

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Automatique

Mémoire de master

pour l'obtention du diplôme de master en Automatique

***Commande tolérante aux défauts implicites  
robuste appliquée à une MADA***

Abdelmoumen Saâdeddine ZEKRIFA

Sous la direction de M. Messaoud CHAKIR

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2016

**Composition du Jury :**

Président	Pr. Mohamed TADJINE	ENP
Rapporteur 1	Dr. Messaoud CHAKIR,	ENP
Rapporteur 2	Pr. Mohamed Seghir BOUCHERIT	ENP
Examineur	Pr. Boualem HEMICI	ENP

ENP 2016



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Automatique

Mémoire de master

pour l'obtention du diplôme de master en Automatique

***Commande tolérante aux défauts implicites  
robuste appliquée à une MADA***

Abdelmoumen Saâdeddine ZEKRIFA

Sous la direction de M. Messaoud CHAKIR

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2016

**Composition du Jury :**

Président	Pr. Mohamed TADJINE	ENP
Rapporteur 1	Dr. Messaoud CHAKIR,	ENP
Rapporteur 2	Pr. Mohamed Seghir BOUCHERIT	ENP
Examineur	Pr. Boualem HEMICI	ENP

ENP 2016

## DEDICACE

*Je dédie ce travail à ma mère*

*Et aussi à mon grand frère et mon adorable sœur*

*Et aussi à tous mes amis qui me sont cher*

*Saïd*

## **REMERCIEMENTS**

En premier lieu, je tiens à remercier les membres du corps enseignant pour avoir mis à disposition des sujets très intéressants comme le sujet traité dans ce mémoire.

Et je voudrais remercier et je suis tout autant honoré par la présence du Pr Mohamed TADJINE qui a accepté à présider le jury. Et je remercie aussi Pr Boualem HEMICI et qui sera mon examinateur. Je voudrais plus particulièrement exprimer notre profonde gratitude à mon encadreur Monsieur Messaoud CHAKIR, Chargé de cours à l'école polytechnique d'Alger, et le professeur Mohamed Seghir BOUCHERIT, pour leurs encouragements, leur suivi continuels ainsi que leurs rigueur et leur précieux conseils. leurs connaissances et leurs expérience resteront pour moi une source constante de savoir.

J'aimerais plus que tout remercier mes proches et en premier lieu ma mère à qui je dédie ce mémoire et mon frère et ma sœur qui me sont cher. Je les remercie de m'avoir toujours soutenu et crus en moi.

Je remercie tout aussi tout personne de l'ensemble des professeurs de ma formation depuis l'école primaire jusqu'à ma dernière année universitaire et je ne peux conclure la liste des remerciements sans remercier mes amis qui ont été là pour moi, et qui ont partagé avec moi des moments de joie, de bonheur. Et un petit merci spéciale à mon binôme TAKHERIST Mouna

## ملخص:

هذا العمل يتمثل في تصميم التحكم المتحمل للخلل الضمني القوي المطبق على آلة لا متزامنة مزدوجة التغذية للحفاظ على فعالية مقبولة في حالة وجود خلل. تحقيقا لهذا الغرض بدأنا بتقديم الأعطاب الرئيسية لسلسلة تحويل طاقة الرياح و بالتحديد الآلة اللا متزامنة مزدوجة التغذية. اختيار طريقة لتحديد و ترقيم مختلف تقنيات التحكم المتحمل للخلل. ثم قمنا بنمذجة السلسلة لهوائية و تطبيق تحكم النمط الانزلاقي. لضمان أفضل فاعلية ممكنة لسير عمل سليم. و بعد هذا اقترحنا طريقة للتحكم المتحمل للخلل تستند على النمط الانزلاقي التي تسمح بإنتاج مصطلح إضافي يستطيع تعديل تأثيرات الخلل على التيارات المحرصة. هذا العمل ينتهي بدراسة مقارنة لفاعليات الطريقتين استنادا على نتائج المحاكات. **الكلمات الدالة:** آلة لا متزامنة مزدوجة التغذية, التحكم المتحمل للخلل الضمني, النمط الانزلاقي التحكم القوي

## **Abstract:**

This work is about to develop an implicit and robust tolerant control applied to a doubly fed induction machine to maintain acceptable performance in presence of faults. To this purpose, we first present the main shortcomings of wind conversion chain particularly those of MADA. Then, we modeled the DFIG and applied a sliding mode control to ensure the best possible performance in healthy functioning. After that we proposed an FTC methods based on sliding mode to generate an additive term control able to offset the effect of defects on the stator currents..

