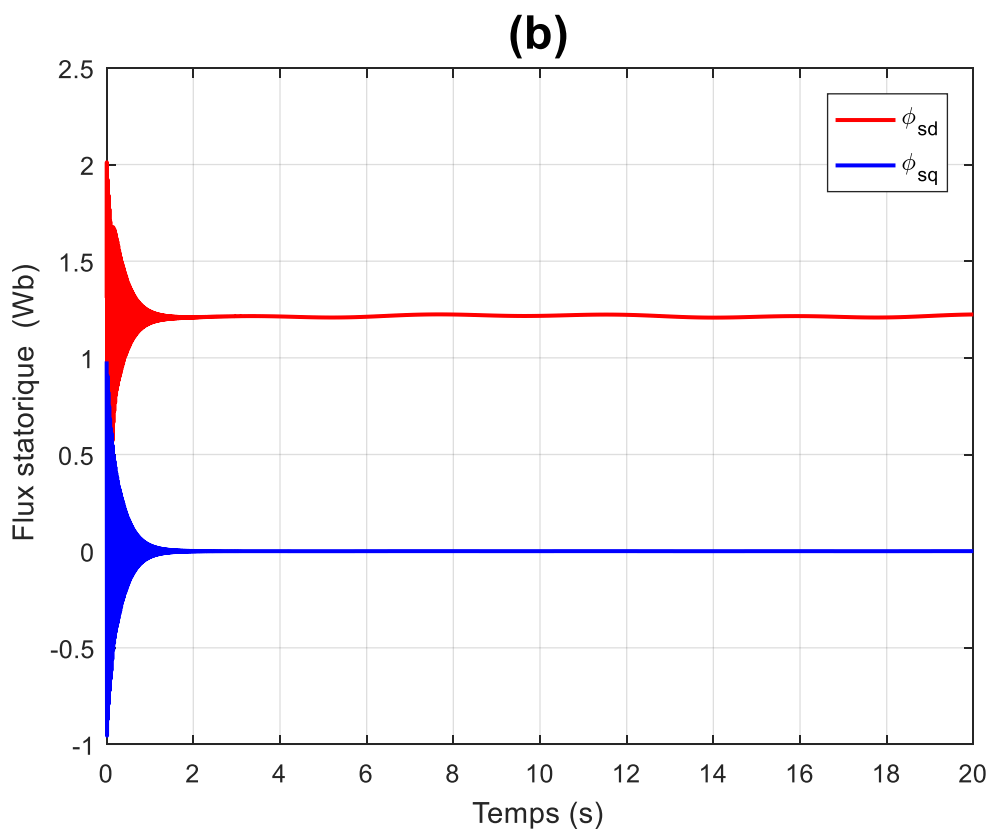
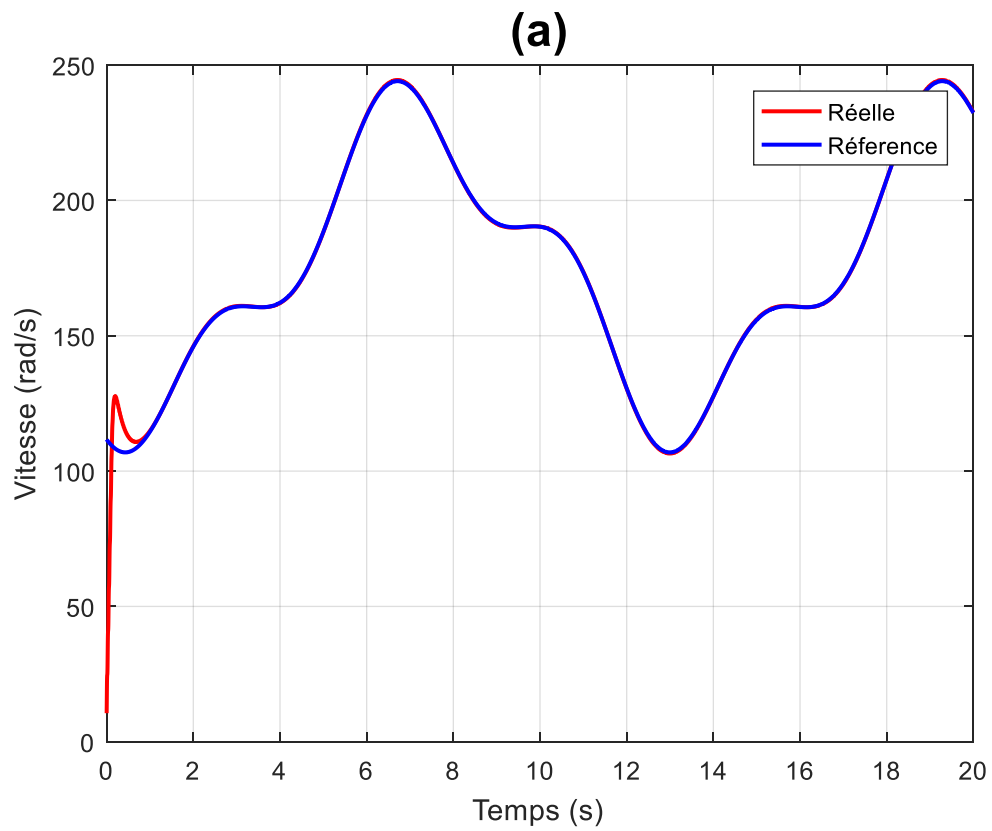
V.8. Résultats de simulation

La commande par Backstepping neuronale a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur avec les paramètres suivants :

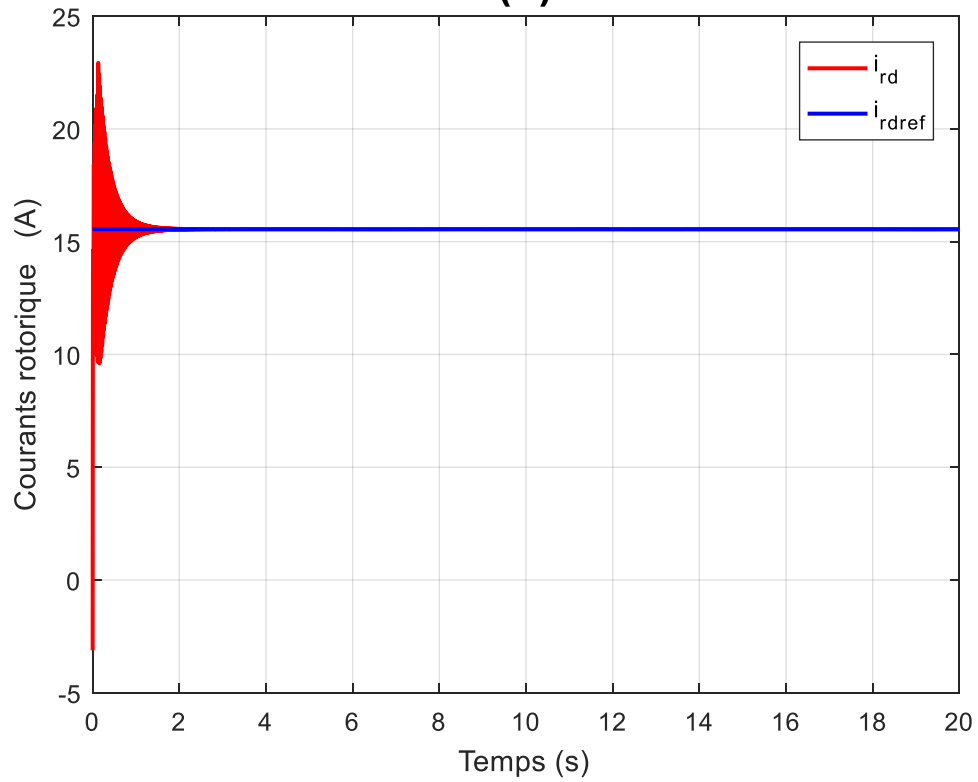
$$k_1 = 200, k_2 = 400, \quad \delta_1 = 0.001, \delta_2 = 0.01, k_3 = 1000, k_4 = 5000, \quad \delta_3 = 0.00001, \delta_4 = 0.00001.$$

V.8.1. Test sous les conditions nominales

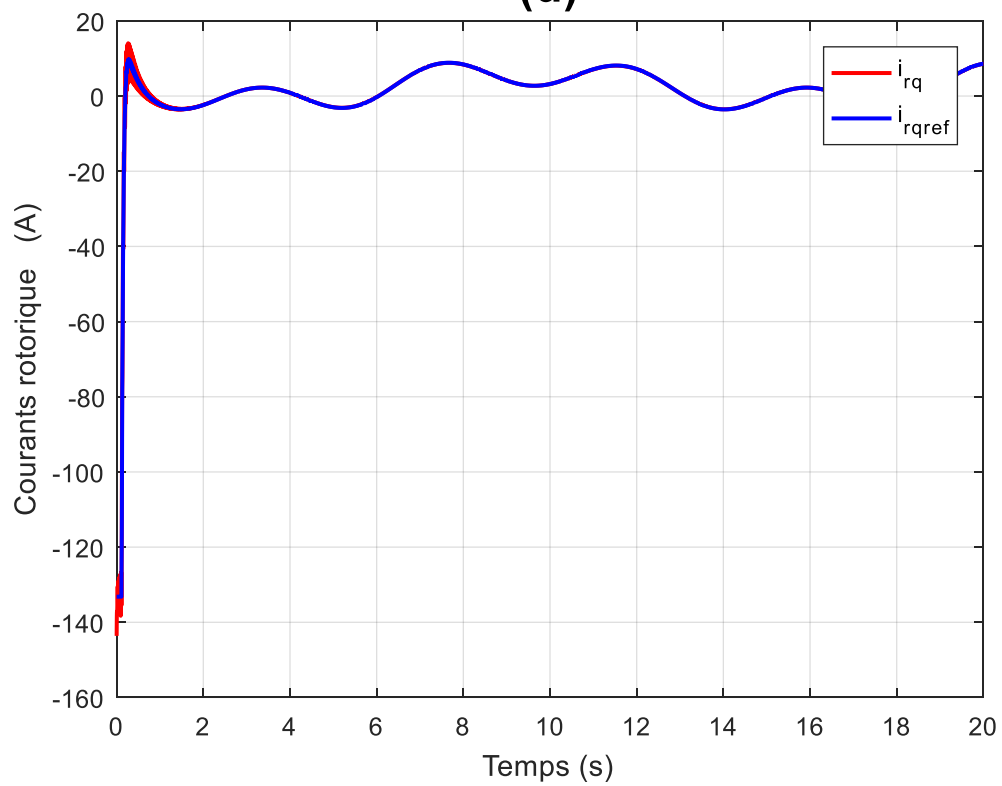
Ici on suppose que les perturbations sont nuls et on applique le même profile de vent de la commande vectorielle PI et la commande Backstepping



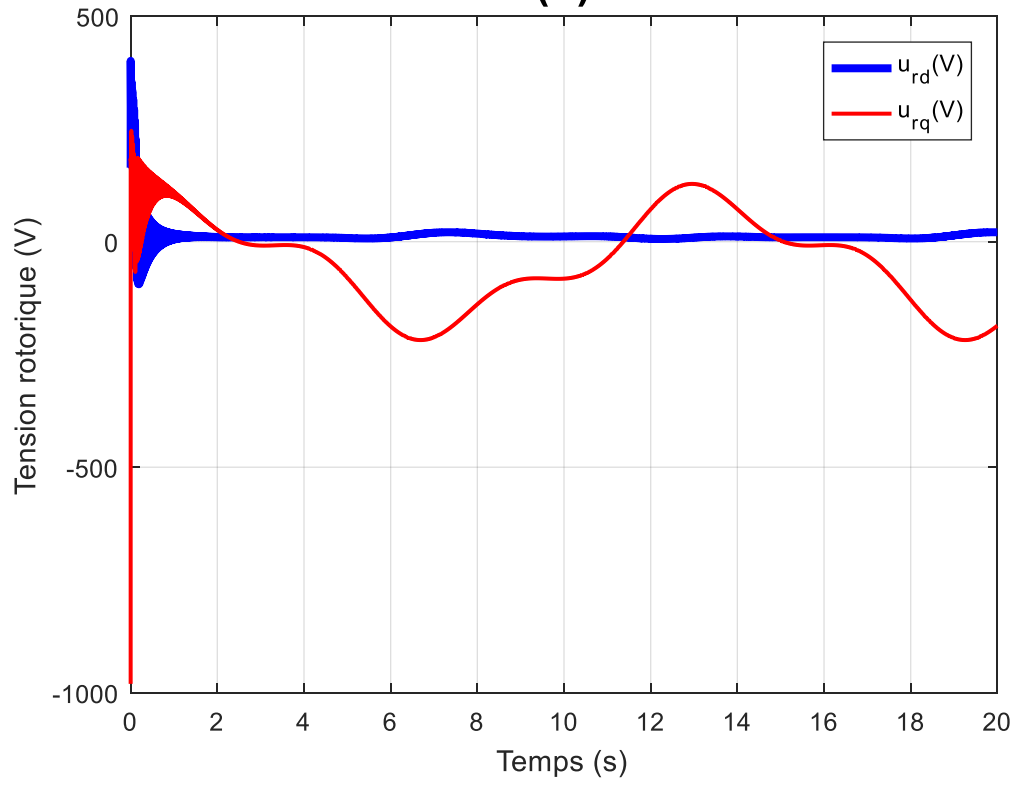
(c)



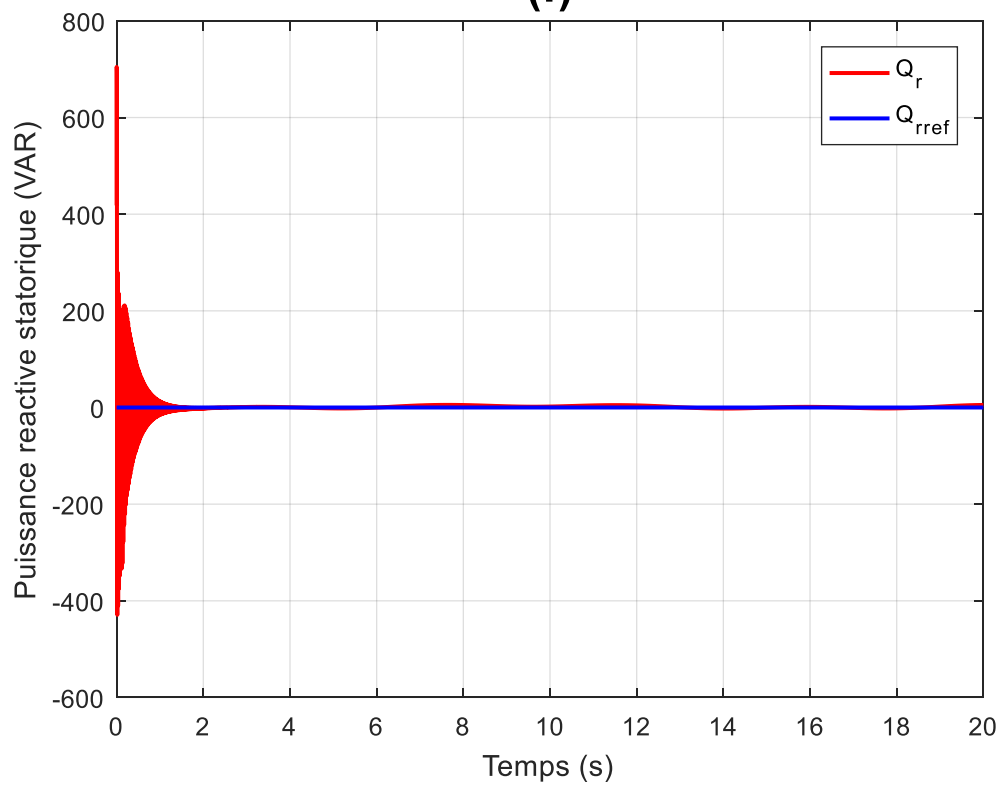
(d)



(e)



(f)



