

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

De Master en Automatique

*COMMANDE ADAPTATIVE INDIRECTE DE LA PUISSANCE
OPTIMALE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE
ÉOLIENNE BASÉE SUR UNE MADA*

Présenté par :

- *ABAD Dalia Kamilia*
- *AISSOU Amina*

Proposé et dirigé par :

- Pr. CHEKIREB Hachemi*
- Pr. TADJINE Mohamed*

Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage, la patience et la volonté nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études et tout au long de ce modeste travail.

Nous remercions nos parents pour leurs soutient tout au long de notre carrière et la confiance qu'ils ont placé en nous.

Nous adressons notre profonde reconnaissance et nos vives gratitudes à notre enseignant et encadreur Monsieur CHEKIRAB Hachemi pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer, pour ses encouragements réguliers, ses qualités scientifiques et humaines qui ont toujours été une source de motivation, ainsi que pour ses conseils et orientations sans lesquels ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à remercier également Monsieur MAHMOUDI M.Oulhadj pour nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de thèse, ainsi que Monsieur STIHI Omar en tant qu'examinateur, et sans oublier Monsieur TADJINE Mohamed comme Co-promoteur.

Nos remerciements les plus sincères sont adressés à nos enseignants, qui ont contribué à notre formation durant nos études à l'Ecole Nationale Polytechnique et spécialement les enseignants du département d'Automatique.

Nous tenons enfin à remercier vivement toutes personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

A celle qui a attendu avec impatience les fruits de sa bonne éducation, ... A ma chère mère.

A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands Hommes, ... A mon père.

Je dédie ce présent travail à mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leur aide et leurs conseils, sans qui je ne serai pas où j'en suis aujourd'hui.

A mes frères et sœurs...

A mes chères grand-mères « Mami » et « Mamaa ».

A la mémoire de mes chers grand-père, mon cher oncle « Omar » et tout être cher perdu... Allah yarhamhoum.

A toute ma famille.

A mon amie et binôme Dalia, pour m'avoir soutenue, accompagnée et surtout supportée tout au long de notre parcours.

A tous mes amis et amies, particulièrement Dalia et Kamyl, un grand merci pour tous les moments qu'on a passé ensemble.

A ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin.

Amína,

Dédicaces

Avant toute chose je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la force d'arriver jusqu'à là.

Je dédie ce présent travail à mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, et m'ont tout donné, que dieu les garde pour moi.

A mes frères Lotfi, Malik et ma sœur Katia...

A toute ma famille ABAD & Birouk, ..

A ma camarade et amie Amina qui m'a accompagné durant toute cette période ainsi qu'à Kamyf...

A tout mes amis & mes proches que j'aime ainsi que mon entourage...

A tout mes camarades et amis de Polytech ...

A Salim qui a toujours été présent...

Je remercie profondément Mr Chekireb de m'avoir permis de mener à bien mon travail et dans les meilleures conditions possibles ainsi que pour sa disponibilité et ses précieux conseils et sans qui ce travail n'aurait pas eu lieu.

Dalia Kamilia

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو التحكم في الطاقة المنقولة إلى الشبكة الكهربائية عبر سلسلة الطاقة الاولية. هذه الأخيرة مبنية على محرك لا متوازن مزدوج التغذية المتصل مباشرة بالشبكة الكهربائية من طرف الساكن، و عبر محولين ذو اتجاهين للطاقة (موج و مقوم) من طرف الدوار. و لهذا بدأنا بتقديم لمحات شاملة لمختلف مكونات السلسلة المحولة، و بعدها قمنا بوضع تحت فرضيات نموذجنا رياضيا مبسطا للمولد. نتيجة لهذا قمنا بوضع قوانين التحكم اللاخطية لتطبيقها على هذا الأخير و معها المركب الذي يسمح لنا بامتصاص الطاقة القصوى لكي نفرضا كقيمة الطاقة النشيطة للساكن، و قمنا نتحاكي السلسلة و تقديم مجموعة النتائج المتحصل عليها مع التعليل. في النهاية قمنا بتقدير الأوسطة المتغيرة للنظام بواسطة الخوارزمية (MCR) و (G) لإعادة إدخالها في قوانين التحكم السابقة و مقارنة النتائج.