**Key words :** DFIG, implicit FTC, sliding mode , robust control

## **Résumé**

Ce travail consiste à élaborer une commande tolérante aux défauts implicite robuste appliqué à une machine asynchrone doublement alimentée afin de garder des performances acceptables en présence de défaut. A cet effet, nous avons commencé à rappeler les principales défaillances d'une chaine de conversion éolienne particulièrement ceux de la MADA, et énuméré diverses techniques FTC. Nous avons ensuite fait un rappel la modélisation du moteur asynchrone doublement alimentée et d'appliquer par la suite une commande par mode glissant pour assurer les meilleures performances possibles en fonctionnement sain. Après quoi on propose une commande tolérante aux défauts par mode glissant, qui permettra de générer un terme de commande additif capable de compenser l'effet des défauts sur les courants statorique. Enfin ce travail se termine.

**Mots clés :** MADA, FTC implicite, mode glissant, commande robuste

## **TABLE DES MATIERES**

LISTE DES FIGURES .....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	iv
liste des mnémonique .....	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	9
<b>Chapitre I</b> Rappel sur la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée et de la commande nominale .....	10
I.1 Introduction .....	11
I.2 Modélisation de la MADA.....	11
I.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	11
I.2.2 Représentation dans le repère (a,b,c) .....	11
I.2.3 Représentation du modèle dans le repère (d,q) .....	13
I.3 synthèse de la commande.....	17
I.3.1 Répercussion du choix du référentiel :.....	17
I.3.2 La commande par mode glissant :.....	19
I.4 Conclusion.....	20
<b>Chapitre II</b> Commande Tolérante aux défauts.....	21
II.1 Introduction.....	22
II.2 Rappel sur les défauts .....	22
II.2.1 Défauts étudiés.....	22
II.2.2 Apparition du défaut .....	22
II.2.3 Evolution du défaut à travers la dynamique du système .....	24
II.3 Approche suivie .....	25
II.3.1 Problème équivalent .....	26
II.3.2 L'aspect FDI de la commande .....	27
II.4 Synthèse de la commande.....	28
II.5 Conclusion .....	29
<b>Chapitre III</b> Test de robustesse de la commande .....	30
III.1 introduction.....	31
III.2 simulation avec présence de défaut .....	31
III.3 simulation du système avec défaut et commande.....	33

III.4 simulation du système avec variation paramétrique de la dynamique de l'erreur	34
CONCLUSION GENARALE.....	36
Bibliographie .....	37
Annexes .....	39
Paramètres de la chaîne éolienne.....	39

## LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Schéma représentant les angles électriques.....	12
Figure I-2 : Schéma de transformation du repère ABC au repère (d,q) .....	13
Figure I-3 : Schéma de transformation du repère ABC au repère (d,q) .....	13
Figure III-1 : l'allure du défaut injecté(A) .....	31
Figure III-2 : Isd avec présence d'un défaut(A).....	31
Figure III-3 : Isq avec présence de défaut(A).....	32
Figure III-4 : l'erreur entre la puissance active et la puissance référence(W).....	32
Figure III-5 : l'erreur de la deuxième surface (VAr) .....	32
Figure III-6: Isd avec présence d'un défaut avec commande additive(A) .....	33
Figure III-7 : Isq avec présence d'un défaut avec commande additive(A) .....	33
Figure III-8 : Q en avec une présence d'un défaut avec commande additive(VAr).....	33
Figure III-9: l'erreur de la surface S1 avec présence d'un défaut avec commande additive(W).....	34
Figure III-10 : Isd issue d'un exo-système biaisé(A).....	34
Figure III-11 : Isq issue d'un exo-système biaisé .....	34

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>MADA</b>	<i>Machine Asynchrone Double Alimentation</i>
<b>MAS</b>	<i>Machine Asynchrone</i>
<b>PFTC</b>	<i>Passive Fault Tolerant Control</i>
<b>AFTC</b>	<i>Active Fault tolerant Control</i>
<b>FTC</b>	<i>Fault Tolerant Control</i>
<b>FDD</b>	<i>Fault Detection and Diagnosis</i>
<b>MPPT</b>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<b>fmm</b>	<i>Force Magnéto-Motrice</i>
<b>FDI</b>	<i>Fault Detection Isolation</i>

## LISTE DES MNEMONIQUE

$g$	Glissement de la machine
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique
$\omega_{mec}$	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur
$[X]_d$	Grandeur exprimée sur l'axe direct du repère tournant
$[X]_q$	Grandeur exprimée sur l'axe en quadrature du repère tournant
$[X]_{abc}$	Grandeur relative aux trois phases
$[X]_{ref}$	Grandeur de référence
$\theta$	Angle entre une phase du stator et une phase du rotor
$\theta_s$	Angle entre l'axe $d$ et une phase du stator
$\theta_r$	Angle entre l'axe $d$ et une phase du rotor

# *INTRODUCTION GENERALE*

Dans l'industrie, la présence des machines ne cesse d'augmenter, et ne fait que faciliter la tâche aux ouvriers et faire des tâches pénibles à leur place et prend une grande part dans la production. De ce fait, s'il y a présence de panne ceci ne fera que ruiner l'économie de la société. Soit par la répercussion de ce dernier sur la production, ce qui peut ruiner ou donner naissance à des produits non-conformes, ou par la détérioration de la machine, qu'elle soit réversible ou non réversible.