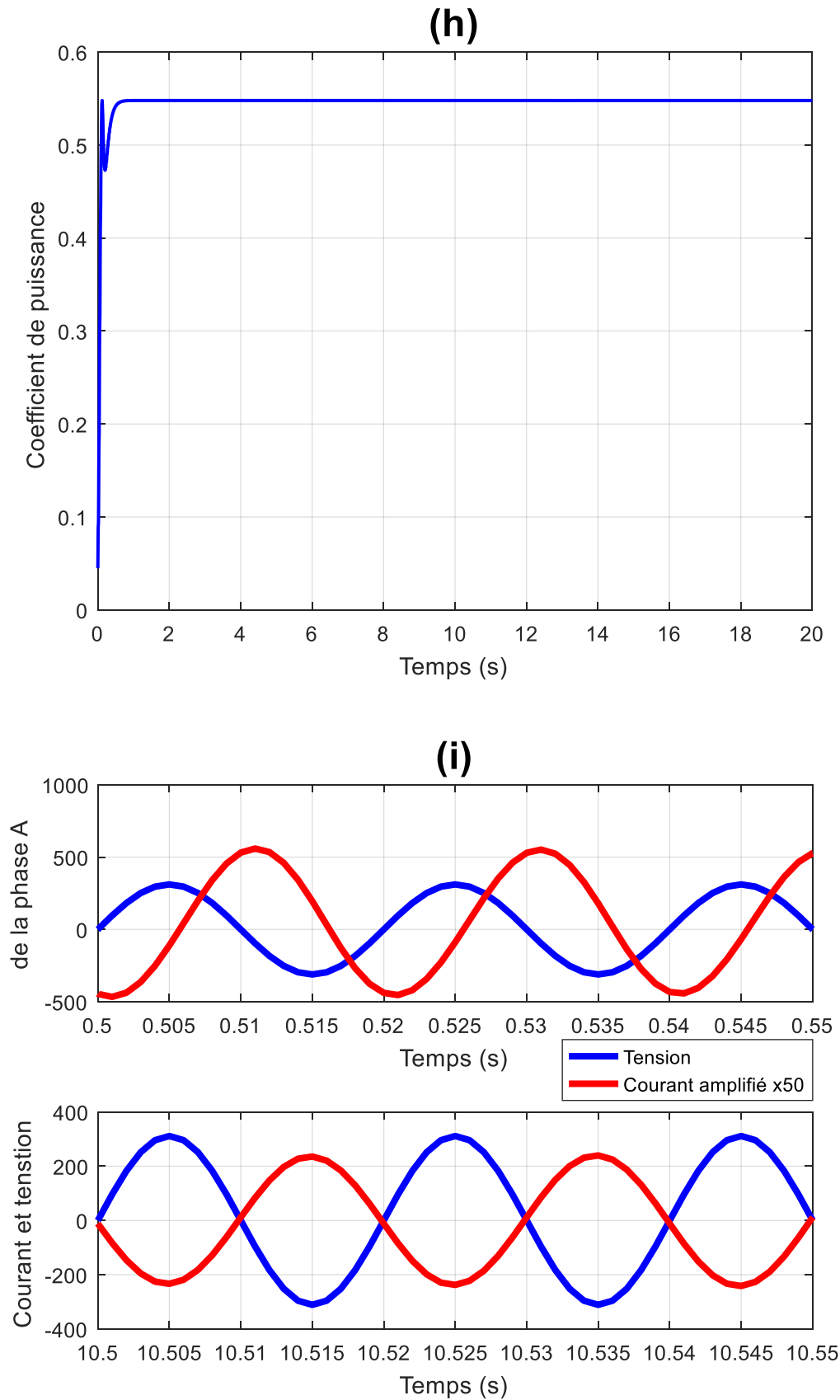
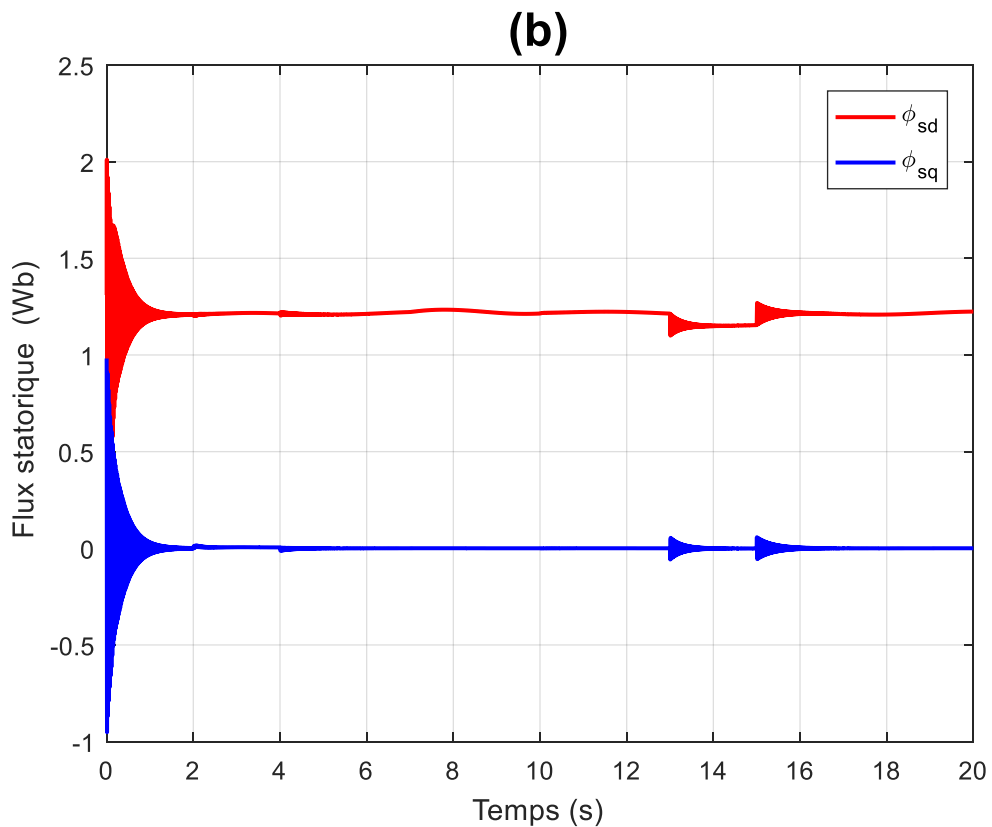
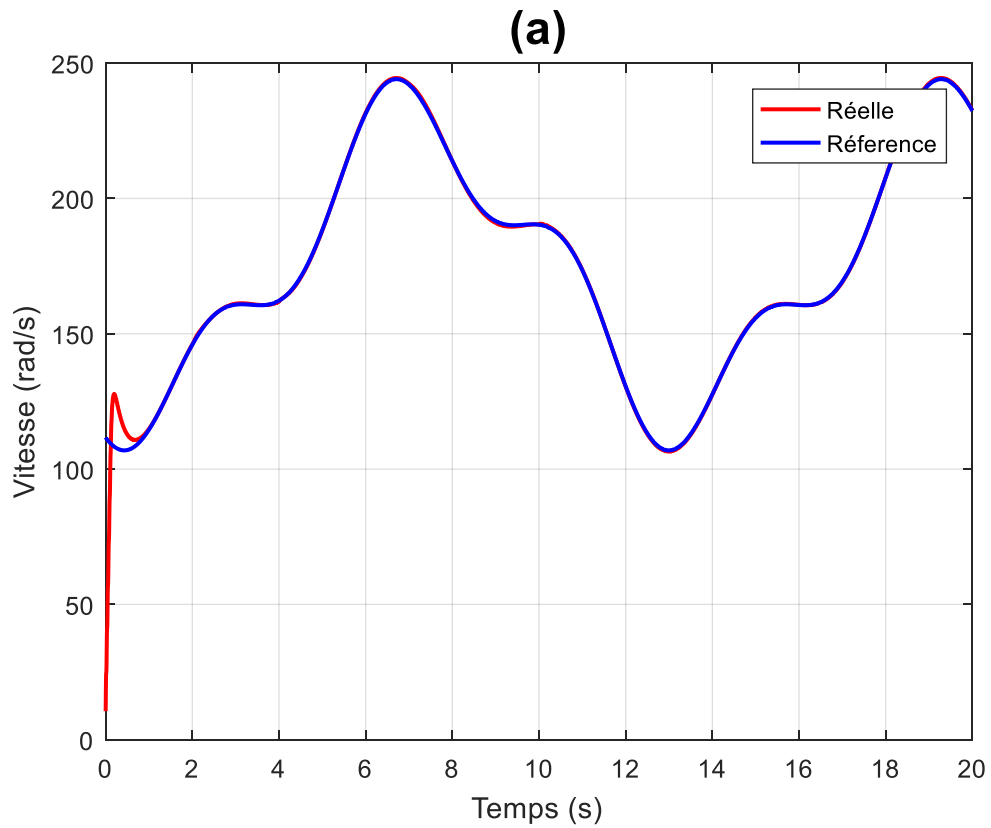


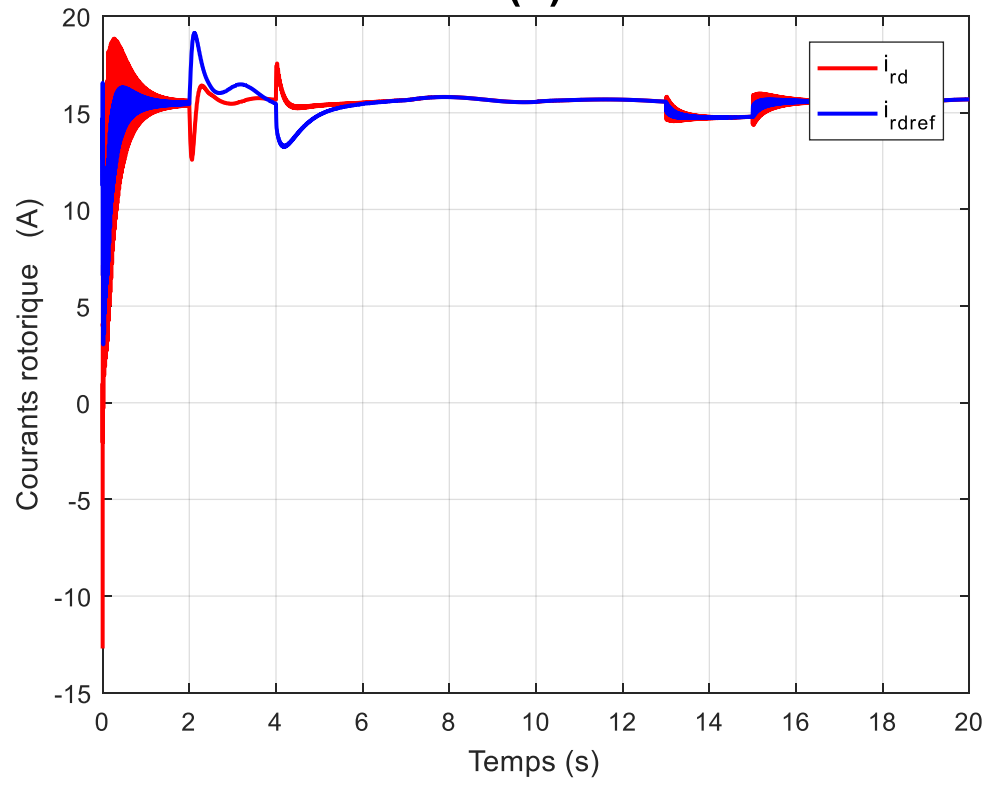
Figure V.12 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping neuronal sous conditions nominales

V.8.2. Test de robustesse

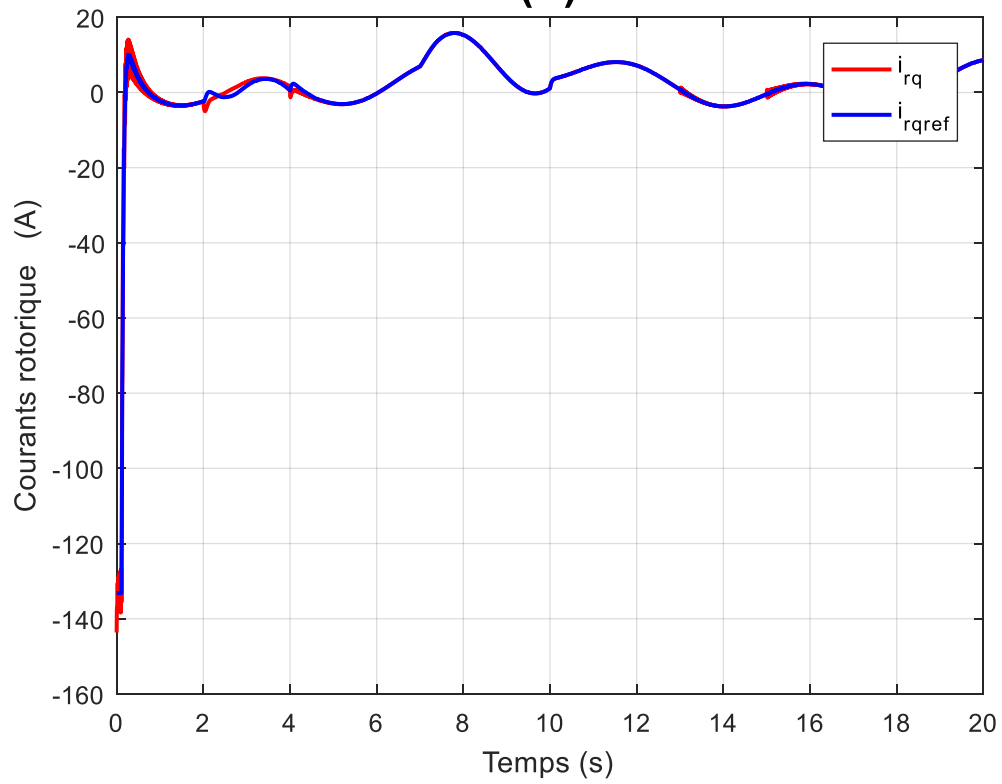
La robustesse de cette loi de commande a été testée en gardant un profil de perturbation identique à celui appliqué précédemment (commande pi et commande Backstepping).



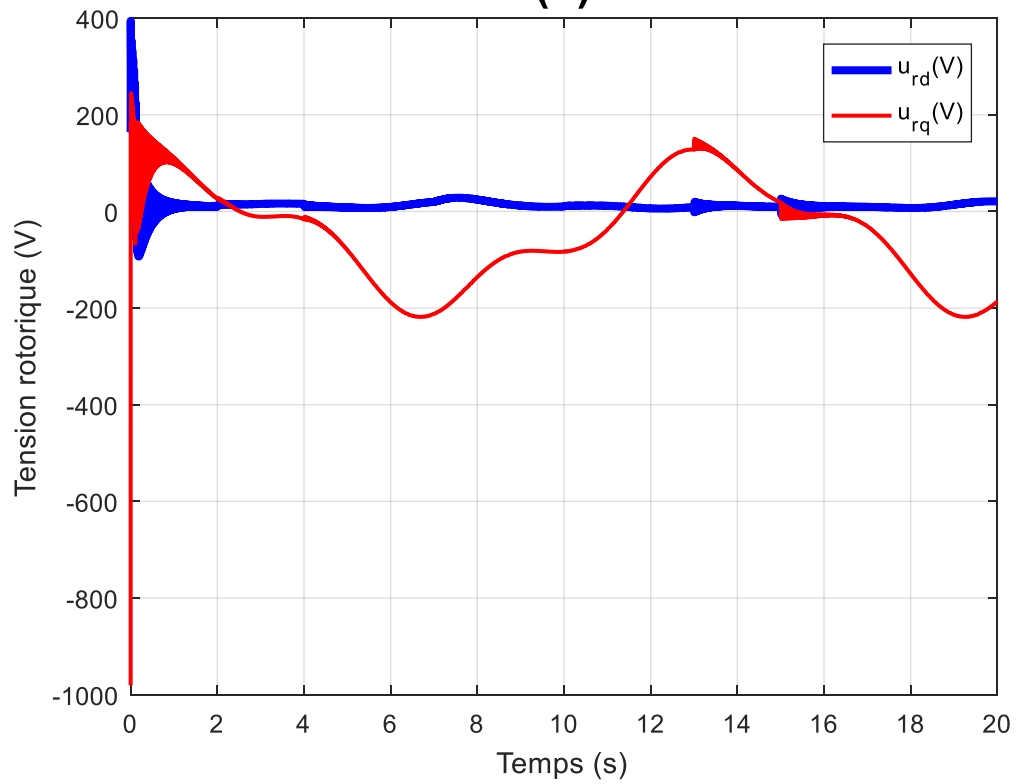
(c)



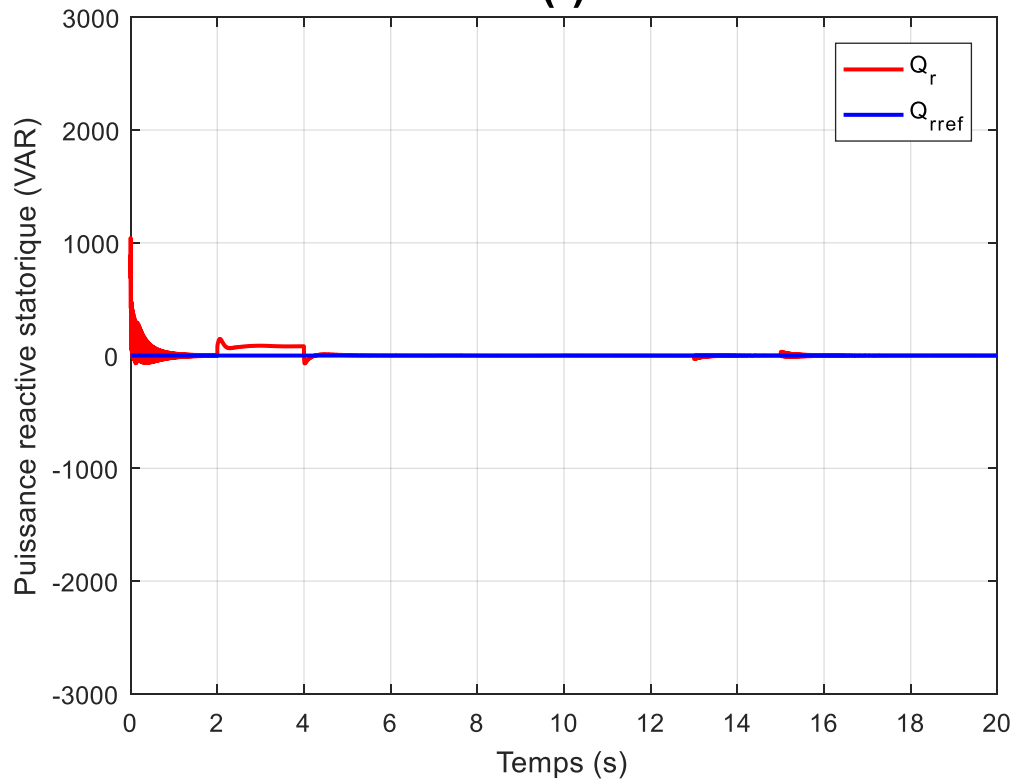
(d)

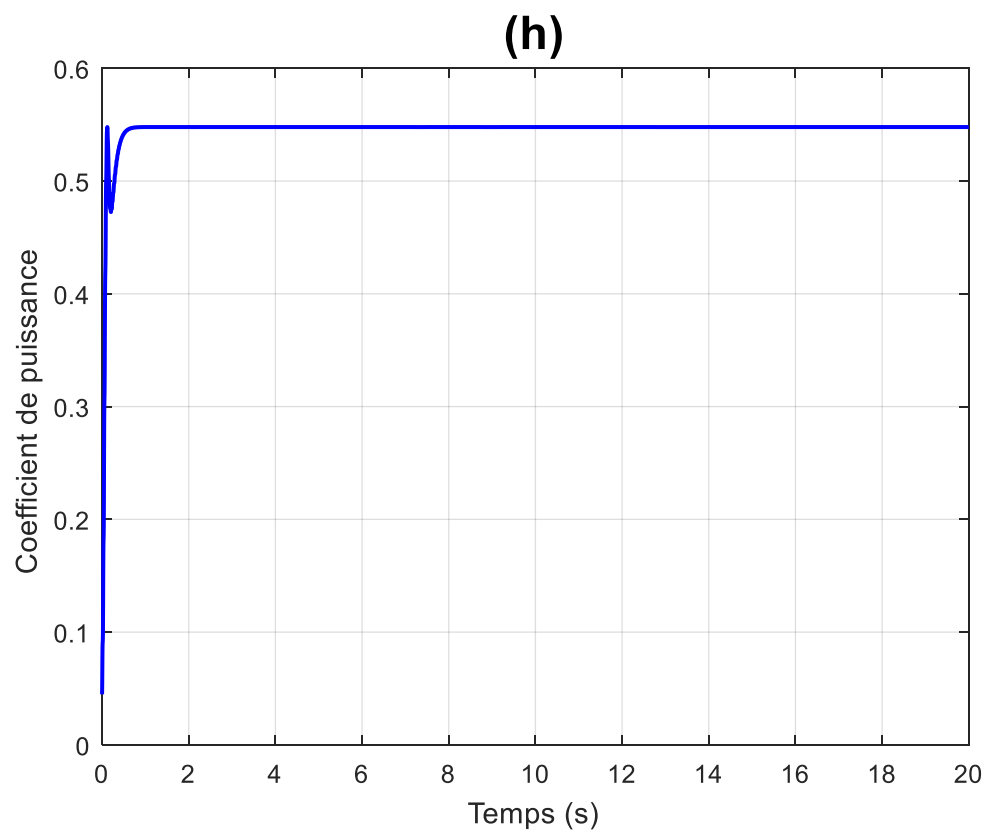
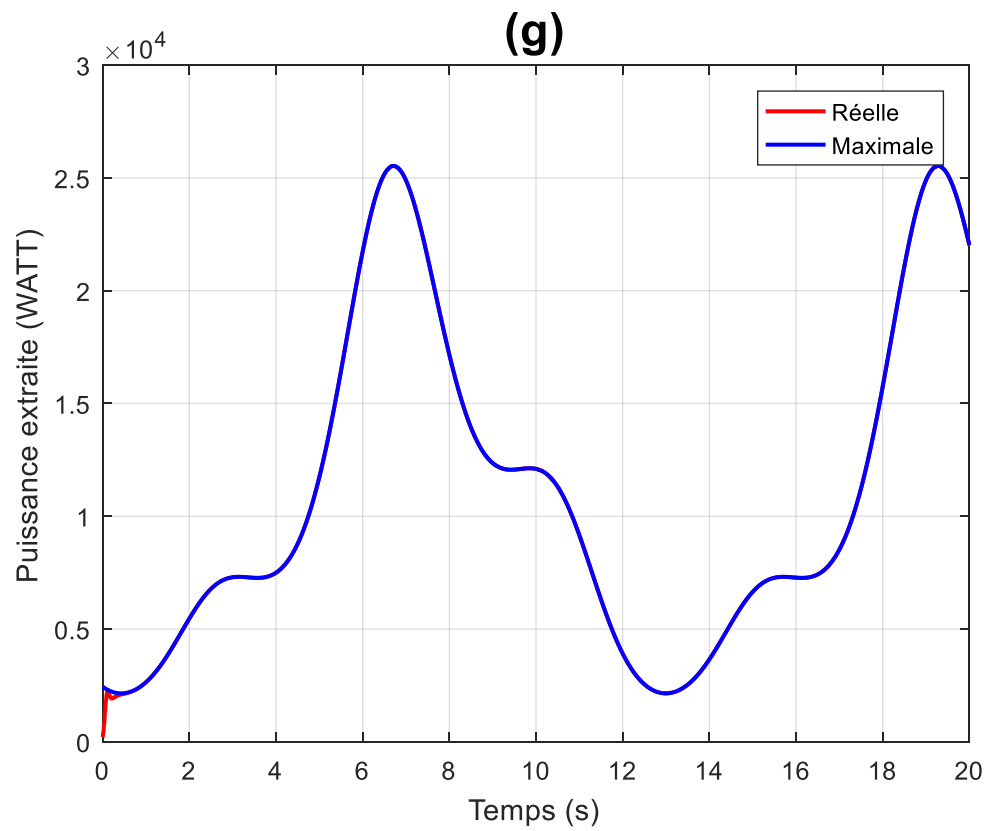