الكلمات المفتاحية

محرك لا متوازن مزدوج التغذية، موج، مقوم، قوانين التحكم اللا خطية، الطاقة الهوائية، المحاولات، تعقب نقطة الطاقة القصوى

Résumé :

Le but de ce travail est le contrôle de la puissance transférée au réseau électrique par une chaîne de conversion éolienne. Cette dernière est basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui est reliée directement au réseau par son stator et à travers deux convertisseurs bidirectionnels (redresseur/onduleur à MLI) par son rotor. Pour cela, nous avons commencé par donner un aperçu global sur les différents éléments constituant la chaîne de conversion éolienne, puis, élaborer sous certaines hypothèses, la modélisation de ces derniers. A l'issue de cela, nous avons développé les lois de commandes non linéaires à appliquer sur la chaîne éolienne en se basant sur le modèle complet de la MADA, avec un dispositif permettant l'extraction de la puissance maximale à imposer comme référence de la puissance active statorique (l'algorithme MPPT) et nous avons simulé le système global sous Matlab®, puis nous avons présenté les résultats obtenus avec des interprétations et des conclusions satisfaisantes. A la fin nous avons estimé les paramètres variables du système à l'aide d'algorithme tel que le Gradient et le MCR afin de les réinjecter dans les lois de commande précédentes puis nous avons comparé les résultats.

Mots clés :

MADA, onduleur, redresseur, MLI, commande par bouclage linéarisant, commande par logique floue, commande adaptative, bus continu, éolienne, MCR, Gradient, MPPT.

Abstract:

The aim of this work is the control of the power transferred to the grid by a wind turbine. The latter is based on a double-fed induction generator (DFIG) which is connected directly to the grid by its stator and through two bidirectional converters (rectifier/inverter in PWM) by its rotor. For this, we started by giving a rather overall review on the various constituent elements of the chain, then, developed under certain assumptions, their modeling. At the end of this, we developed nonlinear control laws to apply to wind the string based on the complete model of MADA with a device allowing the extraction of the maximum power to be imposed as reference of the stator active power (algorithm MPPT) and we simulated the whole system in Matlab®, after we presented the results with interpretations and satisfactory conclusions. At the end, we estimate the parameters variable of the system using algorithm such as the Gradient and the MCR, to reinject them in the laws of proceeding controls and then we compared the results.

Keywords:

DFIG, inverter, rectifier, PWM, Lyapunov control, control, adaptative control, continuous bus, wind, MCR, Gradient, MPPT

TABLE DES MATIERES

Table des Matières

Introduction Générale

Commande Adaptative de la chaine éolienne.....	1
1. Introduction.....	1
2. Principe de la commande Adaptative.....	1
2.1 Commande Adaptative Directe.....	1
2.2 Commande Adaptative Indirecte.....	2
3. Etablissement de la commande Adaptative Indirecte.....	3
3.1 Elaboration de la commande.....	3
3.2 Algorithme d'adaptation paramétrique.....	3
3.2.1 Algorithme de la descente du gradient.....	3
3.2.2 Algorithme des moindres carrés récursifs.....	5
3.3 Adaptation des paramètres à la commande.....	5
4. Simulation et interprétations.....	6
4.1 Simulation de la commande Lyapunov Adaptative Indirecte.....	6
4.2 Interprétation des résultats.....	9
Conclusion.....	9

Conclusion Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables.

Le présent travail est la suite d'une étude sur l'utilisation de la MADA intégrée dans un système éolien aussi équipé d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent entre le rotor et le réseau d'alimentation. L'objectif visé dans notre travail consiste à développer une commande robuste d'une telle machine dans le but d'optimiser la production de la chaîne éolienne et d'améliorer la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique (maximiser cette énergie).

C'est donc dans ce cadre, que nous allons développer notre étude à travers ce qui suit :

Le mémoire sera consacré à une loi de commande non linéaire : la commande adaptative indirecte. Nous allons apporter une solution au cas des variations paramétriques dont la machine est caractérisée. Nous présenterons les résultats de simulation et les comparerons avec ceux des commandes précédentes.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Commande adaptative de la chaîne Eolienne

1 Introduction

Nous avons vu dans notre précédente avec les commandes utilisées qu'on a pu commander les puissances actives et réactives au stator de la machine asynchrone en utilisant la commande de basée sur le principe de stabilité au sens de Lyapunov et un régulateur Flou. Mais, il s'est avéré que les performances de ces régulateurs se dégradent si les paramètres de la MADA sont affectés par d'importantes variations. Pour remédier à ce problème, nous proposons d'exploiter des lois de commande adaptative où les paramètres du régulateur sont ajustés en temps réel en utilisant une procédure permettant d'estimer en temps réel les paramètres du système.