Il sera logique de détecter les défauts à temps, et enclencher une manœuvre pour préserver la machine ainsi que la production dans un mode de fonctionnement tolérable. C'est dans cette perspective que l'élaboration d'une commande tolérante aux défauts a vu naissance.

Dans le cadre de notre travail, on va surtout se pencher sur la machine asynchrone doublement alimentée, appliquée à une éolienne. Donc en d'autres mots, on essaiera de continuer le travail qui a été fait dans le mémoire « Modélisation de la chaîne éolienne et commande tolérante aux défauts ».

La problématique est que dans le mémoire présenté, la commande a été créée de sorte à ce qu'elle soit robuste sans prendre en considération les variations, donc on essaiera durant ce travail de présenter une commande additive qui prendra en compte les variations.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est un rappel de ce qu'il a été fait dans le mémoire, on parlera de la modélisation de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée, et de sa commande nominale qui est synthétisée par le mode glissant. On parlera aussi des surfaces de glissement utilisées et de leurs intérêts.

Le deuxième chapitre est consacré à la commande tolérante aux défauts, on commence avec la modélisation en mode défaillant, puis du terme additif de commande. Par conséquent, on mettra en valeur la différence entre les termes additifs liés aux surfaces de glissement.

Le troisième chapitre, représente le cœur du problème, vu que les paramètres varient on essaiera de trouver une commande qui pourra compenser l'effet des défauts, sans pour autant connaître la vraie valeur du paramètre. Et on clôtura ce mémoire par une conclusion générale.

**Chapitre I** *Rappel sur la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée et de la commande nominale*

## **I.1 INTRODUCTION**

La machine asynchrone doublement alimenté est suscité la curiosité des chercheur ses derniers temps vu les avantages qu'elle offre. Dans notre cas cette machine est utilisé en dans les aérogénérateurs puisqu'elle permet un fonctionnement à vitesse variable d'où l'intérêt de notre étude. Mais comme toute machine et sa complexité, et sur ce plan la MADA est considéré comme complexe puisqu'elle est alimentée par le stator mais aussi par le rotor, d'où son nom.

On va essayer dans ce chapitre de rappeler ce qui a été fait, on parlera de la modélisation de la machine ainsi que sa commande nominale.

## **I.2 MODELISATION DE LA MADA**

Vu que dans notre cas, la MADA est utilisé afin de générer l'énergie éolienne, on s'intéresse à un fonctionnement en hypo-synchrone, en mode génératrice. La machine asynchrone doublement alimenté, est une machine très complexe, ce qui la rend difficile à modéliser. Dans le cadre de notre étude, il nous faut poser des hypothèses qui vont nous simplifier le modèle sans pour autant trop s'éloigner du système réel. (11)

### **I.2.1 Hypothèses simplificatrices**

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau est négligeable
- On admet que la fmm crée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.

Et de ces hypothèses, on en découle les conséquences suivantes :

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

### **I.2.2 Représentation dans le repère (a,b,c)**

La position du rotor en rotation vis-à-vis le stator est en fonction de la vitesse de rotation  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  ou  $\theta$  est l'angle entre l'enroulement statorique et l'enroulement rotorique.

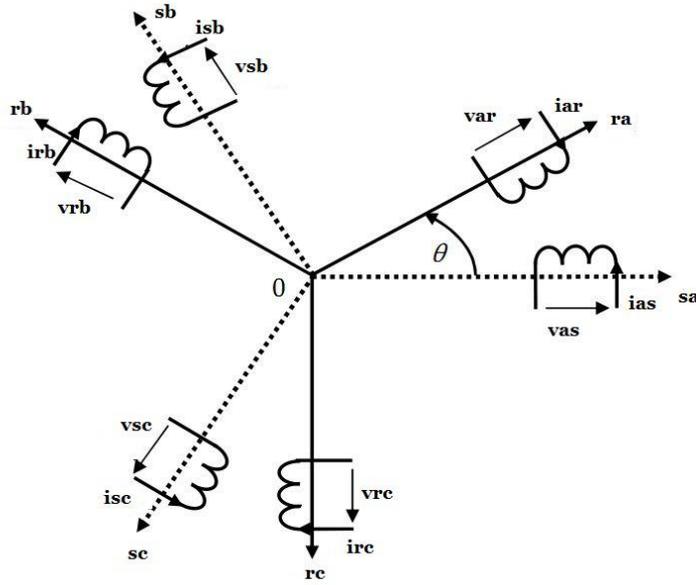


Figure I-1: Schéma représentant les angles électriques

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses citées précédemment, le comportement dynamique de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant :

$$V_s = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (I.1)$$

$$V_r = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (I.2)$$

Avec

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

$$[I_s] = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \quad [I_r] = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad [V_s] = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} \quad [V_r] = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix}$$