(e)



(f)





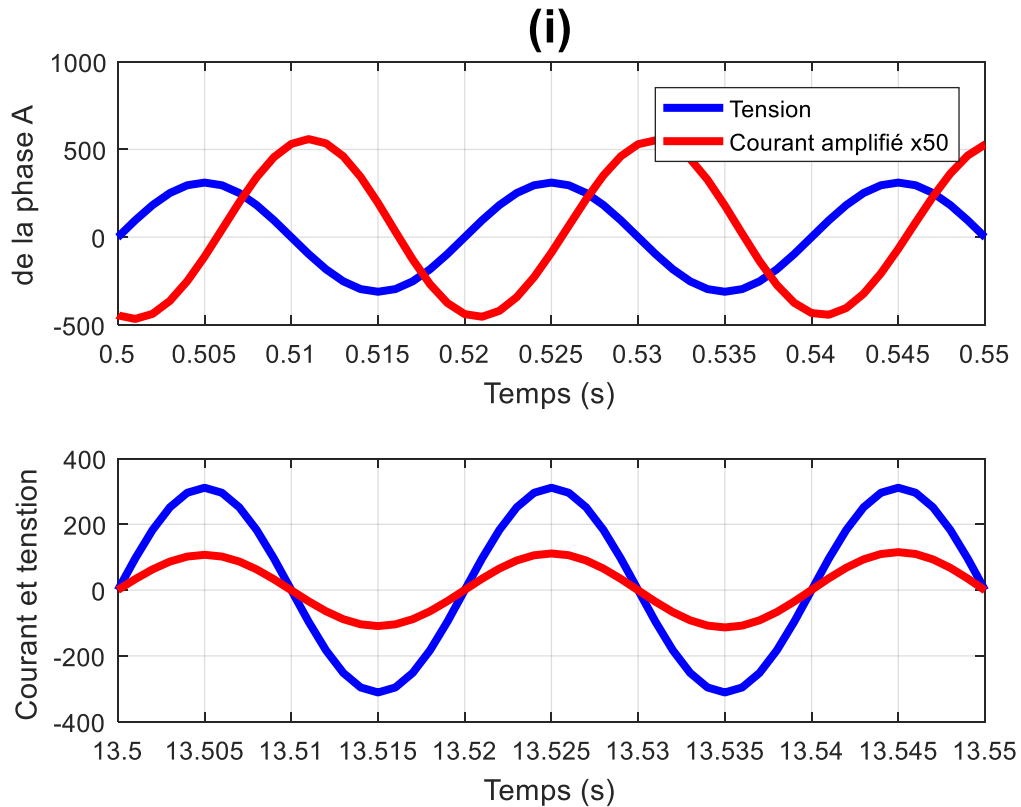


Figure V.13 : Résultats de simulation de la commande par Backstepping neuronal –test de robustesse

L'analyse des résultats repose sur la vérification systématique des objectifs de commande fixés. Les figures V.12.(a–h) présentent la réponse du système en régime nominal, tandis que les figures V.13.(a–h) illustrent son comportement en présence de perturbations dans le cadre du test de robustesse. À la lecture de la figure V.12, il apparaît clairement que le contrôleur satisfait pleinement les objectifs lorsque le système fonctionne sans perturbations. L'intérêt majeur réside toutefois dans son comportement face aux variations paramétriques décrites dans le chapitre III.

L'analyse des performances en situation perturbée (figure V.13) peut être résumée comme suit :

✓ ***Production de puissance maximale (MPPT)***

La figure V.13.a montre que la vitesse de la machine suit correctement sa référence optimale malgré les perturbations. Cela confirme la capacité du contrôleur à extraire la puissance

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

maximale du vent, comme l'illustrent également la puissance mécanique délivrée (figure V.13.g) et le coefficient de puissance qui atteint sa valeur maximale (figure V.13.h).

✓ *Production avec un facteur de puissance statorique unitaire*

La figure V.13.f montre que la puissance réactive statorique reste nulle. Le transfert d'énergie vers le réseau s'effectue donc avec un facteur de puissance unitaire.

✓ *Poursuite des courants*

Les courants rotoriques, représentés dans les figures V.13.c–d, constituent les commandes virtuelles du Backstepping neuronal. Ces courants suivent leurs références avec précision, même en présence de variations paramétriques. L'erreur de poursuite demeure très faible, ce qui confirme la robustesse du contrôleur.

✓ *Qualité des signaux de commande*

La figure V.13.e présente les tensions rotoriques réelles. Celles-ci restent bornées et relativement lisses. On observe une légère augmentation de l'effort de commande en présence de perturbations, ce qui reste cohérent avec la compensation assurée par le contrôleur.

V.9. Etude comparative

Les stratégies de commande développées dans ce travail, ainsi que leurs principales caractéristiques, sont synthétisées dans le tableau V.2.

Une comparaison est ensuite réalisée selon deux critères essentiels : la robustesse et la complexité de mise en œuvre. Une analyse numérique basée sur l'erreur quadratique moyenne (Mean Square Error, MSE) des grandeurs commandées est également effectuée ; les résultats correspondants sont présentés dans le tableau V.3. Enfin, une comparaison graphique des deux commandes non linéaires en présence de perturbations est proposée. Les résultats sont illustrés dans la figure V.14.

Tableau V.2 : Etude comparative entre les commandes présentées.

Commande	Type	Complexité	Robustesse	Problème
Vectorielle(PI)	Linéaire	Simple	Non	-Robustesse

Commande Robuste Neuronal de L'aérogénérateur à Base de la GADA

Backstepping	Non linéaire	Moyenne	Non	-Robustesse
Backstepping Neuronale	Non linéaire	Moyenne	Oui	-Choix des paramètres

V.9. 1. Comparaison numérique

Pour réaliser une comparaison plus précise fiable et claire, on peut utiliser l'erreur quadratique moyenne MSE (mean squared error) des erreurs de poursuite :

Tableau V.3: Comparaison par l'erreur quadratique entre les commandes présentées.

Mode		Sans perturbation				Avec perturbation			
Critère	Commande	Sans perturbation				Avec perturbation			
		MSE i_{qr}	MSE i_{dr}	MSE Q_s	MSE Ω	MSE i_{qr}	MSE i_{dr}	MSE Q_s	MSE Ω
Vectorielle(PI)	Commande	573.87	62.15	$1.75 \cdot 10^7$	31.19	137.39	42.51	$1.58 \cdot 10^7$	42.51
	Commande	21.8	4.84	119.21	50.44	1.14	50.46	106.49	50.46
	Commande	18.97	1.06	34.45	48.71	5.06	48.26	30.92	48.26
Backstepping	Commande	18.97	1.06	34.45	48.71	5.06	48.26	30.92	48.26
	Commande	21.8	4.84	119.21	50.44	1.14	50.46	106.49	50.46
	Commande	573.87	62.15	$1.75 \cdot 10^7$	31.19	137.39	42.51	$1.58 \cdot 10^7$	42.51
Neuronale	Commande	18.97	1.06	34.45	48.71	5.06	48.26	30.92	48.26
	Commande	21.8	4.84	119.21	50.44	1.14	50.46	106.49	50.46
	Commande	573.87	62.15	$1.75 \cdot 10^7$	31.19	137.39	42.51	$1.58 \cdot 10^7$	42.51

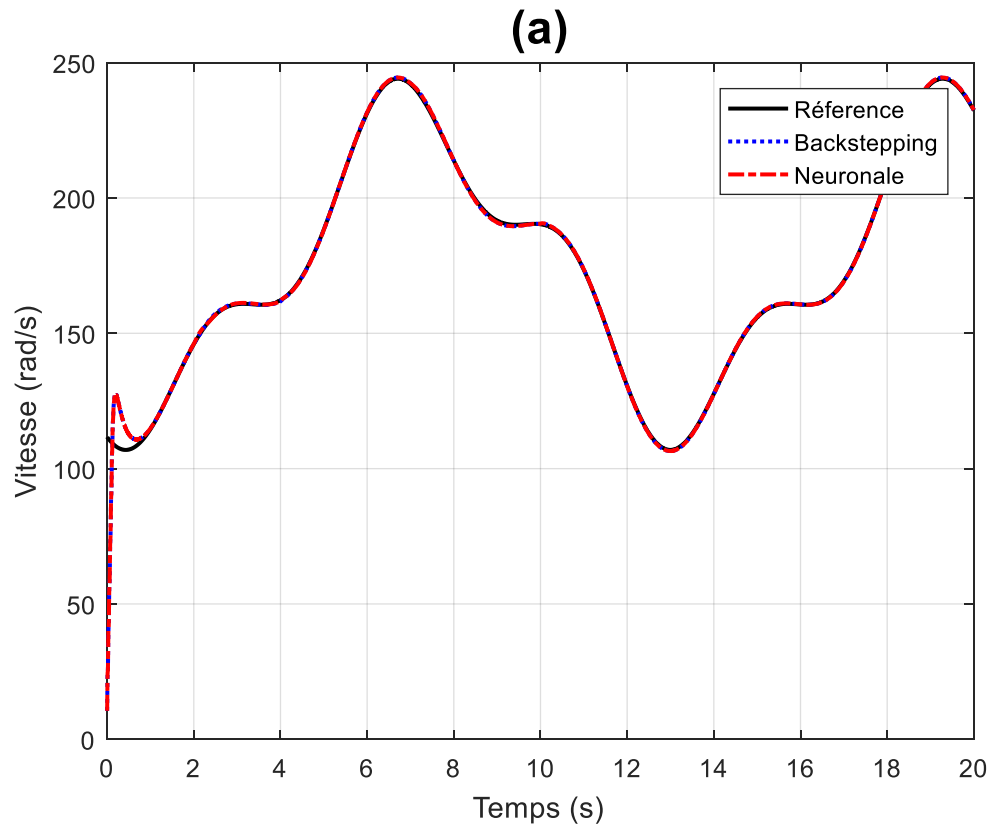
D'après le tableau V.3, on remarque que les résultats de la commande Backstepping neuronale sont plus précis. Ceci confirme l'efficacité de cette approche.

V.9. 2. Comparaison Graphique

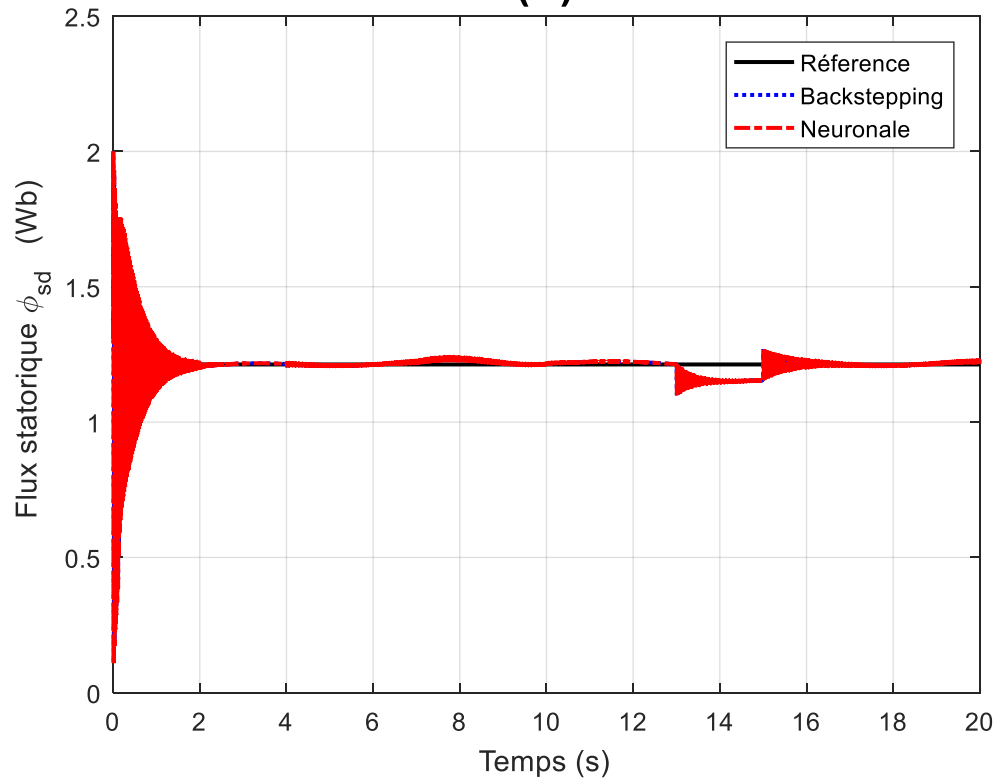
Commande Robuste Neuronale de L'aérogénérateur à Base de la GADA

On peut résumer notre comparaison dans les tableau V.2 V.3 et la figure V.14

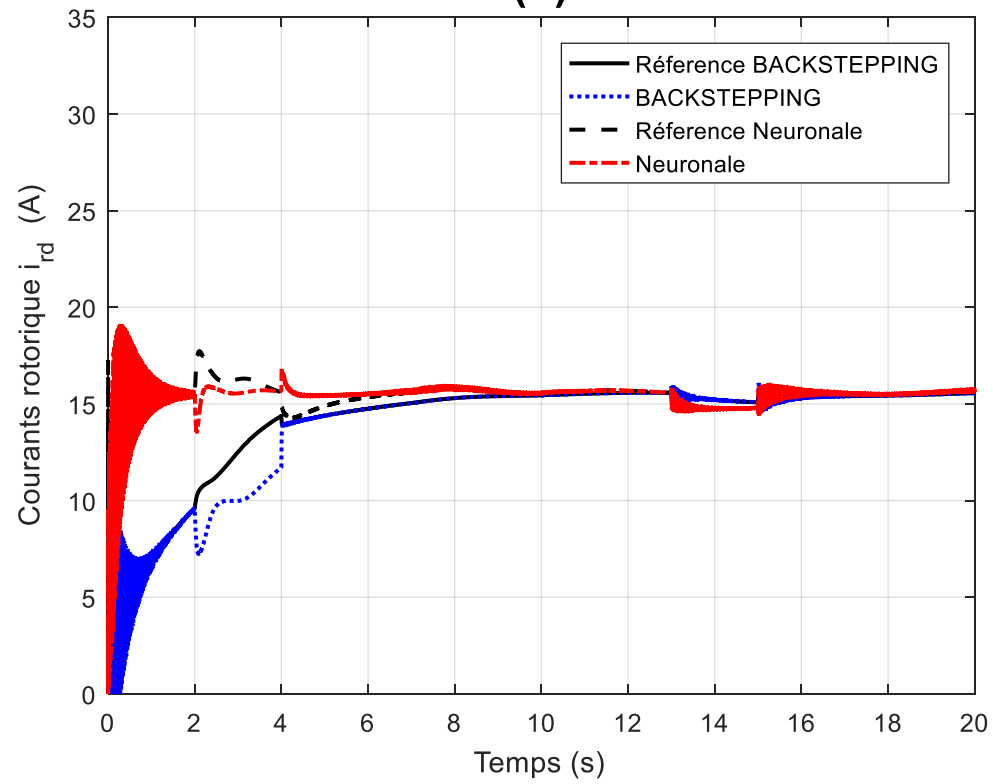
Les deux tableaux montrant une comparaison entre les trois lois de commande présenté dans ce travail notamment la commande PI, Backsteppin, et Backstepping neuronale. Les deux commandes non linéaires sont par la suite présentées dans la figure14.

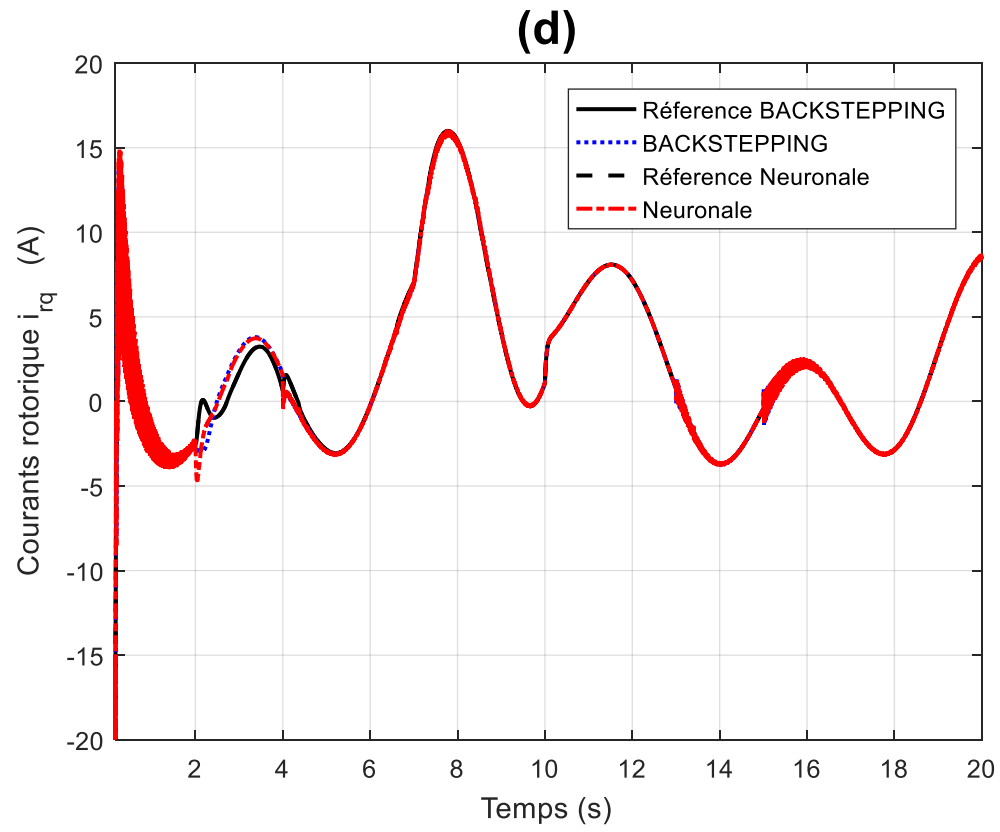


(b)



(c)





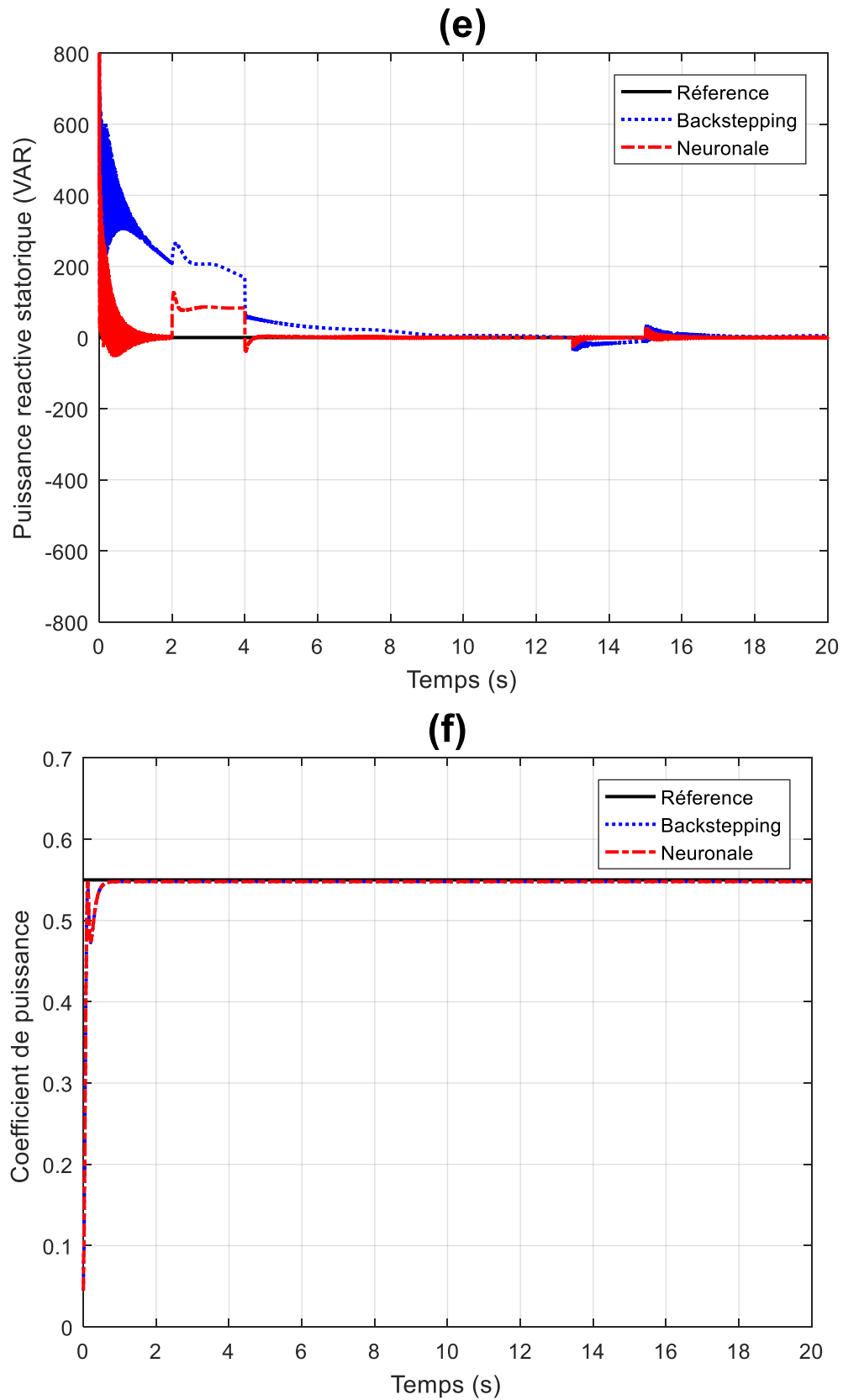


Figure V.14 : Résultats de simulation comparaison entre Backstepping et Backstepping neuronale.