2 Principe de la commande Adaptative

La commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement en ligne et en temps réel des régulateurs de boucle de commande de manière à maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres du système à contrôler varient dans le temps ou sont inconnus. Il existe dans la littérature deux types de commande adaptative:

- commande adaptative indirecte ;
- commande adaptative directe [31].

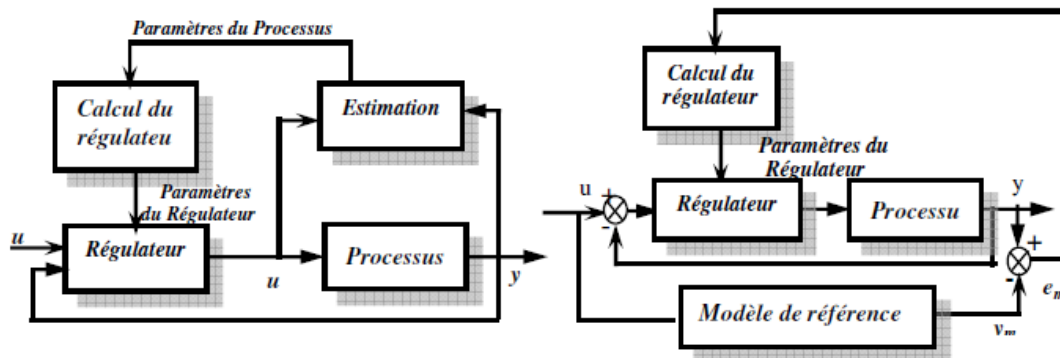


Figure.1.Commande adaptative indirecte Figure.2.Commande adaptative directe

2.1 Commande adaptative directe

Elle consiste à estimer directement les paramètres du régulateur sans identifier explicitement les paramètres du système car l'objectif est de maintenir les performances et non pas connaître les paramètres du système. Cette technique induit des algorithmes plus rapides en évitant le calcul des paramètres du modèle, alors seuls les paramètres du régulateur sont identifiés.

L'estimation des paramètres est faite par un bloc appelé mécanisme d'adaptation ou algorithme d'adaptation paramétrique (AAP).

Dans la commande adaptative directe, les paramètres du régulateur sont ajustés en une seule étape.

2.2 Commande Adaptative indirecte

L'algorithme d'adaptation paramétrique dans ce cas a pour tâche d'estimer les paramètres du système qui seront utilisés pour l'adaptation des paramètres du régulateur, elle se fait selon trois étapes [30] :

- 1) Développer une commande qui sera dépendante des paramètres du système.
- 2) Développer l'algorithme d'adaptation paramétrique qui permettra d'estimer les paramètres inconnus du système en temps réel.
- 3) Remplacer les paramètres estimés du système dans la loi de commande développée à l'étape 1.

Dans notre cas, nous avons décidé de développer une commande adaptative indirecte vu que nous avons déjà élaboré l'étape une (commande non linéaire) de ce système au chapitre trois.

Donc il nous reste à développer un algorithme pour identifier les paramètres du système puis remplacer ces derniers dans la commande développée précédemment en utilisant le principe d'équivalence certaine.

Dans un schéma de commande adaptative indirecte, l'adaptation des paramètres se fait en deux étapes :

- ✓ Estimation des paramètres du procédé.
- ✓ calcul des paramètres du Régulateur à partir des paramètres estimés.

Dans un premier temps, nous développons une commande adaptative indirecte basée sur la loi de commande déjà synthétisée par la méthode de Lyapunov, en suite, pour la commande adaptative floue, nous allons utiliser la commande adaptative directe.

Dans la suite de ce mémoire et à la suite de notre travail déjà présenté dans le mémoire du PFE, nous nous intéressons à la commande adaptative indirecte.