On a aussi les équations des flux comme suit :

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (I.3)$$

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (I.4)$$

Avec

$$\begin{aligned}
 [L_s] &= \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} & [L_r] &= \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix} \\
 [M_{sr}] &= \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} & (I.5)
 \end{aligned}$$

Il est simple de voir que d'après l'équation I.5, que les équations du flux soit I.3 et I.4 sont en fonction de  $\theta$  ce qui rend le système très complexe et difficile à étudier. Donc on va proposer une transformation qui est un changement de base suivant la matrice de Park

### I.2.3 Représentation du modèle dans le repère (d,q)

La machine asynchrone à double alimentation est représentée par un système de six équations électriques en plus d'une équation mécanique. Travailler avec ces sept équations est pénible est barbant même avec les outils numériques, ce qui rend l'utilisation d'une transformation indispensable.

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système

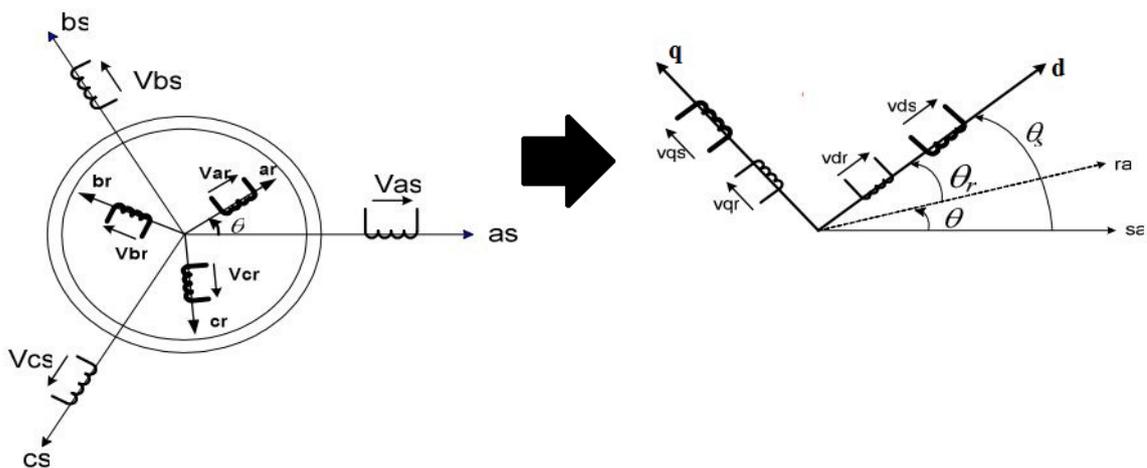


Figure I-3 : Schéma de transformation du repère ABC au repère (d,q)

Donc la matrice de transformation de Park est :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{I.6})$$

L'angle  $\theta$  peut dépendre du temps et de la position initiale. Et pour ce qui est du référentiel on choisit celui du champ tournant.

Sans oublier que la matrice  $[P(\theta)]$  est orthonormé ce qui donne

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad (\text{I.7})$$

Donc les tensions et les courants et les flux vont se transformer en ce qui va suivre :

$$\begin{cases} [I_{s,dq}] = [P(\theta_s)] [I_{s,abc}] \\ [\varphi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] [\varphi_{s,abc}] \\ [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] [V_{s,abc}] \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

$$\begin{cases} [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] [I_{s,abc}] \\ [\varphi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] [\varphi_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] [V_{s,abc}] \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

Les relations entre les flux et les courants vont se simplifier et on aura la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = l_s i_{sd} + m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = l_s i_{sq} + m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = l_r i_{rd} + m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = l_r i_{rq} + m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

Le système différentiel sera :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = r_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{I.11})$$

Avec  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  et  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

On note  $g$  qui représente le glissement

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (\text{I.12})$$

Les puissances active et réactive statorique auront la forme suivante :

$$P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (\text{I.13})$$

$$Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \quad (\text{I.14})$$

Le couple électromagnétique prendra la forme suivante :

$$\Gamma_{em} = p(\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{I.15})$$

D'autre part, on va essayer de décrire le système dans un espace d'état donc on commence par l'écriture vectorielle, on a :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\varphi] + [W][\varphi] \quad (\text{I.16})$$

Avec

$$[V] = \begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{pmatrix} [I] = \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} [\varphi] = \begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix}$$

$$[R] = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{pmatrix} W = \omega_s \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g \\ 0 & 0 & g & 0 \end{pmatrix}$$