Commande Robuste Neuronale de L'aérogénérateur à Base de la GADA

La supériorité de la commande Backstepping neuronale est claire surtout dans la figure V.14.c-d-e qui représente les courants sur les axes D et Q et la puissance réactive respectivement.

La comparaison des performances entre la commande Backstepping classique et la version neuronale met en évidence plusieurs différences clés. Le Backstepping classique offre de bonnes performances en régime nominal, mais il montre une sensibilité importante aux variations paramétriques et aux perturbations, ce qui peut réduire l'extraction maximale de puissance et engendrer une puissance réactive non nulle. En revanche, la commande Backstepping neuronale présente une robustesse nettement améliorée : elle maintient la vitesse de rotation proche de sa référence optimale et assure un suivi précis des courants rotoriques même en présence de perturbations. Les tensions de commande restent également bornées et lisses, tout en adaptant l'effort de régulation aux variations du système. Cette comparaison souligne que l'intégration d'un réseau neuronal permet de compenser l'incertitude du modèle et d'améliorer la stabilité et la performance globale de l'aérogénérateur.

V.10.Conclusion

Dans ce chapitre, pour surmonter les limites de la commande Backstepping classique en termes de robustesse face aux perturbations, différentes lois de commande robustes reconnues dans la littérature ont été présentées. Par la suite, une commande Backstepping basée sur les réseaux de neurones a été proposée. Cette loi de commande a été construite étape par étape, en garantissant la stabilité du système en boucle fermée grâce au choix approprié des fonctions de Lyapunov.

Les résultats obtenus avec la commande Backstepping neuronale sont très satisfaisants : les objectifs de commande sont atteints, tant pour la maximisation de la puissance active que pour la régulation de la puissance réactive statorique. Une étude comparative des différentes stratégies de commande développées dans cette étude a confirmé la supériorité de la version neuronale, notamment en termes de robustesse et de respect des performances souhaitées.

Le dernier chapitre sera consacré à l'implémentation en temps réel de cette commande sur un banc d'essai équipé d'un émulateur de vitesse et d'une MADA.

Chapitre 6

Validation

Expérimentale

Chapitre VI

Validation Expérimentale

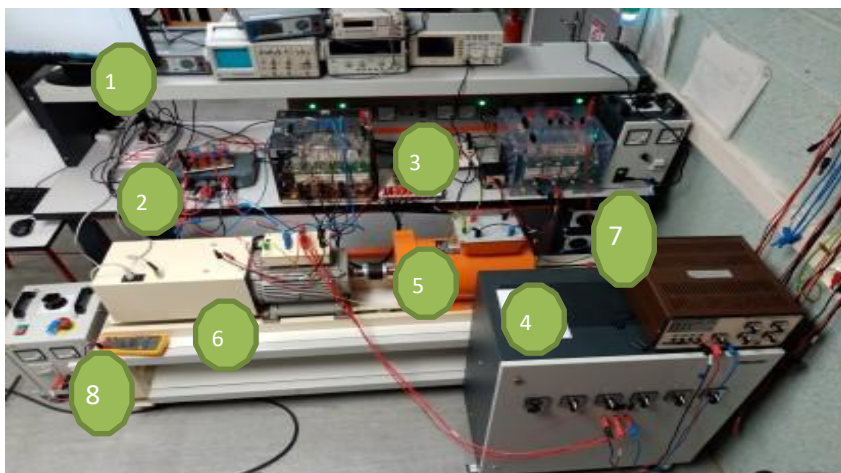
VI.1 Introduction

Ce chapitre conclut ce travail par une validation expérimentale de la commande Backstepping neuronale. Pour ce faire, un banc d'essai a été mis en place au sein du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de l'Aisne, à Cuffies-Soissons.

Le banc d'essai est composé d'une machine à courant continu entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA). L'objectif est d'évaluer le comportement de la machine dans un site connecté au réseau électrique, en simulant différentes conditions de vent et des variations de la demande de puissance.

VI.2. Description du banc d'essai expérimental

La figure VI.1 représente le schéma du banc expérimental



- 1 PC
- 2 dSpace
- 3 Convertisseur
- 4 Charge
- 5 MCC
- 6 MADA
- 7 Réseau
- 8 Filtre

Figure IV.1 : Banc d'essai expérimental au laboratoire L.T.I à Cuffies-Soissons.

Ce banc d'essai est divisé en quatre grandes parties électrique et mécanique à savoir :

- ✓ Un émulateur de vent qui est une machine à courant continu de 4.5 Kw. Elle va entraîner notre génératrice.
- ✓ Une génératrice asynchrone à double alimentation de 1.5 Kw équipée d'un encodeur incrémental de résolution 1024/pts pour mesure sa vitesse de rotation.
- ✓ La génératrice asynchrone à double alimentation est connectée directement vers une charge triphasée et au réseau électrique à travers un synchroscope.

- ✓ Un convertisseur d'électronique de puissance dont lequel on trouve un hacheur élévateur boost pour réguler la vitesse de MCC, un convertisseur bidirectionnel (redresseur + onduleur commandable) pour l'alimentation de la MADA.
- ✓ les différents équipements de mesure qui sont relié à une carte d'acquisition dSPACE 1104.

VI.2.1 Système d'entraînement

Le banc d'essai est doté d'une machine à courant continu alimentée à l'aide d'un variateur de vitesse « LEROY SOMER ».



Figure IV.2 : Plaque signalétique du MCC.

La simplicité de la machine à courant continue permet de construire un émulateur d'une turbine réelle. Cet émulateur a besoin d'un convertisseur élévateur et un correcteur de type PI a fin de réguler la vitesse de l'ensemble MCC et MADA.

Les étape nécessaire pour construire un émulateur sont :

- ✓ Lire les donnés de la machine et la vitesse actuelle de la machine afin de déterminer la vitesse spécifique λ .
- ✓ Calculer le coefficient de puissance et déduire la puissance et le couple de la turbine
- ✓ Calculer le couple de la MADA et le considérer comme couple résistant pour l'émulateur
- ✓ Mettre à jour la vitesse de référence de la machine à partir de l'équation

$$\frac{d\Omega_{mcc}}{dt} = \frac{\Gamma_{mada}}{J} - \frac{1}{J}\Gamma_{est} - \frac{f_r}{J}\Omega_{mcc} \quad (VI.1)$$

Avec Ω_{mcc} la vitesse de la MCC, Γ_{est} c'est le couple de la turbine estimé, et Γ_{mada} c'est le couple résistant de la MADA.

- ✓ Réguler la vitesse de la machine à sa vitesse de référence.

Le schéma de commande de l'émulateur à base de MCC est illustré dans la figure VI.3

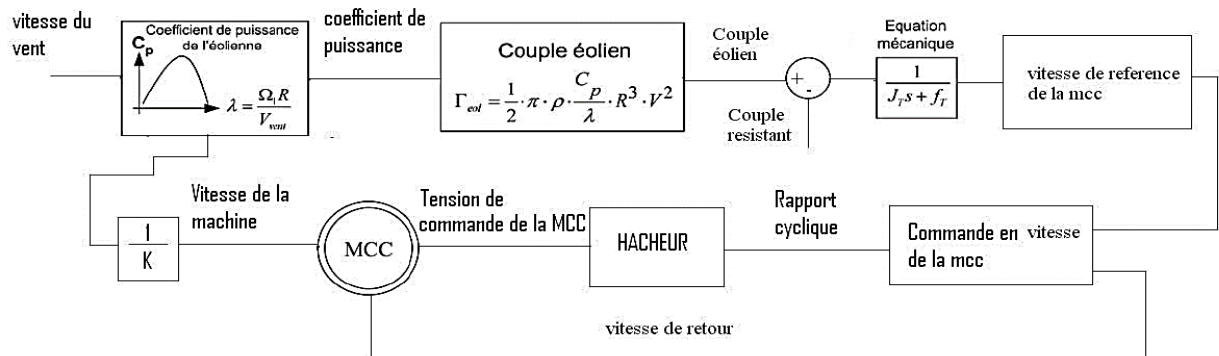


Figure VI.3 : Schéma de commande de la turbine à base de MCC.

VI.2.2 Machine Asynchrone Doublement Alimentée

La génératrice de ce système éolien est une machine asynchrone à double alimentation de puissance 1.5 Kw construite par 'LANGLOIS' et d'un capteur de vitesse de type codeur incrémental comme le montre la figure (VI.4).

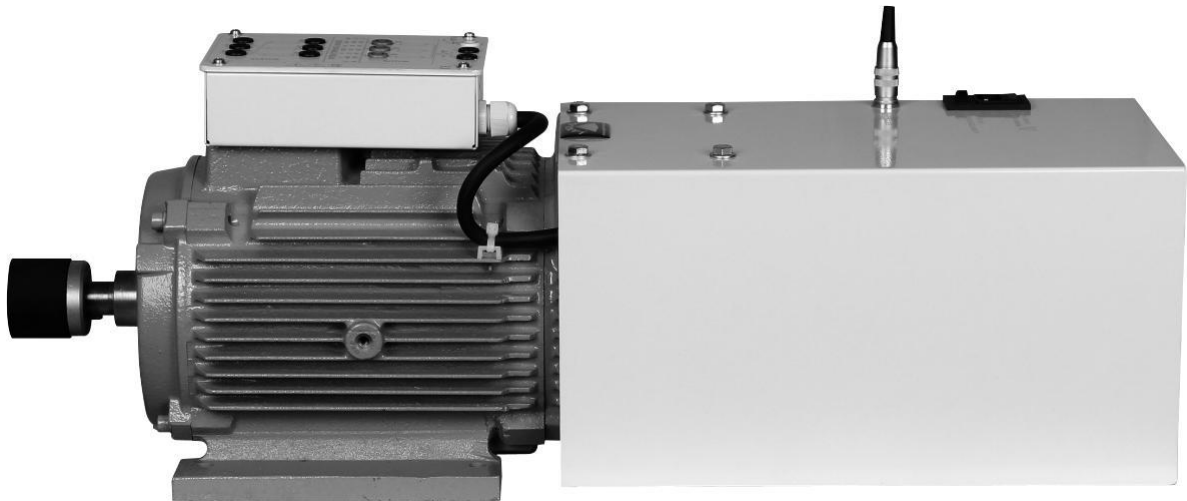


Figure VI.4 : Machine asynchrone a doublé alimentation LANGLOIS MAT-20.

Les paramètres internes de cette machine sont inconnus, et par la suite on présente l'identification de ces paramètres à partir de catalogue de la machine. Pour cela on va s'appuyer sur le schéma électrique équivalent de la machine, illustré en figure VI.5

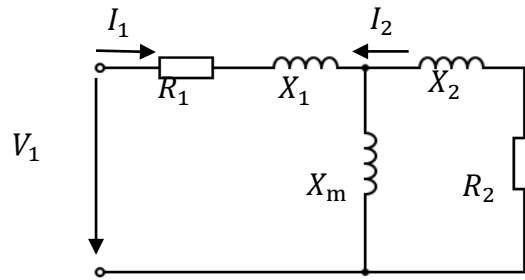


Figure VI.5 : schéma électrique équivalent de la MADA

Avec R_1 , X_1 Résistance et inductance statorique . R_2 , X_2 Résistance et inductance Rotorique ramener au repère statorique , X_m l'inductance mutuelle , S le glissement, V_1 , I_1 tension et courant du stator , finalement I_2 c'est le courant Rotorique ramener au repère statorique

VI.2.3 Partie électronique de puissance

Il s'agit essentiellement d'un convertisseur statique DC/AC développé par la société SEMIKRON ». Ce module est représenté dans la figure (VI.6) et il est composé de plusieurs modules à savoir [50] :

- Un module en pont redresseur « SKD 51/14 » 400 V ; 600 V,
- Un onduleur à base d'IGBT « SKM 50GB123D ». Il est divisé en trois modules de deux IGBT avec un driver 0/15 V DC pour commander chaque module,
- Un hacheur,
- Deux capacités électrolytiques de filtrage 1100 , 800 permettant le filtrage des signaux d'entrés.

La tension continue alimentant l'onduleur provient de la tension triphasée générée par un autotransformateur permettant l'ajustement du niveau de tension sur le bus continu.

La stratégie de commande des bras de l'onduleur est réalisée par modulation de largeur d'impulsion MLI (en anglais PWM). La fréquence de découpage de l'onduleur est choisie de l'ordre de 10KHz [50]. Elle est limitée par des contraintes matérielles. Les principales bornes du convertisseur SEMIKRON sont présentées dans la figure VI.6.

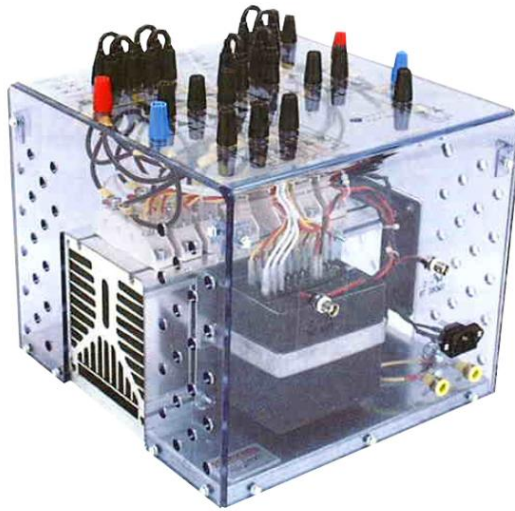


Figure VI.6 : Convertisseur SEMIKRON .

VI.2.4. Unité de mesure et d'acquisition

Afin de contrôler et de s'assurer du bon fonctionnement du système éolien, le banc d'essai est équipé par des outils de mesure de tension (capteur tension), du courant (capteur courant) et de la vitesse.

La mesure de la position est effectuée à l'aide d'un codeur incrémental placé au bout de l'arbre de la DFIG ayant une résolution de 1024 points par tour. La vitesse est déterminée à partir de la mesure de la position par une approximation numérique de la dérivée

VI.2.4.1 Capteur courant

Afin de mesurer les courants de la DFIG, quatre sondes de courant à effet hall « LEM LTS 25-NP » ont été intégrées dans le montage et présentées dans la figure (VI.7). Parmi les quatre sondes, deux servent à mesurer les courants statoriques sur les deux phases, le courant dans la troisième phase est calculé à partir des deux autres. Les deux autres sondes sont utilisées pour mesurer les courants rotoriques [50].



Figure VI.7 : Capteur de courant.

VI.2.4.2. Capteur Tension

Afin de mesurer les tensions de commande côté rotor et les tensions aux bornes de la charge, deux modules « Metrix MTX 1032 B » ont été utilisés. Chaque module contient deux sorties de mesure de la tension (deux pour les tensions statoriques et deux pour les tensions rotoriques). Ainsi, le module permet une atténuation de 100x ou de 10x par le biais d'un bouton situé en face avant du capteur. L'entrée coaxiale de cet appareil est utilisée pour la liaison des sondes avec la carte dSpace [50].



Figure VI.8 : Capteur et diviseur de tension.

VI.2.4.3. Carte dSpace 1104

Les aspects logiciels et numériques de la commande sont assurés par la carte Dspace 1104. La figure (VI.9) représente la carte dSpace utilisée pour ce banc. Elle permet d'assurer l'aspect numérique de la commande, depuis l'acquisition numérique des signaux d'entrées jusqu'aux signaux de commandes (signaux de sorties).

Les programmes développés sous l'environnement Simulink sont implantés au sein de la carte dSpace. Cette carte est équipée d'un logiciel d'interface graphique Control DESK. Cette interface graphique permet d'une part l'implantation aisée des lois des commandes complexes sous forme de schémas blocs ou programmes en langage C. D'autre part, elle nous donne la possibilité de la visualisation en temps réel de toutes les variables disponibles sur les schémas Simulink/dSpace de la commande [50].

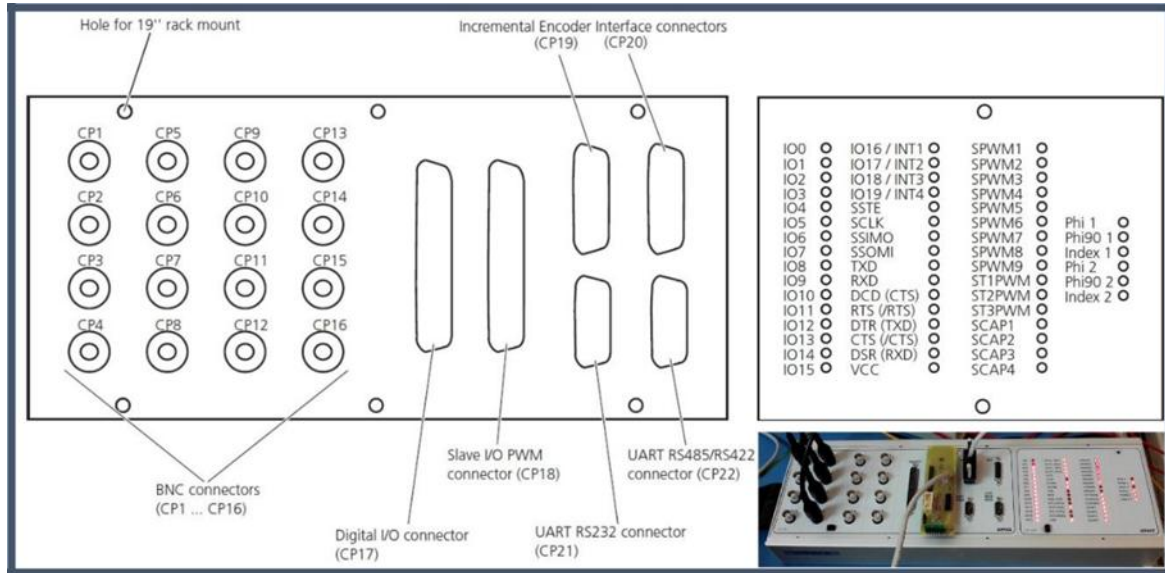


Figure VI.9 : Extension de la carte d'acquisition dSPACE1104.

VI.3 Identification de la machine asynchrone à double alimentation

VI.3.1. Technique d'identification

Les données fournies par le constructeur n'incluent pas les valeurs des résistances et des inductances, ni statoriques ni rotoriques. Or, la plupart des commandes non linéaires utilisées reposent sur ces paramètres. Il est donc nécessaire de les estimer à partir des informations disponibles dans la datasheet du constructeur [95].