3 Etablissement de la commande Adaptative Indirecte

Comme déjà signalé, l'élaboration de la loi de commande adaptative indirecte est effectuée en trois étapes distinctes.

3.1 Elaboration de la commande

Nous exploitons la loi de commande synthétisée par la méthode de Lyapunov et qui a été développée au chapitre précédent par conséquent ces commandes sont telles que :

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{a_4}(-a_1x_1 + (\omega_a - \omega_m)x_2 + a_2x_3 + a_3x_4 + a_3v_{ds}) - a_p \dot{y}_{1ref} - \lambda_1 e_1 \\ U_2 = \frac{1}{a_4}(-(\omega_a - \omega_m)x_1 - a_1x_2 + a_3x_3 + a_2x_4 + a_3v_{qs}) - a_p \dot{y}_{2ref} - \lambda_2 e_2 \end{cases}$$

Comme les coefficients (a_1, a_2, a_3, a_4) sont liés aux paramètres de la MADA par conséquent ces lois de commande en dépendent également. Aussi, dans la situation où ces paramètres varient sous l'effet des phénomènes physiques, les performances de la commande ne sont plus persistantes et les objectifs astreints ne seront plus réalisés. Pour y remédier, une identification de ces coefficients est nécessaire. Pour identifier ces paramètres, nous allons exploiter un algorithme qui les estime en temps réel afin d'ajuster les paramètres du régulateur ou de la commande dans le but de préserver les performances désirées.

L'algorithme qui permettra d'estimer ces paramètres sera l'algorithme d'adaptation paramétrique qui sera développé dans l'étape suivante.

3.2 Algorithme d'adaptation paramétrique

A cette étape, nous allons identifier les paramètres dynamiques du système. Dans ce cadre, plusieurs méthodes ont été développées et utilisées (le gradient, les moindres carrés récurrents, les moindres carrés étendus...)

Et dans notre cas, nous avons opté pour deux algorithmes, le premier algorithmes est celui basé sur la descente du gradient et la seconde, sur les méthodes des moindres carrés récurrents.

3.2.1 Algorithme de la descente du gradient [32]

Pour appliquer cet algorithme, il faut générer un signal sous forme d'une régression linéaire qui englobera tous les paramètres sollicités par la commande et qui en général s'écrit sous la forme :

$$y_i(t) = \varphi^T \theta_s \tag{1}$$

Où:

- $\varphi(t)$ est le vecteur des mesures ;
- θ_s est le vecteur des paramètres du système.

Dans le cadre notre étude, nous nous sommes restreints à l'influence des résistances et des inductances de la MADA et qui n'affectent principalement que les coefficients (a_1, a_2, a_3, a_4) de la commande. Pour définir le signal en forme de régression linéaire, nous exploitons la première équation du modèle d'état (II.30) du système (il est aussi possible d'exploiter la 2^{ème} équation) qui est donnée par :

$$\dot{x}_1 = -a_1 x_1 + (\omega_a - \omega_m)x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \quad (2)$$

On définit le signal $y_I(t)$ par :

$$y_I(t) = \dot{x}_1 - (\omega_s - \omega_m)x_2 \quad (3)$$

Lequel peut se mettre sous la forme d'une régression linéaire:

$$y_I(t) = [-x_1 \quad x_3 \quad (x_4 x_5 + v_{ds}) - v_{dr}]^T \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

On note par :

$$\varphi(t) = [-x_1 \quad x_3 \quad (x_4 x_5 + v_{ds}) - v_{dr}]^T$$

$$\theta_s = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4]^T$$

L'algorithme du gradient est basé sur la minimisation du critère quadratique défini par :

$$J(t) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (5)$$

Où ε est l'erreur d'estimation entre la mesure $y_I(t)$ et son estimé \hat{y}_m :

$$\varepsilon = y_I(t) - \hat{y}_m(t)$$

$$\hat{y}_m = \varphi^T \hat{\theta}_s$$

Il a été démontré que pour minimiser le critère il suffit d'adapter le vecteur des coefficients selon la loi :

$$\frac{d\hat{\theta}_s}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_s} \quad (6)$$

En effectuant les transformations et les calculs nécessaires, on aboutit à la loi suivante d'adaptation des paramètres :

$$\frac{d\hat{\theta}_s}{dt} = \gamma \varepsilon \varphi^T \quad (7)$$

Qui est le plus souvent appliquée sous sa forme discrète suivante :

$$\hat{\theta}_s(t+1) = \hat{\theta}_s(t) + \Delta \gamma \varepsilon(t) \varphi^T \quad (8)$$

Cet algorithme d'adaptation paramétrique, estime à chaque pas les nouvelles valeurs des paramètres $\hat{\theta}_s(t)$ du système.