On a aussi la relation entre les courants et les flux avec une écriture vectorielle

$$[\varphi] = [L][I] \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$$[L] = \begin{pmatrix} l_s & 0 & m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & m \\ m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & m & 0 & l_r \end{pmatrix}$$

### **I.2.3.1 Représentation matricielle :**

On remplace I.17 dans I.16, et on trouve

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[L][I] + [W][L][I] \quad (\text{I.18})$$

On sort la matrice  $[L]$  de la dérivée puisqu'elle est invariante par rapport au temps

$$\frac{d}{dt}[I] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}([R] + [W][L])[I] \quad (\text{I.19})$$

On peut dire que le système est décrit dans un espace d'état où le vecteur d'état est  $[I]$

$$X = [I] \quad (\text{I.20})$$

Notre choix pour le vecteur d'état n'est pas fortuit, mais il est dédié au cadre notre étude qui est la détection des défauts, lesquels apparaissent dans les courants statoriques et rotoriques.

Dans cette représentation on peut poser les matrices  $A$  et  $B$  comme suit

$$A = [L]^{-1}([R] + [W][L]) \text{ et } B = [L]^{-1} \quad (\text{I.21})$$

Donc on trouve une représentation d'état après avoir remplacé I.21 dans I.19, et qui est la suivante :

$$\dot{X} = AX + BV \quad (\text{I.22})$$

Même si le système paraît linéaire mais ce n'est pas le cas vu que la matrice  $A$  dépend du paramètre  $g$  qui est en fonction de  $\omega$  qui a son tour est régit par l'équation différentielle de la partie mécanique.

### I.2.3.2 Représentation développée

Après développement et calcul de la représentation matricielle I.22, on se retrouve avec les équations suivantes qu'on va exploiter par la suite afin de synthétiser la commande garantissant le bon fonctionnement de la machine :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{\sigma l_s} v_{sd} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rd} - \frac{r_s}{\sigma l_s} x_1 + \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_r} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\sigma l_s} v_{sq} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rq} - \frac{r_s}{\sigma l_s} x_2 - \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_r} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_1 \\ \dot{x}_3 = \frac{v_{rd}}{\sigma l_r} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{sd} + \frac{m r_s}{\sigma l_s l_r} x_1 + \omega_s x_4 - \frac{r_r}{\sigma l_r} x_3 - \frac{1}{\sigma} \omega x_4 - \frac{m}{\sigma l_r} \omega x_2 \\ \dot{x}_4 = \frac{v_{rq}}{\sigma l_r} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{sq} + \frac{m r_s}{\sigma l_s l_r} x_2 - \omega_s x_3 - \frac{r_r}{\sigma l_r} x_4 + \frac{1}{\sigma} \omega x_3 - \frac{m}{\sigma l_r} \omega x_1 \end{cases} \quad (I.23)$$

## **I.3 SYNTHÈSE DE LA COMMANDE**

Par conception, le stator de la MADA est directement relié au réseau ( $v_{sd}$  et  $v_{sq}$ ) le rotor est lui commandé par  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$

Vu qu'on s'intéresse à la commande de la machine asynchrone, on considère que le système est linéaire, par rapport  $X$  le vecteur d'état même si ce dernier n'est pas linéaire. En tant que génératrice, la machine étudiée doit délivrer par rapport au stator une puissance active qui est égale à celle calculé dans la MPPT [voir PFE]. On essaiera de minimiser l'erreur suivante

$$e = P_s - P_{ref} \quad (I.24)$$

Même chose pour la puissance réactive. On va essayer de la faire tendre vers 0 afin de faire augmenter le  $\cos(\varphi)$  pour que l'énergie délivrer soit de qualité. Donc on essaiera de minimiser l'erreur suivante :

$$e = Q_s \quad (I.25)$$

### **I.3.1 Répercussion du choix du référentiel :**

Vu que le référentiel choisi est celui du champ tournant, nos équations seront simplifiées et en aura en régime établi :

$$\begin{aligned}\varphi_{sd} &= \varphi_s \\ \varphi_{sq} &= 0\end{aligned}\tag{I.26}$$

Si on néglige les résistances statoriques devant les autres entités et en tenant compte de I.26 on aura ceci :

$$V_{sd} = 0 \Rightarrow V_{sq} = V_s \tag{I.27}$$

$$V_{sq} = \omega_s \varphi_s \Rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \tag{I.28}$$

Si on développe les équations I.10 en remplaçant avec les formules I.26, I.27 et I.28 on trouve :

$$\begin{aligned}\frac{V_s}{\omega_s} &= \varphi_s = l_s i_{sd} + m i_{rd} \\ 0 &= l_s i_{sq} + m i_{rq}\end{aligned}$$

Après développement on trouve :

$$\begin{aligned}i_{rq} &= -\frac{l_s}{m} i_{sq} \\ i_{rd} &= \frac{V_s}{\omega_s m} - \frac{l_s}{m} i_{sd}\end{aligned}$$