Parmi ces information on trouve:

- ✓ Le courant nominal (rated current) I_{1N}
- ✓ Le coefficient de puissance nominal (rated power factor) pf_N
- ✓ Le couple nominal (rated torque) T_N
- ✓ Le couple maximal (breakdown torque) T_{Max}
- ✓ Le courant de démarrage (locked rotor current) $I_{1,0}$
- ✓ Le couple de démarrage (locked rotor torque) T_0

On va construire un vecteur de référence appelé M_{data} , avec

$$M_{data} = [I_{1N}, pf_N, T_N, T_{Max}, I_{1,0}, T_0] \quad (VI.2)$$

On définit les paramètres à estimer

$$P = [R_1, X_1, X_m, R_2, X_2] \quad (VI.3)$$

Tout d'abord, à partir du schéma équivalent du MADA on peut déterminer sa impédance équivalente par :

$$A(s) = \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_2/s + jX_2} \quad (VI.4)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{A} \quad (VI.5)$$

maintenant c'est facile de déduire le courant statorique en fonction de glissement par

$$I_1(s) = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + Z_{eq}} \quad (VI.6)$$

$$I_1(s) = |I_1(s)| < \theta(s) \quad (VI.7)$$

Le coefficient de puissance dans le régime nominal est donné par :

$$pf = 100 * \cos \theta (s_n) \quad (VI.8)$$

Ou s_n c'est le glissement nominal.

Le courant statorique est déduit à partir de cette équation :

$$I_2 = \frac{Z_{eq} * I_1}{jX_2 + \frac{R_2}{s}} \quad (VI.9)$$

Finalement l'expression du couple de la machine est déduit par

$$T = \frac{3 p R_2 I_2}{s W_s} \quad (VI.10)$$

avec $W_s = 2\pi f$, p c'est le nombre de paire de poles.

À partir de différentes valeurs de vecteur P on aura différentes estimations de Mdata, on appelle le vecteur estimé E_{data} il contient les 6 valeurs suivantes :

$$E_{data} = [I_1(s_n), pf, T(s_n), \max(T(s)), I_1(s=1), T(s=1)] \quad (VI.11)$$

avec

Le courant nominal lorsque $s=s_n$

Le coefficient de puissance nominal lorsque $s=s_n$.

Le couple nominal T_N lorsque $s=s_n$

Le couple maximal T_{Max}

Le courant de démarrage I_1 lorsque $s=0$

Le couple de démarrage T lorsque $s=0$

VI.3.2. Identification par essai particulière

L'essai de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position

(vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines ». Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée à l'instant t par son vecteur position x_i^t et par son vecteur vitesse v_i^t . La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $pbest_i$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $gbest$. Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation [96-97]:

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 \times rand \times (pbest_i - x_i^t) + c_2 \times rand \times (gbest - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad (V.12)$$

où $V_i(t)$ est la vitesse de particule i à l'instant t , $x_i(t)$ est la position de particule i à l'instant t . w , c_1 , c_2 sont des facteurs de poids, $rand$ est un nombre aléatoire entre $[0, 1]$, $pbest_i$ est la meilleure solution obtenue par la particule i , $gbest$ est la meilleure solution obtenue par toutes les particules.

Tout d'abord on définit la fonction objective à minimiser par l'équation suivante:

$$\begin{cases} \min_{X \in \Omega} J(X) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \|M_{data(i)} - E_{data(i)}\|^2 \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (VI.13)$$

Avec $\|vecteur\|$ cest la norme L2 de ce vecteur.

VI.3.3. Résultats de l'identification par essaim particulaire

Prenons une population de 20 particules et de 100 itérations maximales. La position et la vitesse initiale sont choisies aléatoirement. Les paramètres d'algorithme sont :

$$W = 0.7; \quad C1 = 2; \quad C2 = 2;$$

Les paramètres du constructeur de notre machine sont résumés dans le Tableau VI.1 et les résultats d'estimation sont présentés dans le tableau VI.2

La figure VI.6 représente les courbes obtenues avec les valeurs de manufacture. On remarque qu'on a bien approché les valeurs de la MADA.

Tableau VI.1 : Paramètres du constructeur.

Paramètre	Valeur
Vitesse de rotation	1340 tr/min
Puissance Utile	1500 W
Fréquence réseau	50 Hz
Tension d'alimentation en couplage Triangle	230 V
Tension d'alimentation en couplage Etoile	400 V
Intensité absorbée en couplage Triangle	6,4 A
Intensité absorbée en couplage Etoile	3,7A
Tension rotor (couplage Etoile)	58 V
Intensité rotor (couplage Etoile)	15A
Cosinus phi	0,8
Moment d'inertie	0,022 kgm ²

Tableau VI.2 : Paramètres de la MADA..

Paramètre	Valeur
Stator resistance R_s	44.43 Ω
Rotor resistance R_r	23.6742 Ω
Stator inductance L_s	0.0131 H
Rotor inductance L_r	0.0173 H
Mutual inductance M	1.2306 H
Fitness function	0.528669

De la figure VI.10 on voit qu'il y a une correspondance entre les valeurs décrit dans le catalogue et les valeurs déterminées à partir du tableau VI.2

- ✓ Les points rouges (*) dans la figure représente ces caractéristiques
- ✓ lorsque la vitesse est 0 c.à.d. le glissement $S=1$ on a le courant et le couple de démarrage
- ✓ lorsque la vitesse est 1340 c.à.d. le glissement S est nominale on a le courant et le couple nominaux
- ✓ le maximum du couple est repéré dans la figure VI.2 ainsi

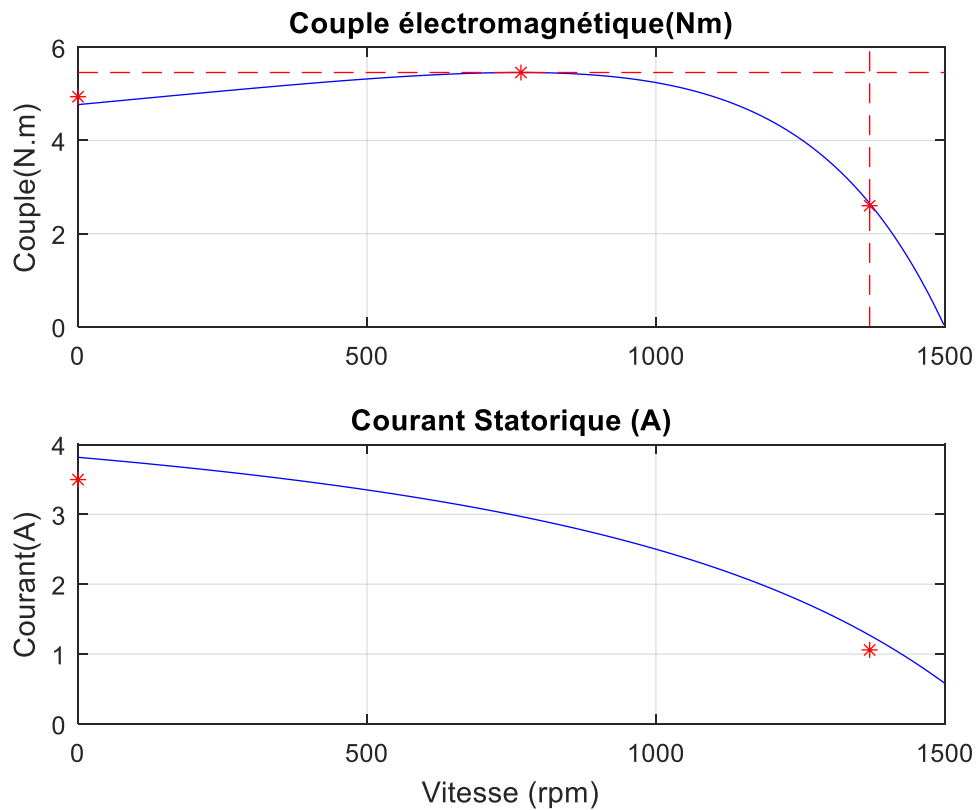


Figure VI.10 : Résultats d'optimisation avec l'algorithme de PSO.

VI.4. Description des essais expérimentaux

L'objectif principal des essais était d'assurer la sécurité de la machine, de la charge, du réseau, ainsi que le bon fonctionnement global du système. Pour cela, l'énergie produite par la MADA est initialement dirigée vers une charge triphasée équilibrée et variable.

La première étape consiste à synchroniser la MADA avec le réseau électrique, après l'énergie produite est injectée dans le réseau. Il est essentiel que cette synchronisation soit rapide et progressive. L'algorithme présenté dans le chapitre III est utilisé pour contrôler l'amplitude, la fréquence et le déphasage des tensions statoriques. Ces grandeurs doivent rester stables quelles que soient les variations de la vitesse, du vent et de la puissance demandée par la charge. Le schéma bloc du banc d'essai expérimental est présenté à la figure VI.11.

Pour des raisons de sécurité, la tension statorique de référence est initialement fixée à environ 110 V à l'aide d'un autotransformateur. Cette valeur sera modifiée après la synchronisation afin d'évaluer les performances de la commande Backstepping neuronale.

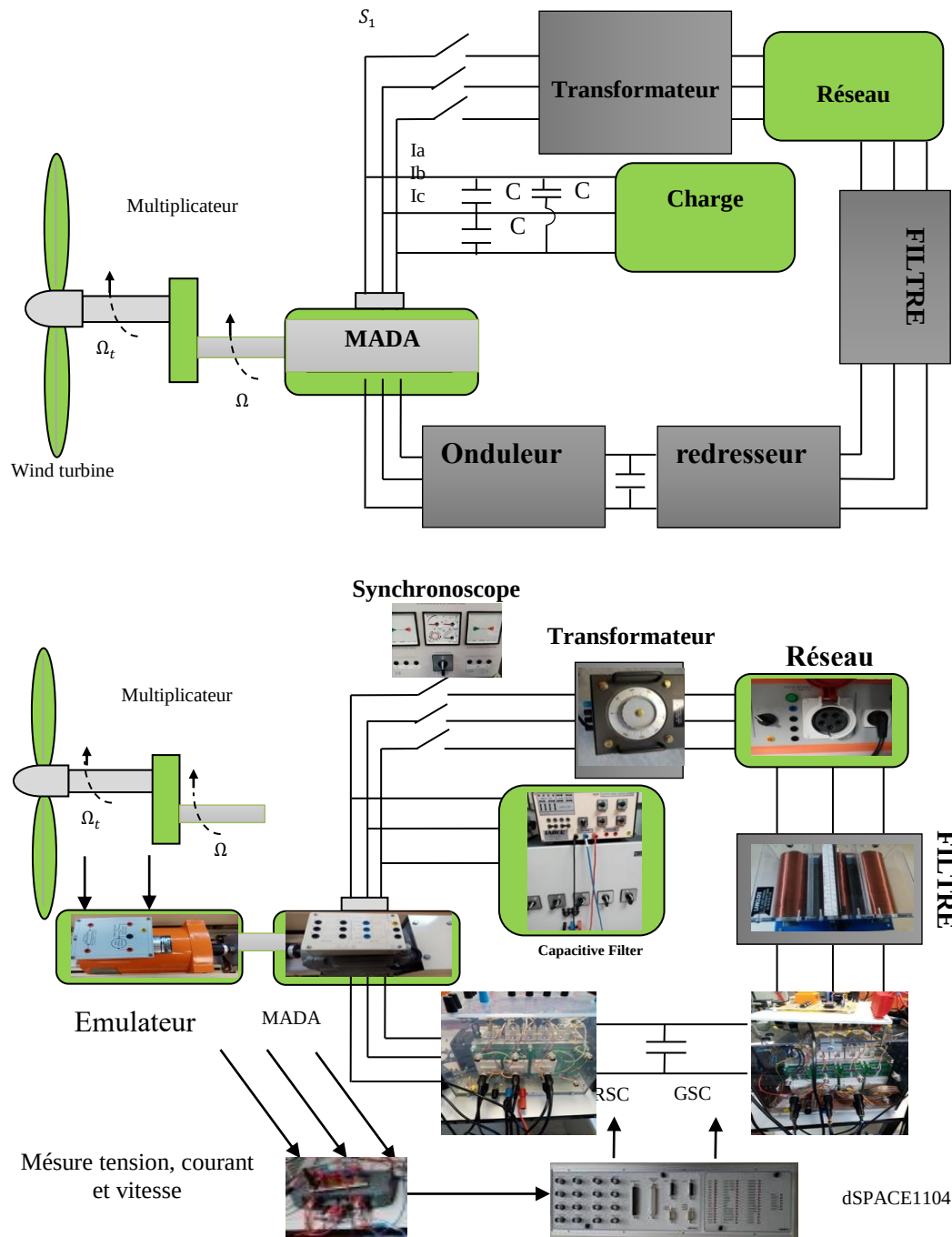


Figure VI.11 : Banc d'essai simplifié et son schéma de commande

Après une synchronisation réussie, l'objectif est d'injecter dans le réseau la puissance maximale disponible du vent, représentée ici par la puissance de l'émulateur de la turbine. Il est essentiel de s'assurer que la vitesse de rotation suit son profil optimal et que la puissance réactive injectée reste nulle.

La synchronisation et la commande de la MADA sont effectuées côté rotor via le convertisseur DC/AC. Pour contrôler le fonctionnement du système en temps réel, les courants et tensions statoriques et rotoriques, ainsi que la vitesse de la DFIG, sont mesurés et affichés de

manière fiable. La commande repose sur ces différentes grandeurs mesurées pour assurer une régulation précise et stable.

VI.4. Présentation des résultats expérimentaux

Le réseau de neurones utilisé est de petite taille, comprenant 10 neurones et une seule couche cachée, ce choix étant dicté par la mémoire flash limitée à 8 Mo de la carte dSPACE.

L'acquisition des différents signaux est réalisée à l'aide d'un ordinateur connecté à une carte dSPACE 1104. Le profil de variation de la vitesse du système d'entraînement est défini dans le programme Simulink/dSPACE. Pour atteindre les objectifs fixés, la commande côté rotor est entièrement intégrée dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Le profil de vent utilisé lors des tests expérimentaux est présenté à la figure VI.12.