3.2.2 Algorithme des moindres carrés récursifs

L'algorithme précédent est un algorithme à gain fixe très performant mais il présente un risque d'instabilité (divergence), c'est pour cela que beaucoup d'autres travaux se basent sur un autre algorithme à gain variable, c'est l'algorithme des moindres carrés récursifs (MCR)

L'algorithme des moindres carrés récursifs (MCR) est basé sur la minimisation d'un critère dépendant de la somme des erreurs d'estimation et non pas de l'erreur comme dans le cas du gradient.

Le critère utilisé pour le MCR est donné par l'équation :

$$J(t) = \sum_{i=1}^t [y(i) - \hat{\theta}_s^T \varphi(i-1)]^2 \quad (9)$$

La minimisation de ce critère conduit à l'algorithme des moindres carrés récursifs suivant :

$$\hat{\theta}_s(t+1) = \hat{\theta}_s(t) + F(t) \varphi(t) \varepsilon^\circ(t+1) \quad (10)$$

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\varphi(t)\varphi^T F(t)}{1 + \varphi^T F(t)\varphi(t)} \quad (11)$$

$$\varepsilon^\circ(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\theta}_s(t+1)\varphi(t)}{1 + \varphi^T F(t)\varphi(t)} \quad (12)$$

Où F(t) est le gain d'adaptation paramétrique qui doit être une matrice définie positive.

Pour initialiser ce gain, on suppose que F(0)= GI, ou I est la valeur de d'identité et la matrice G démarre d'une valeur nulle dans le cas où les valeurs des paramètres sont connues et d'une grande valeur, souvent de l'ordre de mille, dans le cas où les valeurs des paramètres sont inconnues.

3.3. Adaptation des paramètres à la commande

Dans l'hypothèse où le principe d'équivalence certaine est valide, nous pouvons alors substituer, à chaque pas de calcul, les paramètres du régulateur par ceux estimés du système. Ainsi, Les commandes adaptatives basées sur la méthode de Lyapunov sont déterminées par:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{\hat{a}_4}(-\hat{a}_1 x_1 + (\omega_a - \omega_m)x_2 + \hat{a}_2 x_3 + \hat{a}_3 x_4 x_5 + \hat{a}_3 v_{ds}) - a_p \dot{y}_{1ref} - \lambda_1 e_1 \\ U_2 = \frac{1}{\hat{a}_4}(-(\omega_a - \omega_m)x_1 - \hat{a}_1 x_2 + \hat{a}_3 x_3 x_5 + \hat{a}_2 x_4 + \hat{a}_3 v_{qs}) - a_p \dot{y}_{2ref} - \lambda_2 e_2 \end{cases}$$

Où $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3$ et \hat{a}_4 sont les estimés des paramètres du système.

4. Simulation et interprétations

4.1 Simulation des commandes Lyapunov Adaptative indirecte

Les simulations sont effectuées dans les mêmes conditions initiales et pour le même profil du vent que dans les chapitres précédents. De plus, sont considérées les mêmes valeurs des variations paramétriques affectant le modèle d'état de la MADA et ces perturbations sont introduites au même instant $t=1s$.