Et avec la représentation d'état on trouve :

$$x_4 = -\frac{l_s}{m} x_2 \tag{I.29}$$

$$x_3 = \frac{V_s}{\omega_s m} - \frac{l_s}{m} x_1 \tag{I.30}$$

Les résultats obtenus sont :

$$P_s = V_s x_2 \tag{I.31}$$

$$Q_s = V_s x_1 \tag{I.32}$$

$$\Gamma_{em} = \frac{m}{p} (x_2 x_3 - x_1 x_4) \tag{I.33}$$

### I.3.2 La commande par mode glissant :

Le but de cette commande est d'imposer au vecteur d'état à glisser sur la surface dans laquelle si le vecteur d'état appartient à la surface ce dernier converge à la référence imposée.

La partie la plus importante de cette commande est de trouver une surface  $S$  qui converge

On commence par la surface de Slotine qui s'écrit sous la forme suivante :

$$S = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e$$

Dans notre cas le degré relatif des deux erreurs est égal à 1. Ce qui nous donne les surfaces suivantes :

$$S_1 = P_s - P_{ref} \quad (I.34)$$

$$S_2 = Q_s \quad (I.35)$$

Ses surfaces convergent vu que ce sont des surfaces de Slotine. Le choix de cette commande n'est pas dû au hasard. Vu que cette commande présente déjà un signe de robustesse. Ce qui va nous aider à synthétiser une commande tolérante aux défauts robuste. Pour que la commande soit satisfaite il suffit juste de poser  $\dot{S} = -k \text{sign}(S)$

#### I.3.2.1 Commande de la puissance active

De I.34 et de I.31 et après dérivation on trouve

$$\frac{d}{dt} P = V_s \frac{d}{dt} x_2$$

Donc on aura

$$\dot{S}_1 = \dot{P} - \dot{P}_{ref}$$

Et en remplaçant I.23 dans cette équation on trouve

$$\dot{S}_1 = V_s \left( \frac{1}{\sigma l_s} V_s - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rq} - \frac{r_s}{\sigma l_s} x_2 - \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_r} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_1 \right) - \dot{P}_{ref}$$

Pour ce qui est de la commande de la puissance active elle sera assurée par  $V_{rq}$  donc on aura l'expression de la commande comme suit

$$v_{rq} = \frac{l_r}{m} \left( V_s + \frac{\sigma l_s}{V_s} k_1 \text{sign}(S_1) - r_s x_2 - \sigma l_s \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{l_r} x_4 - \frac{m}{l_r} \omega x_3 - \frac{m^2}{l_r} \omega x_1 - \frac{\sigma l_s}{V_s} \dot{P}_{ref} \right) \quad (I.36)$$

### I.3.2.2 Commande de la puissance réactive

De l'équation I.35 et I.32 et après dérivation on trouve

$$\dot{S}_2 = \dot{Q}$$

Et en remplaçant l'équation I.23 on trouve

$$\dot{S}_2 = V_s \left( -\frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rd} - \frac{r_s}{\sigma l_s} x_1 + \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_r} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_2 \right)$$

On voit bien que l'a puissance réactive est commandée par  $v_{rd}$  et aura la forme suivante :

$$v_{rd} = \frac{l_r}{m} \left( \frac{\sigma l_s}{V_s} k_2 \text{sign}(S_2) - r_s x_1 + \sigma l_s \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{l_r} x_3 + m \omega x_4 + \frac{m^2}{l_r} \omega x_2 \right) \quad (\text{I.37})$$

## **I.4 CONCLUSION**

Durant ce chapitre on a pu englober, les différentes parties de la MADA et de modéliser ce système tout en tenant compte de quelque hypothèse simplificatrice. Puis on a synthétisé une commande par le mode glissant

## **Chapitre II** *Commande Tolérante aux défauts*

## II.1 INTRODUCTION

La commande est omni présente dans notre vie quotidienne. On peut le remarquer dans les voitures, les ascenseurs et les ordinateurs et on peut dire que la liste est encore longue. Cette commande permet le fonctionnement idéal du système. Si on situe dans l'industrie, les systèmes de commande sont incrustés dans pratiquement toutes parti de l'industrie. Ces commandes garantissent le bon fonctionnement du système, seulement il y a une durée à tous ces machine tombent en panne.

Mais avant que la machine tombe en panne, elle doit présenter un signe de défaillance qu'on l'appelle défaut. Et en suivant une logique d'industrie, l'occurrence des défauts est rare par construction. Et il serait préférable d'optimiser le fonctionnement de la machine même en présence de défaut, d'où l'utilisation des commandes tolérantes aux défauts. Cette commande permet le fonctionnement de la machine en mode défaillant « faulty mode » en présence de défaut, soit à son régime désiré, soit à un état acceptable de fonctionnement dicté par les normes de services.