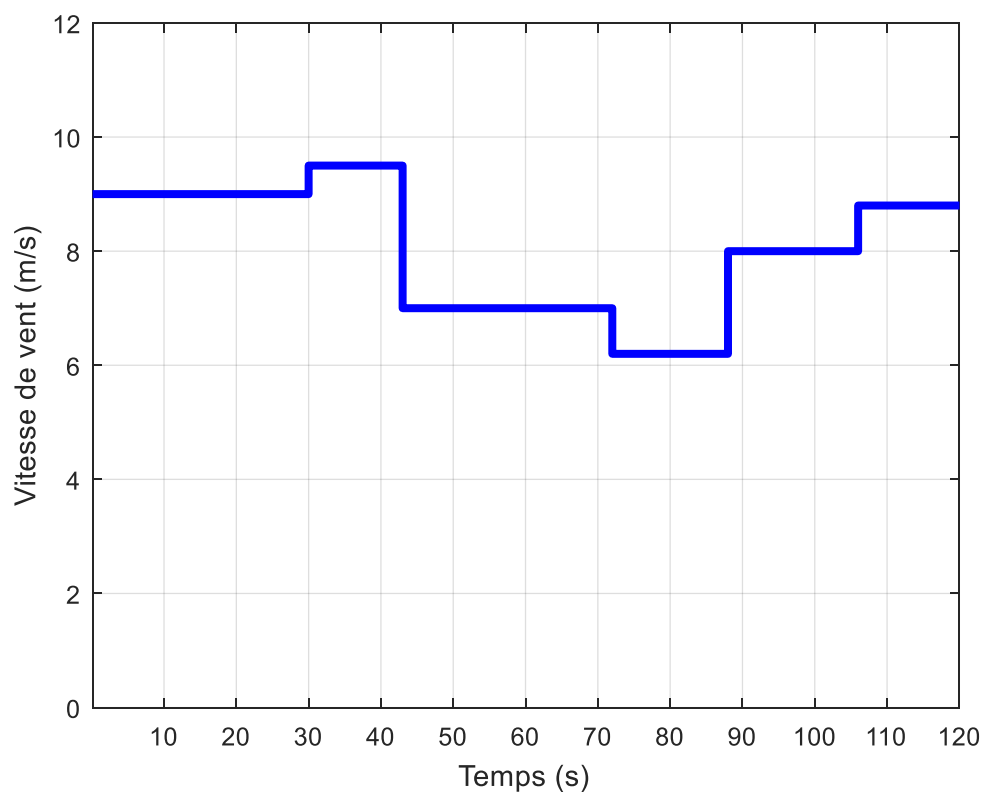
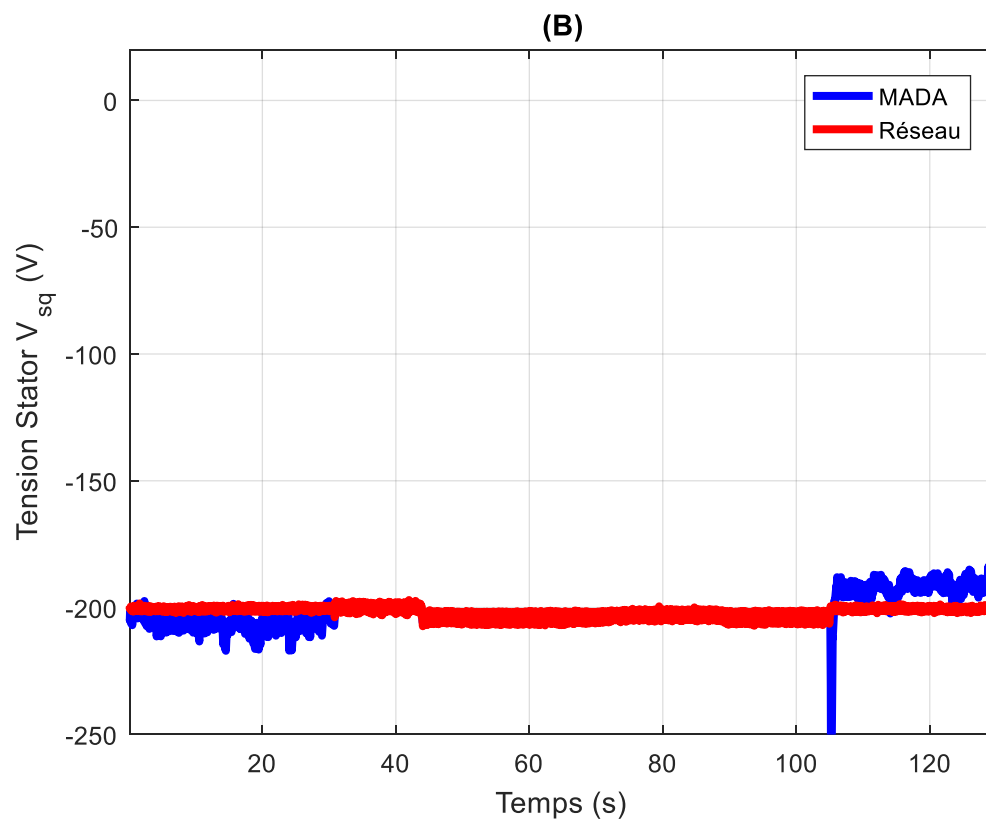
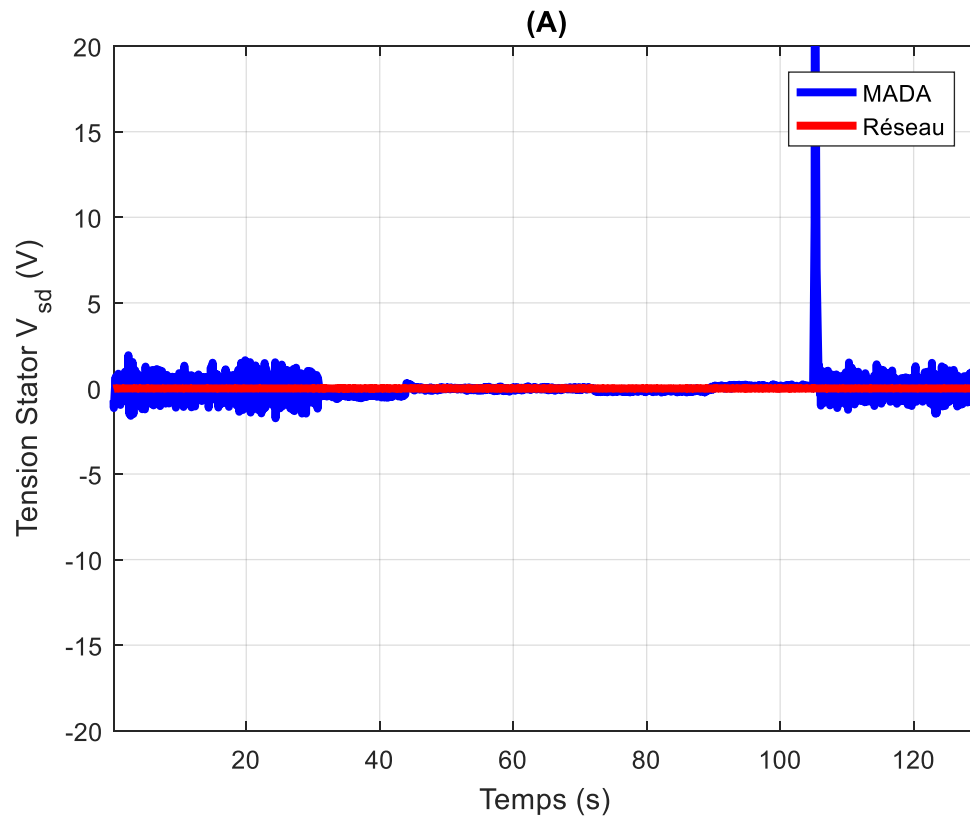
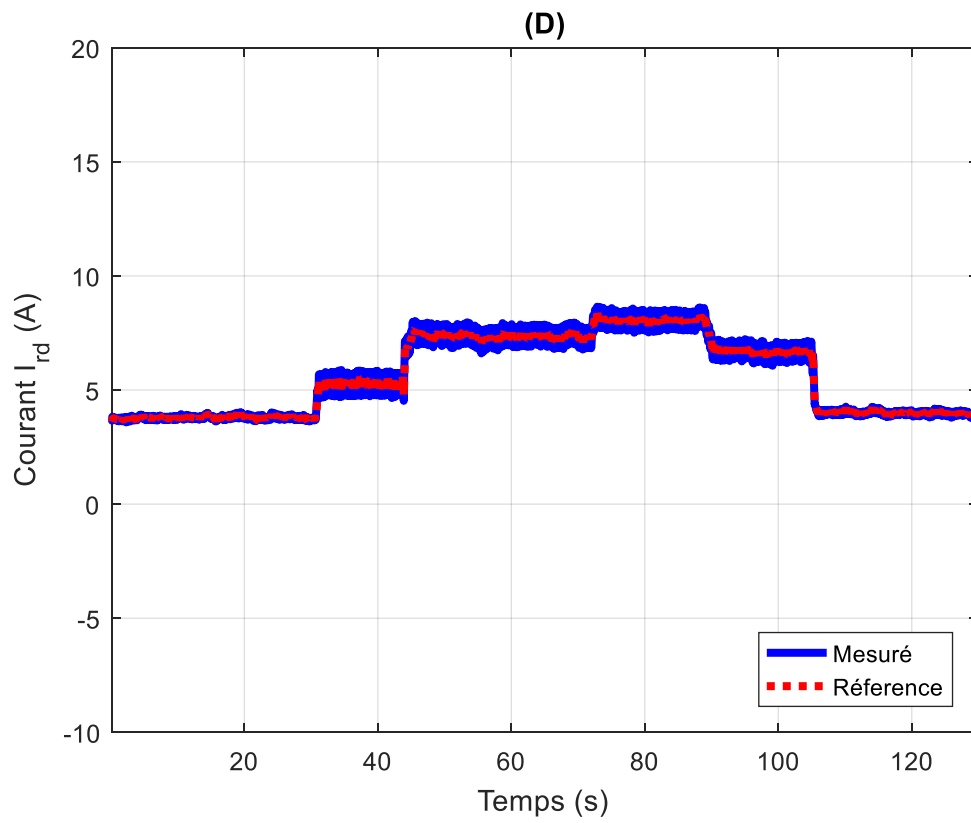
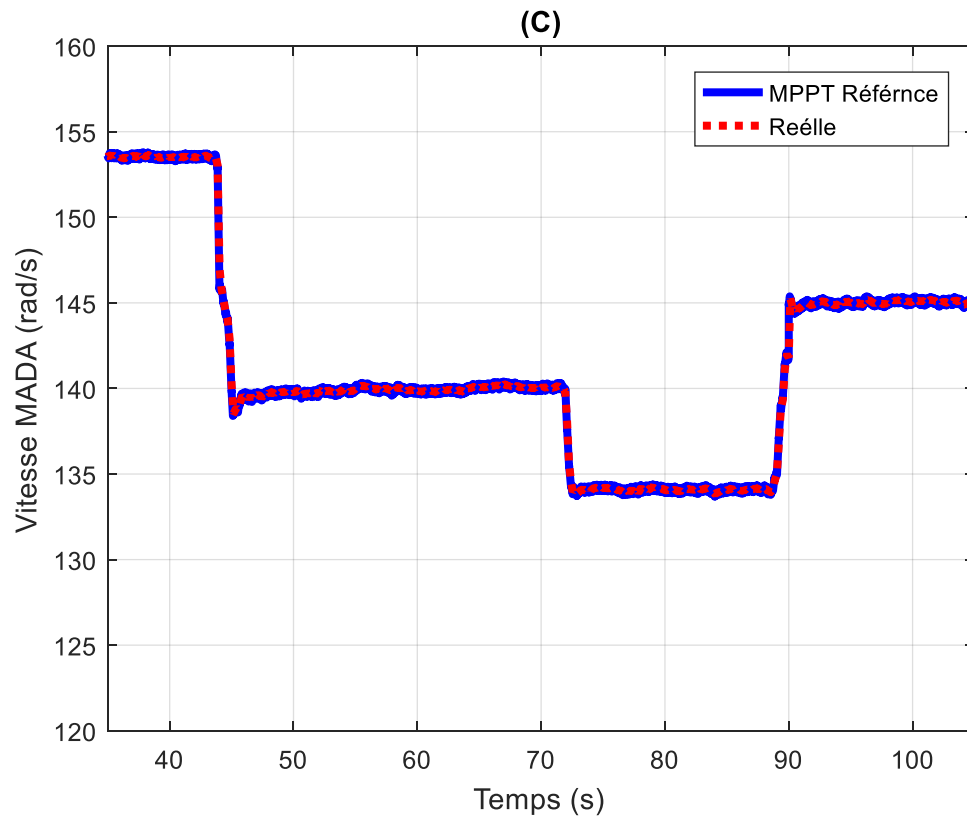
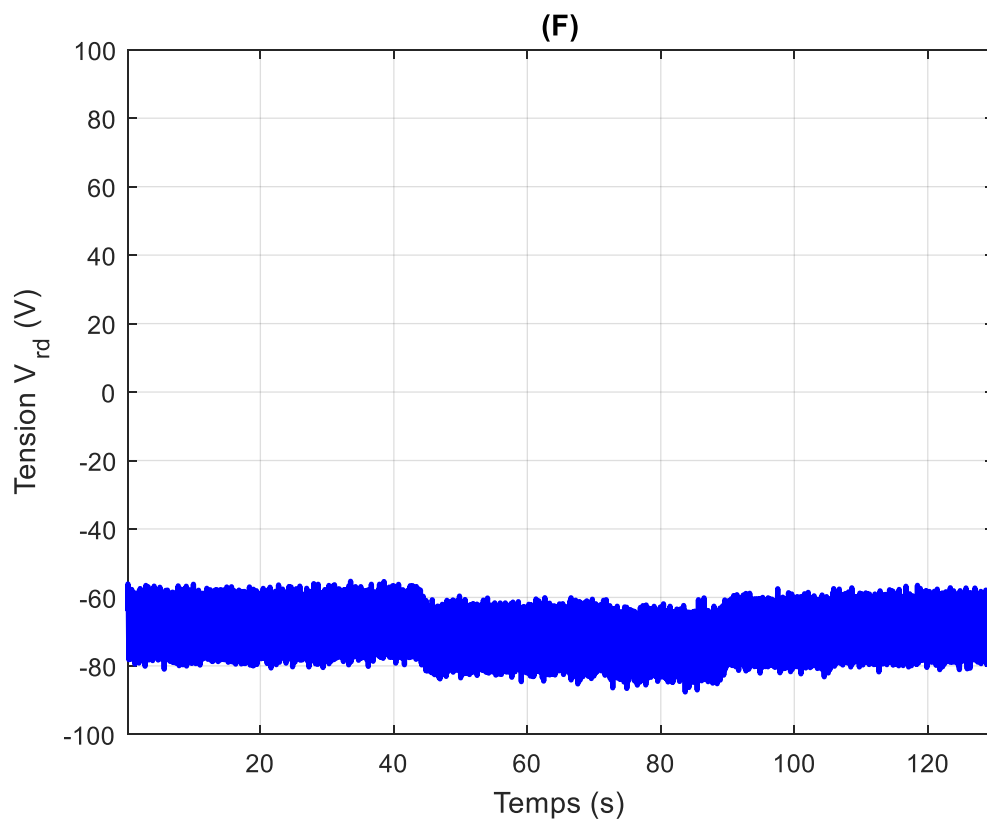
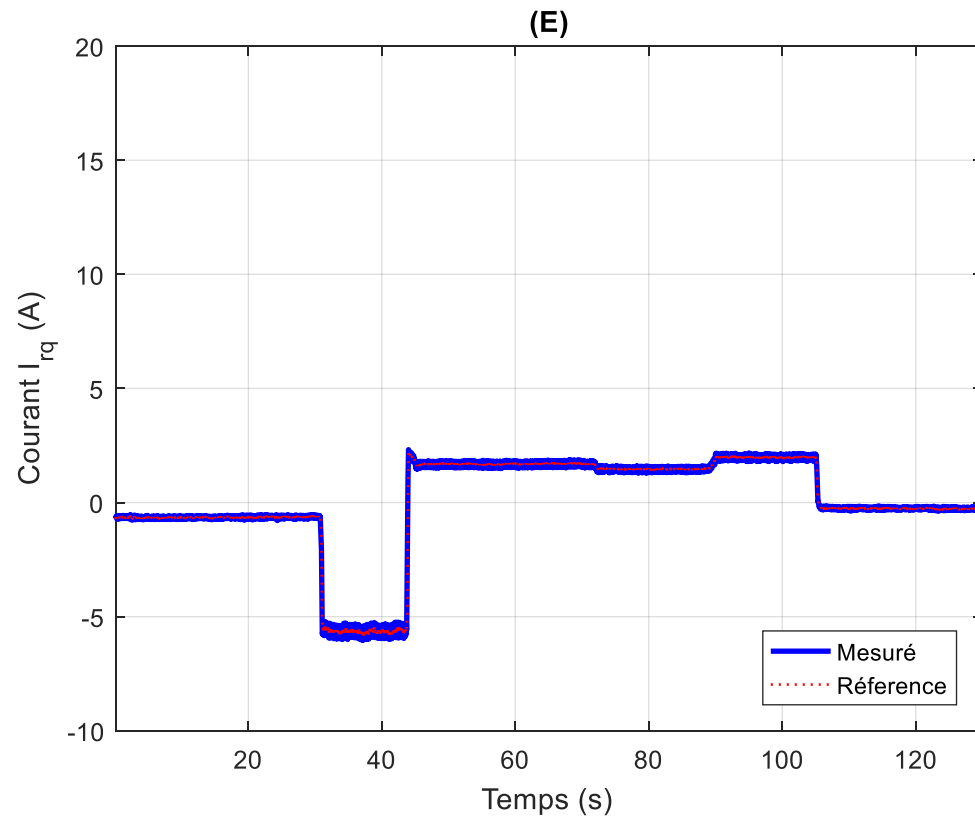


Figure VI.12 : Profil de vent expérimental







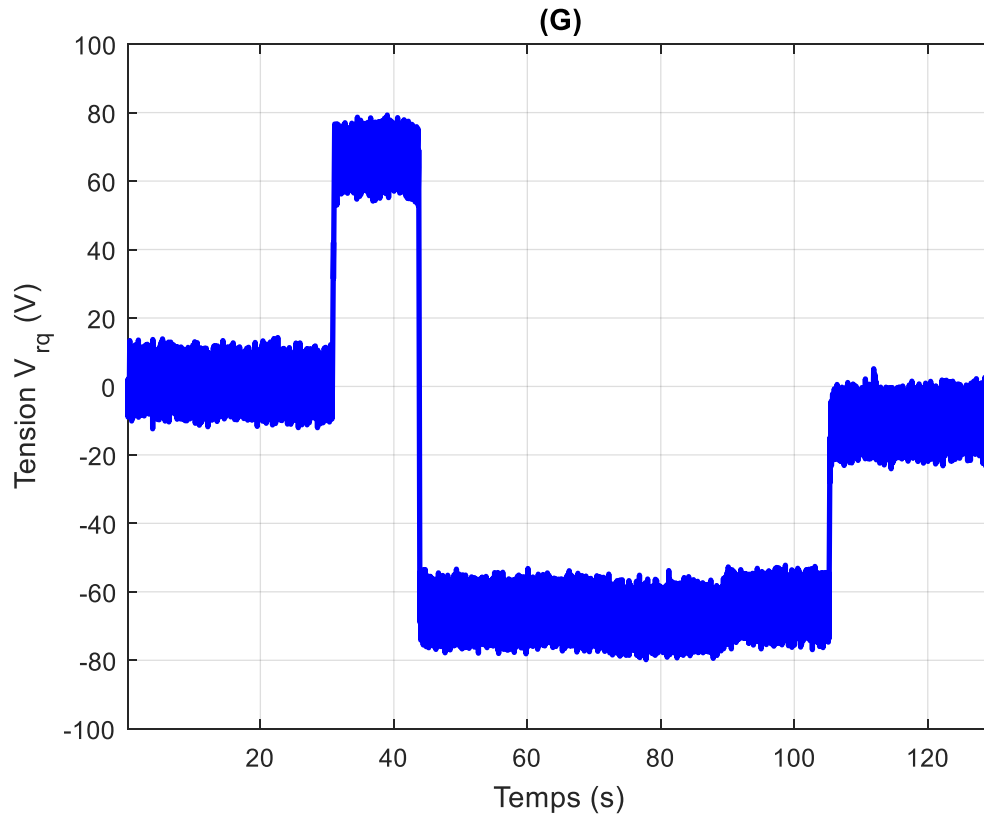


Figure VI.13 : Résultats expérimentaux

Les tensions statoriques de sortie obtenues avec la commande Backstepping neuronale sont présentées dans les figures VI.13.a et VI.13.b. Ces figures montrent clairement que les tensions du stator suivent correctement les tensions de référence grâce à la loi de commande appliquée.

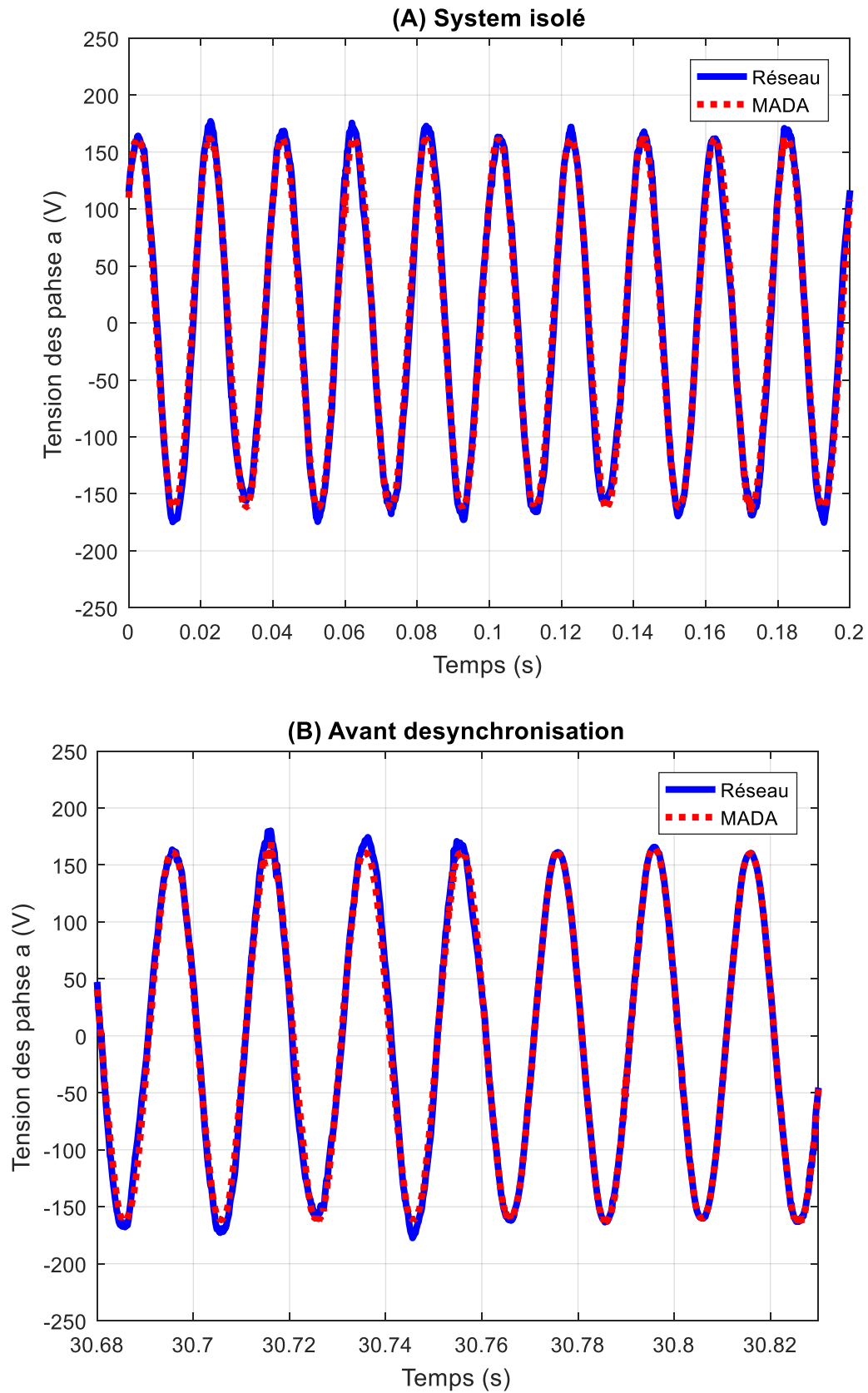
On observe également que les tensions de référence contiennent un léger bruit, ce qui est normal lorsque l'on utilise une technique PLL pour déterminer la fréquence réelle du réseau, qui peut être bruitée.

La figure VI.13.c illustre la vitesse de rotation de la machine par rapport à sa référence. On constate que la référence présente un léger bruit et n'est pas parfaitement droite comme le profil du vent, ce qui est attendu puisque la référence est générée par l'émulateur de turbine.

Les figures VI.13.d et VI.13.e montrent les courants rotoriques, qui suivent fidèlement leurs références dans le mode de synchronisation comme dans le mode de commande de puissance.

Enfin, les figures VI.13.f et VI.13.g présentent les tensions rotoriques de commande, qui restent bornées et ne dépassent pas leurs valeurs nominales.

La figure VI.14 représente la tension de la phase A de la MADA superposée à la phase A du réseau, pour différents scénarios, mettant en évidence la bonne synchronisation et le respect des références dans toutes les conditions testées.