Commande adaptative basée sur la commande par la méthode de Lyapunov :

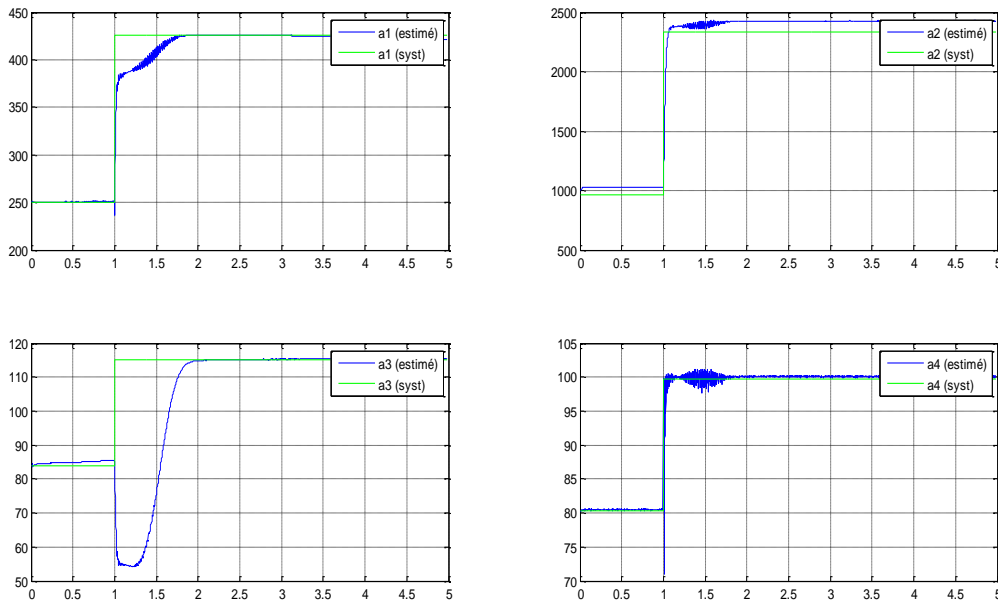
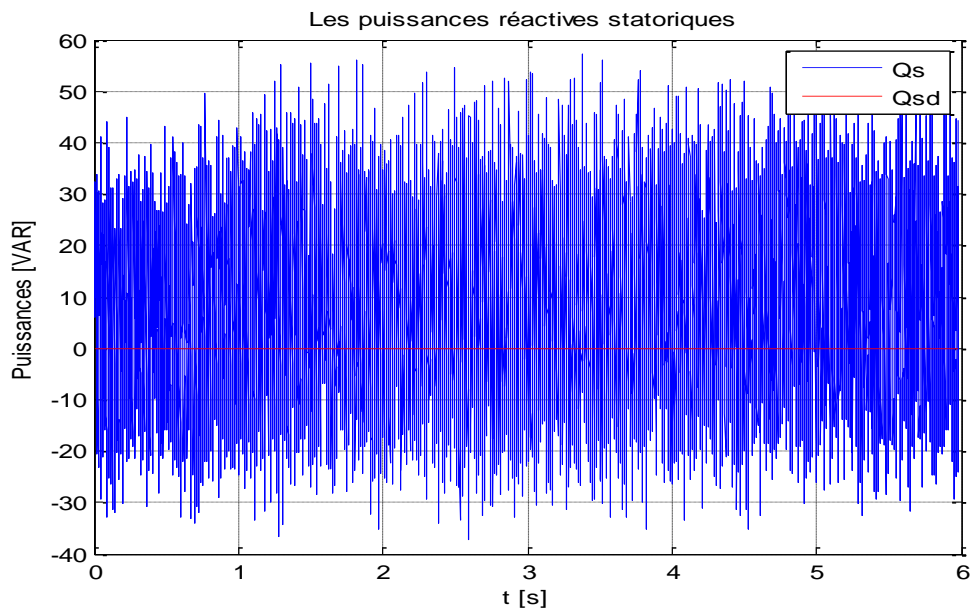
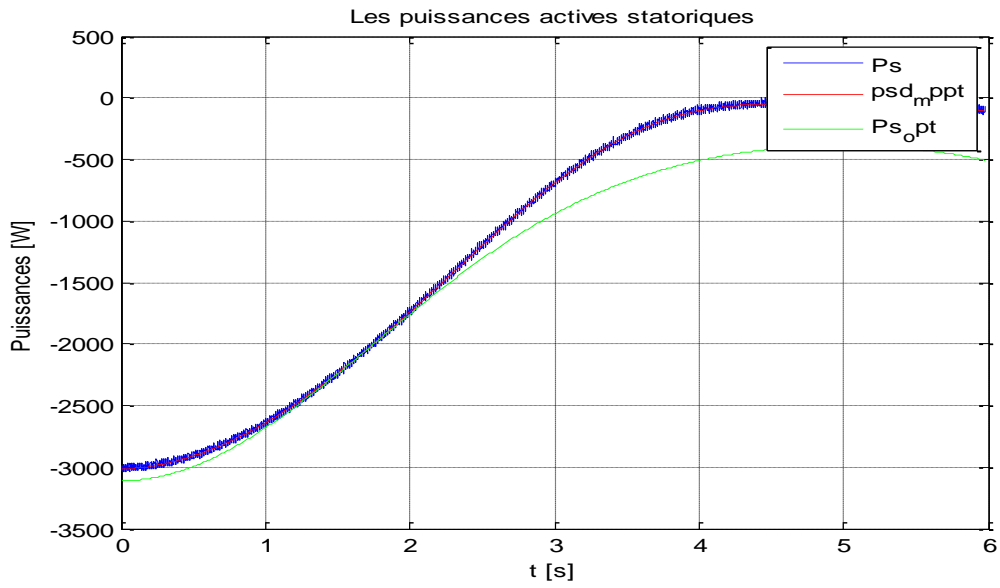