## II.2 RAPPEL SUR LES DEFAUTS

On a vu dans le mémoire « modélisation d'une chaine éolienne et commande tolérante aux défauts » que les défauts apparaissent sous forme d'harmoniques qui viennent s'additionner a notre signal de sortie

### II.2.1 Défauts étudiés

Chaque défaut, de pars sa forme, sa sévérité et le composant sur lequel il se produit, affecte le courant statorique d'une manière différente. Et le tableau suivant récapitule sur les signatures des défauts sur les courants statorique sur la MADA

Défauts	Harmonique associée
Rupture d'une portion d'anneau	$f_{rendring} = f_s \left( k \frac{1-g}{p} \pm g \right)$
Défauts d'enroulement du rotor	$f_w = f_s (1 \pm kg)$
Court-circuit statorique	$f_{sf} = \pm k f_s$
Excentricité (statique, dynamique, mixte)	$f_{exc} = f_s \left( 1 \pm m \frac{1-g}{p} \right)$

### II.2.2 Apparition du défaut

Le défaut apparait sur les courants statoriques d'une manière directe, et sur la courants rotorique par le biais de la dynamique. Donc

On a

$$i_{sa} = i_{sa}^* + Z_a$$

$$i_{sb} = i_{sb}^* + Z_b$$

$$i_{sc} = i_{sc}^* + Z_c$$

Après la transformation de Park on trouve le résultat suivant :

$$i_{sd} = i_{sd}^* + Z_d \quad (\text{II.1})$$

$$i_{sq} = i_{sq}^* + Z_q \quad (\text{II.2})$$

On voit bien que même les harmoniques subissent la transformation de Park. Et on aura

$$Z_a = A_f \sin(\omega_f' t + \varphi)$$

On trouve après transformation :

$$Z_d = A_f \sin(\omega_f t + \varphi_f) \quad (\text{II.3})$$

$$Z_q = A_f \cos(\omega_f t + \varphi_f) \quad (\text{II.4})$$

Avec

$$\omega_f' = \omega_f + \omega_s \quad (\text{II.5})$$

Dans ce chapitre on va définir la commande comme si on connaissait la valeur exacte de  $\omega_f$ , vu qu'en réalité cette valeur varie en fonction du temps. Afin de générer le terme  $Z$  on propose un exo-système suivant :

$$\dot{Z} = S Z \quad (\text{II.6})$$

Avec

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \omega_f \\ -\omega_f & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$Z = \begin{pmatrix} Z_d \\ Z_q \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Le terme  $Z$  dépend des défauts existant. Donc s'il y a occurrence de plusieurs défauts on aura ceci

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \omega_f & \dots & 0 & 0 \\ -\omega_f & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \omega_{fi} \\ 0 & 0 & & -\omega_{fi} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$Z = \begin{pmatrix} Z_d \\ Z_q \\ \vdots \\ Z_{di} \\ Z_{qi} \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\dim(S) = 2 \cdot \text{card}(\text{défaut}) \quad (\text{II.11})$$

$$Z_{d(\text{total})} = Z_d + Z_{d1} + Z_{d2} + \dots + Z_{di} = Q_d \cdot Z \quad (\text{II.12})$$

$$Z_{q(\text{total})} = Z_q + Z_{q1} + Z_{q2} + \dots + Z_{qi} = Q_q \cdot Z \quad (\text{II.13})$$

Avec

$$Q_d = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0)$$

$$Q_q = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots \ 0 \ 1)$$

On aura

$$x_{1f} = x_1 + Q_d Z \quad (\text{II.14})$$

$$x_{2f} = x_2 + Q_q Z \quad (\text{II.15})$$

### II.2.3 Evolution du défaut à travers la dynamique du système

Ce terme additif va se propager dans tout le vecteur d'état, les courants statoriques sont affectés d'une manière directe, et les courants rotoriques le sont par le biais de la dynamique. On peut dire que la dynamique du défaut dépend du système, c'est évident, surtout que l'influence du défaut est directe sur les courants et leur dynamique

On remplace II.14 et II.15 dans la dynamique du système I.23, on aura :

$$\dot{x}_f = f(x_f) + BU$$

On essaye d'exprimer  $\dot{x}$  en fonction de  $x$  et  $Z$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 + Q_d \dot{Z} &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} (x_1 + Q_d Z) + \omega_s (x_2 + Q_q Z) + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega (x_2 + Q_q Z) - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rd} \\ \dot{x}_1 &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_1 + \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_2 - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rd} + \Gamma_1 Z \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$\Gamma_1 = \left( -\frac{r_s}{\sigma l_s} Q_d + \omega_s Q_q + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega Q_q - Q_d S \right) \quad (\text{II.17})$$