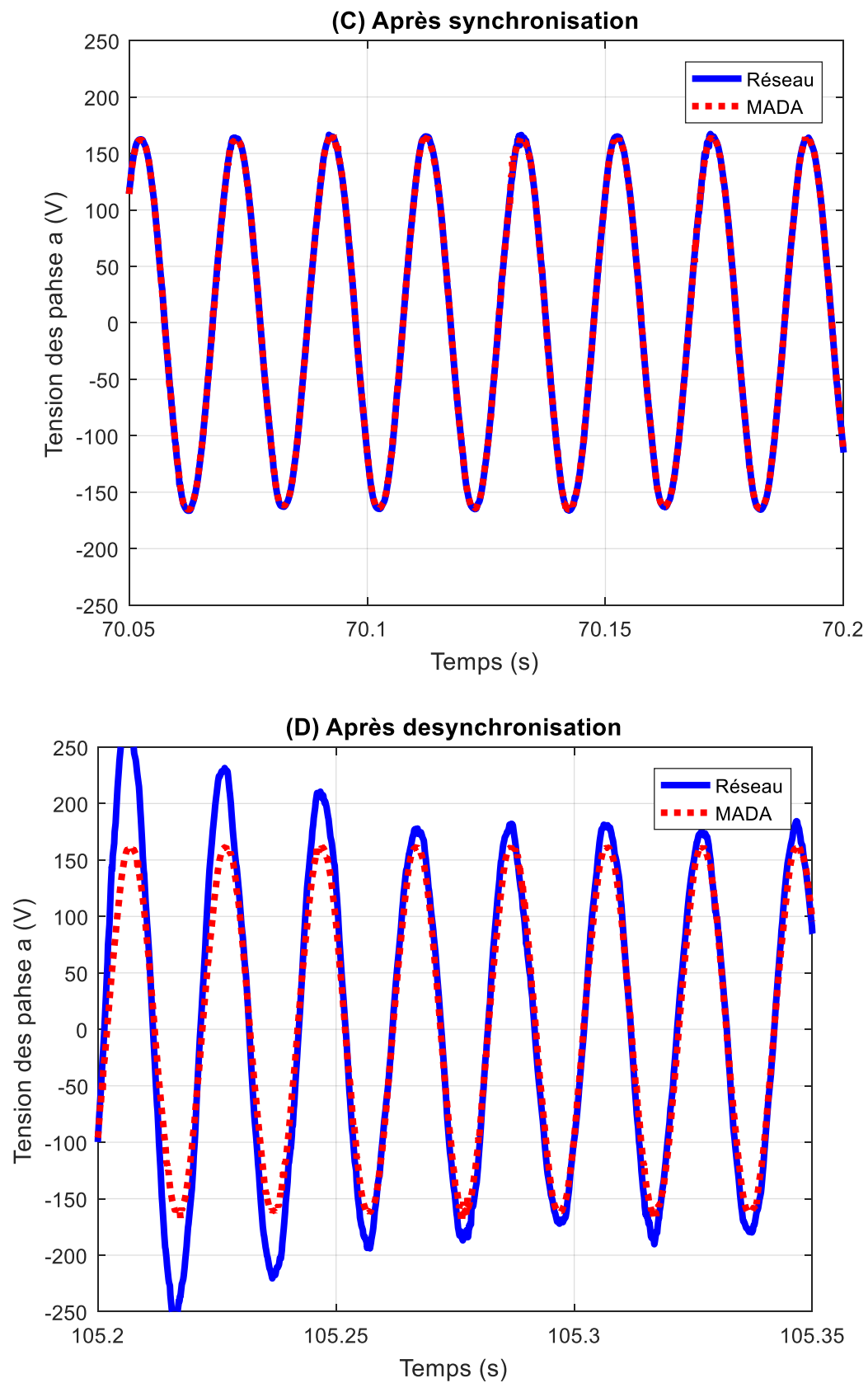


Figure VI.14 : Résultats expérimentaux tension MADA-Réseau

La figure V.14.a représente les tensions avant la synchronisation. Dans ce scénario, l'attention se porte uniquement sur la régulation des tensions vers une référence constante de 110 V. Les tensions de sortie du stator suivent parfaitement leurs références.

La figure V.14.b montre les tensions pendant la synchronisation. Ici, on bascule progressivement de la commande des tensions vers la commande de vitesse et de puissance de la machine.

La figure V.14.c illustre les tensions après la synchronisation. Dans ce scénario, les tensions de la machine sont imposées par le réseau, et l'attention se concentre sur le réglage de la vitesse et du flux afin d'extraire le maximum de puissance et de délivrer l'électricité avec un facteur de puissance unitaire.

Enfin, la figure V.14.d montre les tensions après la désynchronisation. Dans ce scénario, on revient à la régulation des tensions et de la fréquence de la machine. Les tensions de sortie du stator suivent rapidement leurs références : elles sont identiques à celles du réseau lorsque l'interrupteur de synchronisation est fermé, et retrouvent leurs valeurs initiales lorsque la machine est déconnectée du réseau.

5. Conclusion

Ce chapitre a présenté la validation expérimentale de la commande Backstepping neuronale appliquée à un aérogénérateur à base de MADA. Un banc d'essai a été mis en place au laboratoire des technologies innovantes (LTI) de l'IUT de l'Aisne, comprenant une machine à courant continu entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation.

Les résultats expérimentaux montrent que la commande neuronale assure une bonne régulation des tensions statoriques et rotoriques, une suivi précis de la vitesse de rotation, ainsi qu'une extraction maximale de puissance avec un facteur de puissance proche de l'unité. Les différents scénarios, avant, pendant et après la synchronisation, ont confirmé la robustesse et la fiabilité de la loi de commande face aux variations de vitesse et aux perturbations.

Ces essais expérimentaux confirment la performance et l'efficacité de la commande Backstepping neuronale développée, et constituent une étape clé vers l'implémentation en temps réel de ce type de commande sur des systèmes éoliens réels.

Conclusion

Générale

Conclusion générale et perspective

Le travail présenté dans cette thèse porte sur la modélisation et la commande d'un aérogénérateur basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), dont le stator est directement connecté à un réseau électrique supposé stable. L'utilisation de la GADA dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne représente une solution attractive, en raison des nombreux avantages techniques et économiques qu'elle offre. Ces avantages incluent notamment :

- Une production de puissance élevée,
- La capacité de fournir de l'énergie électrique à fréquence constante malgré une vitesse de rotation variable,
- L'accessibilité à la mesure de toutes les grandeurs électriques du stator et du rotor, offrant une grande flexibilité et précision pour le contrôle des courants, flux et puissances.

Pour atteindre les objectifs de commande, le modèle complet de la chaîne de conversion, comprenant la turbine, le multiplicateur de vitesse et la GADA, a été élaboré. Ce modèle a servi de base pour le développement de stratégies de commande visant :

- À maximiser la puissance active délivrée au réseau,
- À assurer un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire au stator, c'est-à-dire maintenir la puissance réactive statorique nulle.

Trois approches de commande ont été étudiées :

1. Commande linéaire vectorielle à base de régulateurs PI classiques :

Les simulations ont montré que cette méthode offre des performances satisfaisantes en régime nominal, c'est-à-dire en absence de perturbations. Cependant, cette approche demeure limitée pour le système étudié, qui est non linéaire, multi-variable et fortement dynamique, et ne permet pas d'assurer une robustesse face aux perturbations.

2. Commande non linéaire par Backstepping :

Le Backstepping permet de décomposer la tâche de commande en plusieurs étapes, facilitant la conception et l'analyse du système. Chaque étape peut être conçue indépendamment, ce qui

améliore la modularité et la réutilisation des concepts. Cette approche permet une meilleure suivi de la vitesse de rotation et du flux et un découplage efficace entre la puissance active et réactive. Cependant, la présence d'incertitudes et de perturbations dégrade sensiblement les performances du système, en particulier lorsque le modèle exact de la GADA n'est pas connu avec précision.

3. Commande Backstepping neuronale :

Pour pallier les limitations de la commande Backstepping classique, une version combinant le Backstepping avec un réseau de neurones a été développée. Cette approche améliore la robustesse et la capacité d'adaptation face aux perturbations et aux variations paramétriques. La stabilité en boucle fermée a été théoriquement démontrée à l'aide de la méthode de Lyapunov. Les résultats de simulation ont montré que cette méthode permet de :

- Suivre avec précision la vitesse de rotation optimale de la GADA,
- Maximiser la puissance active délivrée au réseau,
- Maintenir la puissance réactive statorique proche de zéro, garantissant un facteur de puissance unitaire,
- Fournir des signaux de commande bornés et lisses, même en présence de perturbations, tout en limitant les efforts excessifs sur les actionneurs.

Une comparaison détaillée entre les trois méthodes de commande a montré la supériorité de la commande Backstepping neuronale, tant en termes de réalisation des objectifs de puissance et de facteur de puissance, que de robustesse face aux variations de charge et aux perturbations du vent.

Le second objectif de cette thèse était la validation expérimentale de la commande Backstepping neuronale. Pour cela, un banc d'essai a été mis en place au laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de l'Aisne à Cuffies-Soissons, comprenant une machine à courant continu utilisée pour émuler le vent, une GADA connectée au réseau et une carte d'acquisition dSPACE 1104 intégrée dans MATLAB/Simulink pour le contrôle et la mesure en temps réel. La MADA a été identifiée à partir des données constructeur grâce à l'algorithme PSO, permettant d'estimer les résistances et inductances statoriques et rotorique nécessaires à la commande non linéaire. La synchronisation avec le réseau a été étudiée à l'aide d'un algorithme basé sur le PLL, garantissant la constance de l'amplitude et de la fréquence des tensions statoriques même en

présence de variations de vitesse ou de demande de puissance. Les résultats expérimentaux ont confirmé que la commande Backstepping neuronale permet un suivi précis de la vitesse de rotation et du flux, maintient les tensions statoriques et rotorique dans leurs limites nominales, assure la maximisation de la puissance active et la neutralité de la puissance réactive, et fonctionne efficacement dans tous les scénarios expérimentaux, que la GADA soit isolée ou connectée au réseau.

Les perspectives futures de ce travail incluent :

- Le développement d'une loi de commande non linéaire intégrant un observateur de vitesse, afin d'améliorer encore la robustesse et la précision de l'aérogénérateur,
- L'implémentation de techniques de contrôle adaptatif ou prédictif, permettant de gérer des variations de vent plus rapides et imprévisibles,
- La mise en œuvre en temps réel sur des aérogénérateurs de plus grande puissance, pour confirmer les performances obtenues sur le banc d'essai,
- L'étude de stratégies hybrides combinant Backstepping neuronale et mode glissant, pour tirer parti de la robustesse intrinsèque du mode glissant tout en conservant la douceur et la précision du Backstepping.

En conclusion, ce travail démontre que la commande Backstepping neuronale constitue une solution robuste et efficace pour la régulation des aérogénérateurs à GADA, offrant une performance optimale en simulation comme en expérimentation, et ouvre la voie à des développements futurs pour les systèmes éoliens connectés au réseau et autonomes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England.
- [2] A. Boyette, « Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation Avec Système de Stockage pour la Production Éolienne », Thèse de doctorat en Génie Électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2006.
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC), « Rapport annuel du Conseil mondial de l'énergie éolienne », 2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.gwec.net>.
- [4] N. Kasbadji Merzouk, « Évaluation du gisement énergétique éolien : Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat en Physique Énergétique et Matériaux, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [5] F. Poitiers, « Étude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [6] P. W. Carlin, A. S. Laxson, et E. B. Muljadi, « The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology », *NREL/TP-500-28607*, 2001.
- [7] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, 2000.
- [8] P. Gibe, *Le Grand Livre de l'Éolienne*, Le Moniteur Observ'ER, Paris, France, 2004.
- [9] Site Internet : www.energiethec.com.
- [10] M. O. L. Hansen, N. N. Sørensen, et R. G. J. Flay, « Effect of placing a diffuser around a wind turbine », *Wind Energy*, vol. 3, pp. 207–213, 2000.
- [11] Site Internet : www.francetvinfo.fr.
- [12] D. G. Phillips, P. J. Richards, G. D. Mallinson, et R. G. J. Flay, « Computational modelling of diffuser designs for a diffuser augmented wind turbine », *Phoenix Journal of Computational Fluid Dynamics and its Applications*, vol. 12, pp. 158–172, 1999.
- [13] T. Douadi, « Étude et commande d'un système éolien à base d'un générateur asynchrone », Mémoire de magister en Électrotechnique, Université de Batna, 2010.
- [14] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [15] G.-C. Rota, *Modern Geometry – Methods and Applications*, Springer, 1991.
- [16] A. N. Gorban', A. M. Gorlov, et V. M. Silantyev, « Limits of the turbine efficiency for free fluid flow », *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 123, no. 4, pp. 311–317, 2001.
- [17] B. L. Gilbert, R. A. Oman, et K. M. Foreman, « Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines », *Journal of Energy*, vol. 2, no. 6, pp. 368–374, 1978.

- [18] M. O. L. Hansen, N. N. Sørensen, et R. G. J. Flay, « Effect of placing a diffuser around a wind turbine », *Wind Energy*, vol. 3, pp. 207–213, 2000.
- [19] O. de Vries, *Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion*, AGARDograph No. 243, Advisory Group for Aeronautical Research and Development, 1979.
- [20] S.-Y. Hu et J.-H. Cheng, « Innovatory designs for ducted wind turbines », *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1491–1498, 2008.
- [21] O. Igra, « Research and development for shrouded wind turbines », *European Wind Energy Conference (EWEC'84)*, Hambourg, pp. 236–245, 1984.
- [22] O. Igra, « Shrouds for aerogenerators », *AIAA Journal*, vol. 14, no. 10, pp. 1481–1483, 1976.
- [23] Y. Ohya, A. Karasudani, et A. Sakurai, « Development of high-performance wind turbine with a brimmed-diffuser », *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 50, no. 587, pp. 477–482, 2002.
- [24] Y. Ohya, T. Karasudani, A. Sakurai, K. Abe, et M. Inoue, « Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 5, pp. 524–539, 2008.
- [25] Y. Ohya, « A highly efficient wind and water turbines with wind-lens technology & offshore floating renewable energy farm », Summary Report, Kyushu University, Japan, 2014.
- [26] R. A. Oman, K. M. Foreman, et B. L. Gilbert, « Investigation of diffuser augmented wind turbines », ERDA Report COO-2616-2, Parts I and II, 1977.
- [27] D. G. Phillips, « An investigation on diffuser augmented wind turbine design », Thèse de doctorat, University of Auckland, Nouvelle-Zélande, 2003.
- [28] G. K. Politis et A. D. Koras, « A performance prediction method for ducted medium loaded horizontal axis wind turbines », *Wind Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 273–288, 1995.
- [29] G. J. W. van Bussel, « The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited », *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 75, 012010, 2007.
- [30] P. Jamieson, « Beating Betz: Energy extraction limits in a constrained flow field », *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 131, no. 3, 2009.
- [31] M. J. Werle et W. M. Presz Jr., « Ducted wind/water turbines and propellers revisited », *Journal of Propulsion and Power*, vol. 24, no. 5, pp. 1146–1150, 2008.
- [32] D. G. Phillips et al., *Windpower Monthly*, 2001.
- [33] Article en ligne : <https://www.bostonglobe.com/business/2017/05/05/deer-island-odd-looking-turbine-testament-failure/GJAe7yEYz1or8QGO07M95O/story.html>.
- [34] D. Jedamski et K. Visser, « Computational analysis of a diffuser using USM3D for

diffuser augmented wind turbines », *Proc. 31st AIAA Applied Aerodynamics Conf.*, San Diego, CA, 2013.

[35] R. Venters, B. Helenbrook, et K. D. Visser, « Ducted wind turbine optimization », *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2017, DOI:10.1115/1.4037741.

[36] R. Venters, « A computational investigation of wind acceleration in relation to turbine performance and design », Mémoire de master, Clarkson University, Potsdam, NY, 2014.

[37] K. Ferkous, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink », 1er Séminaire Méditerranéen sur l'Énergie Éolienne (SMEE'2010), Alger, 2010.

[38] Y. A. Bencherif, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », Mémoire de PFE en Électrotechnique, ENP Alger, 2008.

[39] C. A. Evangelista, F. Valenciaga, et P. Puleston, « Multivariable 2-sliding mode control for a wind energy system based on a double fed induction generator », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 13, pp. 10070–10075, 2012.

[40] G. O. Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, 2005.

[41] S. Drid, « Contribution à la modélisation et la commande robuste d'une machine à induction double alimentation à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2005.

[42] T. Belkacem, « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation : Application à un système éolien à vitesse variable », Mémoire de magister, Université de Batna, 2010.

[43] P. E. Vidal, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

[44] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, 2007.

[45] N. Akkari, « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.

[46] I. Hamzaoui, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister, ENP Alger, 2008.

[47] A. Habbadi, *Commande numérique d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension MLI : Nouvelle structure d'autopilotage*, Livre, 1988.

[48] M. Boutoubat, L. Mokrani, et M. Machmoum, « Control of a wind energy conversion system for active power generation and harmonic filtering », *Proc. ICIPEE'12*, pp. 14–16,

2012.

[49] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones à double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2010.

[50] N. Bouchiba, « Intégration du générateur à double alimentation dans un réseau isolé à énergie éolienne », Thèse de doctorat en Génie Électrique, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2018.

[51] M. Fadel, B. Robyns, et F. A. M. Tahir, « Commande vectorielle à orientation du flux statorique appliquée à la génératrice asynchrone à double alimentation », *Revue Internationale de Génie Électrique*, vol. 4, no. 3, pp. 329–352, 2001.

[52] M. Machmoum, M. E. H. Benbouzid, et N. Idris, « Vector control of a doubly fed induction generator for stand-alone wind energy conversion system », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 764–771, 2004.

[53] M. Machmoum, L. Mokrani, et M. Bouzid, « Contrôle et modélisation d'un générateur asynchrone à double alimentation pour système éolien », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, no. 3, pp. 335–342, 2007.

[54] S. Bacha, D. Roze, et A. J. Duquenne, « Étude comparative de stratégies de commande vectorielle pour un générateur asynchrone double alimentation », *Revue Internationale de Génie Électrique*, vol. 8, no. 4, pp. 365–384, 2005.

[55] M. Machmoum et L. Mokrani, « Modélisation et commande non linéaire de la génératrice asynchrone à double alimentation », *Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical Engineering ICEE'06*, pp. 1–6, 2006.

[56] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press, 1998.

[57] M. Boutoubat, « Étude et commande d'un système éolien à base de génératrice asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2007.

[58] D. Rekioua et E. Matagne, *Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control*, Springer, 2012.

[59] S. Semmah, « Commande par mode glissant d'un système éolien à base d'un générateur asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, Université de Batna, 2011.

[60] H. Labdai, « Commande robuste d'un système éolien à base de génératrice asynchrone double alimentation (GADA) connectée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2014.

[61] M. Khater, « Application de la commande non linéaire à un système éolien basé sur une machine asynchrone double alimentation », Mémoire de magister, Université de Batna, 2013.

- [62] N. Chrifi-Alaoui, « Commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation en mode génératrice pour une application éolienne », Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbès, 2015.
- [63] B. Mezouar, « Contribution à la commande robuste par mode glissant d'un système éolien à base d'un générateur asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- [64] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Application d'une commande non linéaire floue à un système éolien basé sur un générateur asynchrone à double alimentation », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 21, no. 2, pp. 329–340, 2018.
- [65] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Backstepping control applied to a DFIG-based wind energy conversion system », *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 8, no. 3, pp. 1472–1483, 2018.
- [66] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Commande backstepping adaptative appliquée à un système éolien à base d'une génératrice asynchrone double alimentation », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 22, no. 2, pp. 317–326, 2019.
- [67] M. Machmoum, S. Labdai, et L. Chrifi-Alaoui, « Commande adaptative à structure variable pour une génératrice asynchrone double alimentation », *Proc. IEEE ICGE'19*, Alger, 2019.
- [68] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Comparative study between backstepping and nonlinear ADRC control applied to a DFIG-based WECS », *Wind Engineering*, vol. 45, no. 6, pp. 1469–1487, 2021.
- [69] L. Chrifi-Alaoui, S. Labdai, et M. Machmoum, « Nonlinear ADRC for power regulation of a DFIG-based wind energy conversion system », *IEEE Access*, vol. 9, pp. 115382–115394, 2021.
- [70] L. Chrifi-Alaoui, S. Labdai, et M. Machmoum, « Comparison between nonlinear ADRC and backstepping control for a standalone DFIG-based wind energy system », *Wind Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 1371–1388, 2022.
- [71] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Adaptive nonlinear ADRC applied to standalone DFIG-based wind energy system », *MDPI Energies*, vol. 15, no. 12, 2022.
- [72] M. Machmoum, *Éoliennes : Modélisation, Commande et Conversion d'Énergie*, ISTE Éditions, 2020.
- [73] R. Ortega, A. Astolfi, et B. Jayawardhana, « On the preservation of passivity after feedback », *Systems & Control Letters*, vol. 52, no. 5, pp. 419–426, 2004.
- [74] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, 3rd ed., Springer-Verlag, London, 1995.
- [75] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed., Prentice Hall, 2002.