Figure 3 Paramètres vrais et estimés du Système



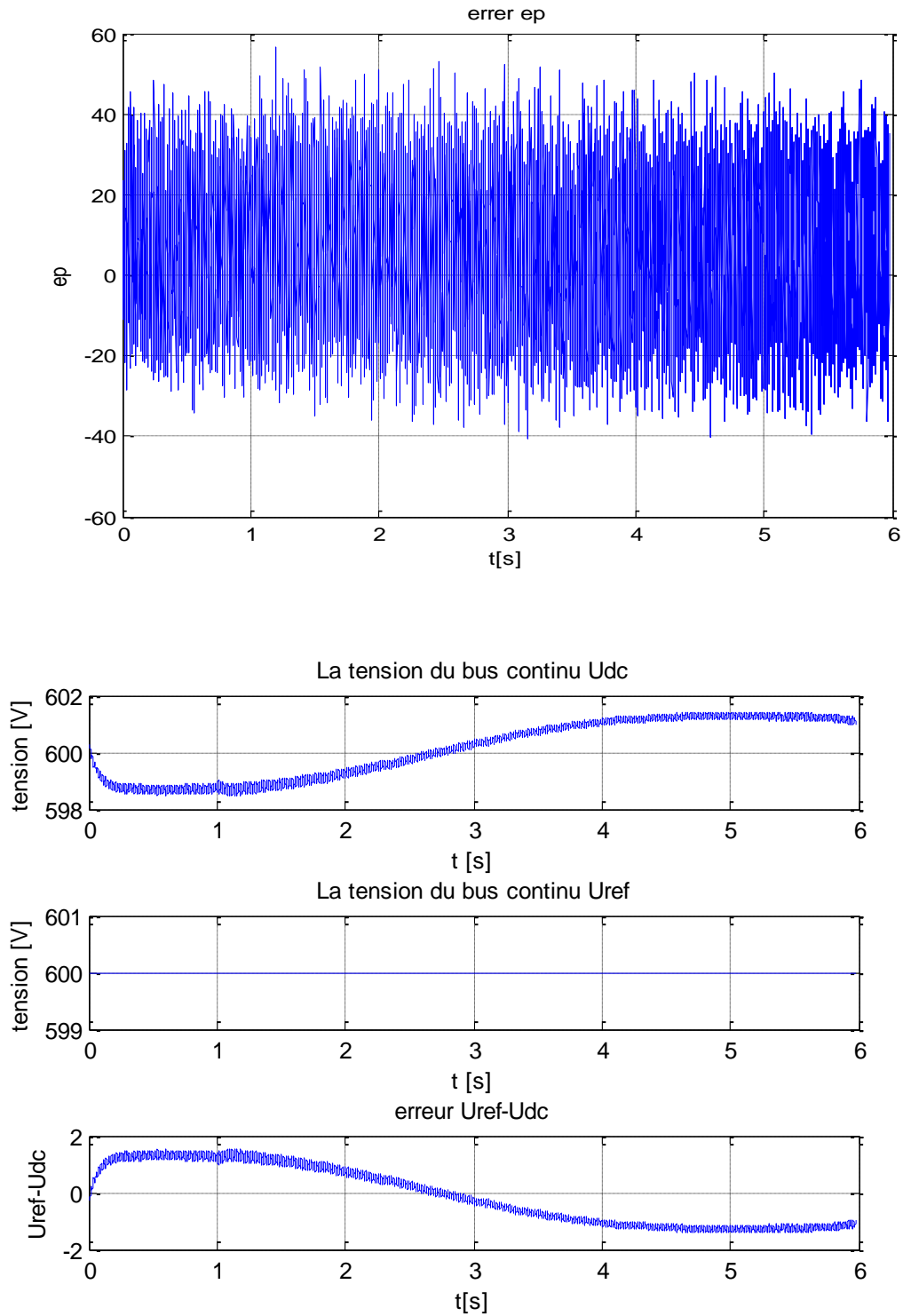


Figure 4 : Réponse de la MADA à la commande Adaptative basée sur la méthode de Lyapunov de la MADA

4.2 Interprétation des résultats

La figure 3 donne l'évolution des coefficients estimés par rapport aux vrais coefficients de la MADA. Il apparaît qu'en dehors des instants relatifs aux sauts des vrais valeurs, les estimés arrivent à suivre les vraies valeurs. Cette évolution des paramètres estimés se répercute sur les réponses la MADA (Fig. 4) montrent l'estimation des paramètres du système à l'aide de l'algorithme du gradient, on remarque une bonne identification des paramètres.

Les résultats de simulation obtenus de la figure. 4 qui donnent les résultats de simulation concernant le régalge des puissances active et réactive statoriques (P_s, Q_s) ainsi que celui de la tension du bus continu U_{dc} montrent l'amélioration des performances dynamiques et la robustesse de ce régulateur vis-à-vis de la variation des paramètres et par rapport à la méthode se basant sur le principe de stabilité au sens de Lyapunov. En effet, il est clair qu'à partir de l'instant $t=1s$, où on introduit des perturbation paramétrique, l'erreur augmente faiblement, contrairement à la méthode se basant sur le principe de stabilité au sens de Lyapunov qui est très sensible aux perturbations.

Ceci dit, Les performances sont du à l'estimation des paramètres en temps réel et l'adaptation des commandes à l'état du système qu'a apporté l'algorithme d'adaptation paramétrique.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons présenté la commande adaptative directe et indirecte. Cette dernière est basée sur la méthode de descente du gradient.

Les aspects de la commande adaptative, ainsi que la conception d'un contrôleur adaptative indirecte ont été introduits tout en justifiant notre choix de ce type de commande qui réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague et sa simplicité de conception. Ce régulateur est considéré comme robuste car il estime le paramètre du système ou du régulateur en temps réel.

Nous avons opté pour une commande indirecte qui se base sur une estimation en ligne des paramètres du système à l'aide d'un algorithme d'adaptation paramétrique. Pour l'identification, nous avons développé deux algorithmes, à savoir : l'algorithme des moindres carrés récursifs et celui de la descente du gradient qui nous a permis d'avoir une estimation des paramètres du système avec une convergence assez rapide vers les valeurs réelles de chacun des paramètres et une bonne précision.

Après avoir estimé les paramètres et à l'aide du principe d'équivalence certaine, nous avons ajusté les paramètres du régulateur avec ceux du système estimés qui améliore nettement la performance.

Commande Adaptative Indirecte de la puissance optimale d'une chaine de conversion d'énergie éolienne basée sur une MADA

La synthèse de Lyapunov de la stabilité permet de déduire la loi d'adaptation des paramètres ajustables. La robustesse du système en boucle fermé est assurée par un terme de commande type mode glissant ce qui rend cette commande robuste qui permet d'avoir de bon résultats.

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était la commande adaptative indirecte d'une génératrice asynchrone à double alimentation, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable.

Cette commande est considérée parmi les solutions trouvées pour les variations paramétriques : l'estimation en temps réel des paramètres du système dans le but d'ajuster les paramètres du régulateur avec ces derniers. C'est ce qu'on a appliqué dans ce mémoire, la commande adaptative indirecte. Les résultats de simulations obtenus montrent clairement l'efficacité voir la performance de cette méthode comparée aux méthodes précédentes.