- [76] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Commande adaptative floue d'un système éolien à DFIG », *Conférence Internationale sur les Énergies Renouvelables (CIER'18)*, Alger, 2018.
- [77] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Étude comparative entre commandes backstepping et ADRC appliquées à un système éolien », *Conférence Nationale sur l'Énergie et l'Environnement (CNEE'19)*, Batna, 2019.
- [78] Y. Zhang et J. Yang, *Active Disturbance Rejection Control: Fundamentals, Practice and Research*, Springer, 2012.
- [79] Z. Gao, « Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning », *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, CO, 2003.
- [80] Z. Gao, « On the centrality of disturbance rejection in automatic control », *ISA Transactions*, vol. 53, no. 4, pp. 850–857, 2014.
- [81] J. Han, « From PID to active disturbance rejection control », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009.
- [82] M. Z. Q. Chen, Y. Wang, et W. Q. Zhang, « Design and tuning of ADRC for a class of nonlinear systems », *Control Theory and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 345–354, 2014.
- [83] K. Tan, Q. Cao, et T. Lee, « ADRC-based control of permanent magnet synchronous motor drives », *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2406–2416, 2019.
- [84] J. Huang, X. Zhang, et H. Li, « Nonlinear ADRC for uncertain systems with actuator saturation », *International Journal of Control*, vol. 93, no. 5, pp. 1161–1173, 2020.
- [85] J. Yang, W. Xue, et Z. Gao, « Disturbance observer-based control and active disturbance rejection control: a comparative study », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3023–3032, 2017.
- [86] M. Machmoum et S. Labdai, « Nonlinear ADRC applied to a DFIG-based wind energy conversion system in standalone mode », *Wind Engineering*, sous presse, 2024.
- [87] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Adaptive nonlinear control for renewable energy systems: Application to standalone wind generation », *Renewable Energy Systems Conference (RESC'23)*, Paris, 2023.
- [88] S. Labdai, L. Chrifi-Alaoui, et M. Machmoum, « Real-time implementation of nonlinear ADRC for a standalone DFIG system », *IEEE ICGE'23*, Alger, 2023.
- [89] S. Labdai et L. Chrifi-Alaoui, « Application de l'ADRC non linéaire pour un système éolien à DFIG autonome », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 27, no. 2, pp. 215–226, 2024.

- [90] J. Han, « Active disturbance rejection control technique – the technique for estimating and compensating disturbances », *Control and Decision*, vol. 13, no. 1, pp. 19–23, 1998.
- [91] Z. Gao, « Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design », *Proceedings of the American Control Conference*, Minneapolis, MN, 2006.
- [92] H. Sira-Ramirez et S. Agrawal, *Differentially Flat Systems*, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [93] J.-J. E. Slotine et W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [94] R. Marino et P. Tomei, *Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust*, Prentice-Hall, 1996.
- [95] J. Han, « Nonlinear control theory and active disturbance rejection control », *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, 2006.
- [96] J. Yang, W. Xue, et Z. Gao, « Nonlinear extended state observer for a class of MIMO nonlinear systems », *Automatica*, vol. 49, no. 8, pp. 2481–2487, 2013.
- [97] Z. Gao, « Active disturbance rejection control: A unified framework for modeling, analysis and design of complex systems », *ISA Transactions*, vol. 53, no. 4, pp. 850–857, 2014.

Annexes

Annexe 1 : Modèle en grandeurs (d,q,0) de la MADA

1. Equations en triphasées de la MADA

Les tensions triphasées $[V_s]_{abc}$ aux bornes des enroulements du stator de la MADA vérifient :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt}[\Psi_s]_{abc} \quad (1)$$

De même les tensions triphasées $[V_r]_{abc}$ aux bornes des enroulements du rotor de la MADA vérifient :

$$[V_r]_{abc} = [R_r][i_r]_{abc} + \frac{d}{dt}[\Psi_r]_{abc} \quad (2)$$

Les flux totaux triphasés $[\Psi_s]_{abc}$ dans les enroulements du stator sont tels que :

$$[\Psi_s]_{abc} = [L_s][i_s]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (3)$$

Les flux totaux triphasés $[\Psi_r]_{abc}$ dans les enroulements du rotor sont tels que :

$$[\Psi_r]_{abc} = [L_r][i_r]_{abc} + [M_{sr}]^t[i_s]_{abc} \quad (4)$$

Avec

$$[V_s]_{abc} = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [i_s]_{abc} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [\Psi_s]_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \\ \Psi_{cs} \end{bmatrix}; [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

Avec

$$[R_s] = \text{diag} [R_s \ R_s \ R_s];$$

$$[V_r]_{abc} = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [i_r]_{abc} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Psi_r]_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \\ \Psi_{cr} \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$[R_r] = \text{diag}[R_r \ R_r \ R_r];$$

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Où

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique, résistance d'une phase rotorique.

l_s, l_r : Inductance propre d'une phase statorique, et celle d'une phase rotorique.

m_s, m_r : Inductance mutuelle entre phase statorique et celle entre phase rotorique.

m_{sr} : Amplitude de l'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique.

θ : Angle entre les axes magnétiques du stator et du rotor.

L'équation dynamique relative à la rotation du moteur est donnée par

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_{fr} - C_r \quad (8)$$

Où C_{em} , C_{fr} et C_r sont respectivement le couple électromagnétique produit par la MADA, le couple de frottement et le couple de charge (ou résistant).

Il est clair que l'écriture des équations (1) et (2) en fonction des courants forment six équations différentielles à coefficients dépendants du temps de plus les grandeurs sont sinusoïdales. Il est plus facile de traiter des équations différentielles à coefficients constants caractérisées par des grandeurs continues. Pour modifier les équations (1)-(4), nous allons appliquer la transformation de Park $P(\theta)$ pour obtenir un système d'équations à coefficients constants à grandeurs continues.

2. Transformation de Park

La transformation de Park-Clark $P(\theta)$ peut être appliquée aux grandeurs électriques triphasées $[X_a \ X_b \ X_c]^T$ (X peut être une tension, un courant, un flux, un champ électrique ou encore une induction magnétique etc.) pour obtenir les grandeurs $[X_d \ X_q \ X_o]^T$ définies dans un repère (d,q,o) tournant à une vitesse arbitraire ω_a par rapport au repère fixe. La grandeur X_o désigne la composante homopolaire. Dans cette situation, la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée est définie par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Son inverse est alors donnée par $P^{-1}(\theta)$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (10)$$

N.B. La conservation de la puissance instantanée permet d'écrire :

$$([v]_{dq0})^T ([i]_{dq0}) = (P(\theta)[v]_{abc})^T (P(\theta)[i]_{abc}) = ([v]_{abc})^T (P(\theta))^T P(\theta)[i]_{abc} = ([v]_{abc})^T [i]_{abc} \quad (11)$$

Et donc pour conserver la puissance, il faut que $(P(\theta))^T P(\theta) = I_3$; autrement dit la matrice $P(\theta)$ doit être orthogonale (i.e $(P(\theta))^T = (P(\theta))^{-1}$)

3. Equations en grandeurs (q, d, 0) de la MADA

La figure 1 donne la disposition respective du repère statorique (a_s, b_s, c_s), du repère rotorique (a_r, b_r, c_r) et du repère (q, d) où les angles entre les axes sont définis tels que :

θ_a : angle entre l'axe a_s de la phase a du stator et l'axe d ;

θ_m : angle entre l'axe a_s de la phase a du stator et l'axe a_r de la phase a du rotor ;

θ_{sl} : angle entre l'axe a_r de la phase a du rotor et l'axe d ;

De plus, ces angles sont liés entre eux par la relation suivante :

$$\theta_a = \theta_m + \theta_{sl}$$

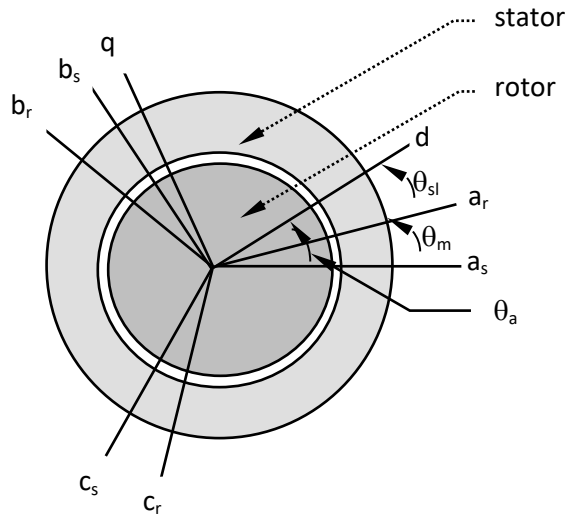


Fig.1 Placement des repères (a_s, b_s, c_s), (a_r, b_r, c_r) et (q, d)

On applique la transformation de Park $P(\theta)$ à l'équation (1) du stator et donc $\theta = \theta_a$; on obtient :

$$P^{-1}(\theta_a)[V_s]_{dq0} = [R_s]P^{-1}(\theta_a)[i_s]_{dq0} + \frac{d}{dt}\{P^{-1}(\theta_a)[\Psi_s]_{dq0}\} \quad (12)$$

$$P^{-1}(\theta_a)[V_s]_{dq0} = [R_s]P^{-1}(\theta_a)[i_s]_{dq0} + \frac{dP^{-1}(\theta_a)}{dt}[\Psi_s]_{dq0} + P^{-1}(\theta_a)\frac{d[\Psi_s]_{dq0}}{dt} \quad (13)$$

On multiplie les deux membres de l'équation (13) par (θ_a) , on obtient :

$$[V_s]_{dq0} = P(\theta_a)[R_s]P^{-1}(\theta_a)[i_s]_{dq0} + P(\theta_a)\frac{dP^{-1}(\theta_a)}{dt}[\Psi_s]_{dq0} + \frac{d[\Psi_s]_{dq0}}{dt} \quad (14)$$

On explicite les termes du membre de droite de l'équation (14) :

$$P(\theta_a)[R_s]P^{-1}(\theta_a) = [R_s] \quad (15)$$

$$\frac{dP^{-1}(\theta_a)}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\theta_a}{dt} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_a) & -\cos(\theta_a) & 0 \\ -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

D'où on a :

$$P(\theta_a) \frac{dP^{-1}(\theta_a)}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_a \begin{bmatrix} -\sin(\theta_a) & -\cos(\theta_a) & 0 \\ -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

Après calcul, il vient :

$$P(\theta_a) \frac{dP^{-1}(\theta_a)}{dt} = \omega_a \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \omega_a = \frac{d\theta_a}{dt} \quad (17)$$

Donc, la transformation de l'équation (1) conduit à :

$$[V_s]_{dq0} = [R_s][i_s]_{dq0} + \frac{d}{dt} [\Psi_s]_{dq0} + \omega_a \begin{bmatrix} -\Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Explicitement on a :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_a \Psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_a \Psi_{ds} \\ v_{0s} = R_s i_{0s} + \frac{d}{dt} \Psi_{0s} \end{cases} \quad (19)$$

En procédant de la même manière, la transformation des équations de tension au rotor (en utilisant $P(\theta_{sl})$) conduit à :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - \omega_{sl} \Psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + \omega_{sl} \Psi_{dr} \\ v_{0r} = R_r i_{0r} + \frac{d}{dt} \Psi_{0r} \end{cases} \quad (20)$$

Avec $\omega_{sl} = \omega_a - \omega_m$; $\omega_a = d\theta_a/dt$ et $\omega_m = d\theta_m/dt$

• Transformation des flux

La relation (3) des flux totaux au stator peut encore s'écrire sous la forme :

$$P^{-1}(\theta_a) [\Psi_s]_{dq0} = [L_s] P^{-1}(\theta_a) [i_s]_{dq0} + [M_{sr}]_{abc} P^{-1}(\theta_{sl}) [i_r]_{dq0} \quad (21)$$

$$[\Psi_s]_{dq0} = P(\theta_a) [L_s] P^{-1}(\theta_a) [i_s]_{dq0} + P(\theta_a) [M_{sr}]_{abc} P^{-1}(\theta_{sl}) [i_r]_{dq0} \quad (22)$$

On explicite les termes du membre de droite de cette équation

$$P^{-1}(\theta_a)[L_s]_{abc}P(\theta_a) = [L_s]_{dq0} \text{ avec } [L_s]_{dq0} = \text{diag}[L_d \quad L_q \quad L_{0s}] \quad (23)$$

Sachant que la matrice $[L_s]_{dq0}$ est issue de la diagonalisation de $[L_s]_{abc}$. La matrice diagonale associée à $[L_s]_{abc}$ est formée par les valeurs propres de $[L_s]_{abc}$ d'où on a :

$$\det([L_s]_{abc} - \lambda I_3) = 0 \Rightarrow \det \begin{pmatrix} l_s - \lambda & m_s & m_s \\ m_s & l_s - \lambda & m_s \\ m_s & m_s & l_s - \lambda \end{pmatrix} = 0$$

Après développement, on obtient

$$\lambda_1 = \lambda_2 = l_s - m_s \text{ et } \lambda_3 = l_s + 2m_s \text{ et } [L_s]_{dq0} = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2m_s \end{bmatrix}$$

On pose $L_s = l_s - m_s$ et $L_{0s} = l_s + 2m_s$ donc, la matrice $[L_s]_{dq0}$ est donnée par :

$$[L_s]_{dq0} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_{0s} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Par conséquent, les flux au stator sont liés aux courants par :

$$[\Psi_s]_{dq0} = [L_s]_{dq0}[i_s]_{dq0} + P(\theta_a)[M_{sr}]_{abc}P^{-1}(\theta_{sl})[i_r]_{dq0} \quad (25)$$

De plus on a :

$$P^{-1}(\theta_a)[M_{sr}]_{abc}P(\theta_{sl}) = \frac{3}{2}m_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et on pose : } \frac{2}{3}m_{sr} = M$$

On a donc :

$$P^{-1}(\theta_a)[M_{sr}]_{abc}P(\theta_{sl}) = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Par conséquent, les flux au stator sont liés aux courants par :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{0s} = L_{0s} i_{0s} \end{cases} \quad (27)$$

En partant de la relation (4) et en procédant de la même manière pour les flux du rotor, on obtient :

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \Psi_{0r} = L_{0r} i_{0r} \end{cases} \quad (28)$$

En général, les phases au stator et au rotor de la MADA sont couplées soit en étoile à neutre isolé soit en triangle. De ce fait, les composantes homopolaires sont nulles et les équations de tension (19) et (20) de la MADA se réduisent à :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_a \Psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_a \Psi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - \omega_{sl} \Psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + \omega_{sl} \Psi_{dr} \end{cases} \quad (29)$$

De même, les flux se réduisent aux seules composantes (d, q) et ils sont liés aux composantes (d, q) des courants au stator et au rotor par :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (30)$$

Si le rotor est en court-circuit (par construction, c'est le cas de la MAS à cage d'écureuil) on a : $v_{dr} = v_{qr} = 0$.

Remarque 1 :

Les grandeurs exprimées dans le repère (d, q) en rotation apparaissent continues. En régime dynamique, ces grandeurs sont variables mais en régime statique elles sont constantes.

Remarque 2 :

Les équations (29) et (30) servent de base pour développer un modèle d'état sous la forme résolue :

$$\dot{X} = F(X, U)$$

Ces équations, nous offrent plusieurs possibilités pour le choix du vecteur d'état X. Le plus souvent ce choix est dicté par les besoins du système où est inséré le moteur. Dans le cas de la commande de la MAS, le plus souvent le vecteur d'état X est choisi tel que :

$$X^T = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Psi_{dr} \quad \Psi_{qr} \quad \omega_m]$$

On rencontre aussi le cas où X est donné par : $X^T = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Psi_{ds} \quad \Psi_{qs} \quad \omega_m]$.

Annexe 2 : Paramètres de Turbine et la MADA

- ✓ Les paramètres de la turbine et la machine utilisé pour la simulation

Paramètres	Valeurs
ω_s	$2\pi 50\text{Hz}$
R_s	$0.455\ \Omega$
R_r	$0.620\ \Omega$
L_s	$0.084\ \text{H}$
L_r	$0.081\ \text{H}$
M	$0.078\ \text{H}$
J	0.3125kg m^2
k_f	0.014Nm.s/rad
p	2
R_b	3
Multiplicateur	8

- ✓ Les paramètres de la turbine et la machine utilisé pour la partie expérimentale sont inclus dans le chapitre VI.

Annexe 3 : Dspace et le Control Desk

1. Definition

ControlDesk est une plateforme logicielle développée par dSPACE pour la visualisation, le contrôle et l'acquisition de données en temps réel dans les applications de développement et de test de systèmes embarqués. ControlDesk permet aux ingénieurs d'interagir avec des systèmes en temps réel, d'afficher des données de capteurs et de contrôler des actuateurs à travers des interfaces utilisateur conviviales.

2. Utilité

Ci-joint une capture d'écran de notre partie expérimentale, le control desk a nous permis de faire le contrôle en temps réel de la MADA, c'est important de visualiser les grandeur de la MADA surtout pour la phase de synchronisation, il permet d'agir rapidement en cas de défaut ou des panne dans la machine

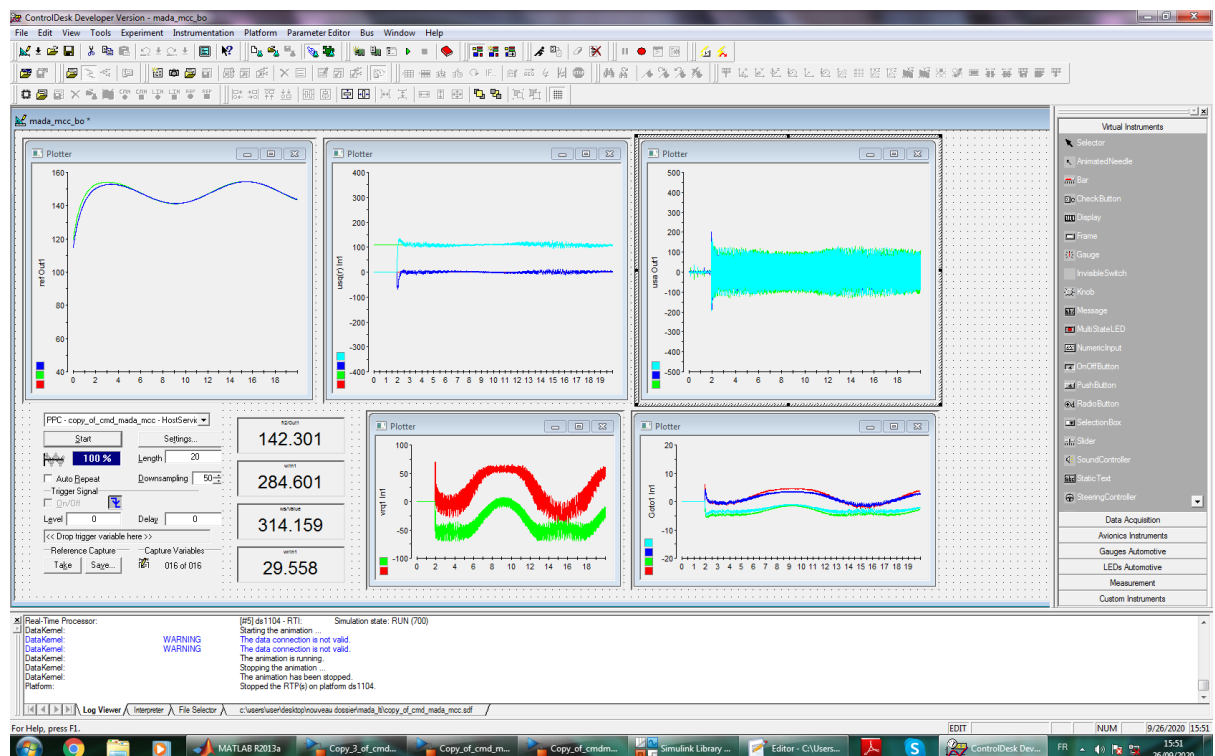


Fig.1 Capture d'écran du logiciel ControlDesk