Il en est de même pour les autres composants

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 + Q_q \dot{Z} &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} (x_2 + Q_q Z) - \omega_s (x_1 + Q_d Z) + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega (x_1 + Q_d Z) + \frac{V_s}{\sigma l_s} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rq} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_2 - \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_1 + \frac{V_s}{\sigma l_s} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rq} + \Gamma_2 Z \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Avec

$$\Gamma_2 = \left( -Q_q S - \frac{r_s}{\sigma l_s} Q_q - \omega_s Q_d - \frac{m^2 \omega}{\sigma l_s l_r} Q_d \right) \quad (\text{II.19})$$

Après ce développement, on a montré que le défaut n'influe pas que sur les courants, mais aussi leurs dynamiques. Donc de cette manière, on a pu isoler l'influence du défaut sur la machine par les termes  $\Gamma_1$  et  $\Gamma_2$ , on peut alors dire que la dynamique du système prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) + B_1 U + V_1 \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + B_2 U + V_2 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} V_1 = \Gamma_1 Z \\ V_2 = \Gamma_2 Z \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $f(x)$  est la dynamique du système réel en mode sain. Donc les termes  $V_1$  et  $V_2$  sont nuls si la machine est fonctionnement mode sain, différent de zéro s'il y a présence d'un défaut.

### II.3 APPROCHE SUIVIE

Pour faciliter la synthèse de la commande tolérante aux défauts, on ajoute un terme additif qui vient s'ajouter à la commande nominal. Ce terme a pour but d'annuler l'effet du défaut. Donc pour mieux visualiser le problème, on applique un changement de variable. Il est intéressant de manipuler les équations avec les erreurs qu'avec les grandeurs réelles.

### II.3.1 Problème équivalent

On reprend le développement de l'équation II.20, on peut écrire le système sous la forme compacte suivante :

$$\dot{x} = f(x) + BU + V \quad (\text{II.22})$$

Avec  $V$  est la dynamique du défaut dans notre système.

Pour mieux visualiser le problème, on se fixe de nouvelles variables. On pose

$$\bar{x} = x - x_r \quad (\text{II.23})$$

Les  $x_r$  sont définis par les références imposées pour la commande nominale. Donc on aura

$$\begin{cases} x_{1r} = 0 \\ x_{2r} = \frac{P_{ref}}{V_s} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

On dérive II.23 on aura :

$$\dot{\bar{x}}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1r}$$

Puis on remplace  $\dot{x}_1$  avec son équivalent de l'équation I.23

$$\dot{\bar{x}}_1 = -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_1 + \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_2 - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rd} + \Gamma_1 Z - \dot{x}_{1r}$$

On remplace aussi  $v_{rd}$  par  $v_{rd}^* + u_{ad1}$  avec  $v_{rd}^*$  est la commande par mode glissant calculé dans I.36

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 = & -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_1 + \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_3 + \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_4 + \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_2 - \frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad1} \\ & - \frac{1}{\sigma l_s} \left( \frac{\sigma l_s}{V_s} k_2 \text{sign}(S_2) - r_s x_1 + \sigma l_s \omega_s x_2 + \frac{m r_r}{l_r} x_3 + m \omega x_4 + \frac{m^2}{l_r} \omega x_2 \right) + \Gamma_1 Z \end{aligned}$$

On trouvera

$$\dot{\bar{x}}_1 = -\frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad1} - \frac{1}{V_s} k_2 \text{sign}(S_2) + \Gamma_1 Z \quad (\text{II.25})$$

Même chose pour les autres grandeurs

On dérive II.23

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_{2r} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_2 - \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_1 + \frac{V_s}{\sigma l_s} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} v_{rq} + \Gamma_2 Z - \frac{\dot{P}_{ref}}{V_s} \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\frac{r_s}{\sigma l_s} x_2 - \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{\sigma l_s l_s} x_4 - \frac{m}{\sigma l_s} \omega x_3 - \frac{m^2}{\sigma l_s l_r} \omega x_1 + \frac{V_s}{\sigma l_s} - \frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad2} \\ &\quad - \frac{1}{\sigma l_s} \left( V_s + \frac{\sigma l_s}{V_s} k_1 \text{sign}(S_1) - r_s x_2 - \sigma l_s \omega_s x_1 + \frac{m r_r}{l_r} x_4 - \frac{m}{l_r} \omega x_3 - \frac{m^2}{L_r} \omega x_1 + \frac{\sigma L_s}{V_s} \dot{P}_{ref} \right) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad2} - \frac{1}{V_s} k_1 \text{sign}(S_1) + \Gamma_2 Z\end{aligned}\quad (\text{II.26})$$

Les équations II.25 et II.26 regroupées deviennent

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad1} - \frac{1}{V_s} k_2 \text{sign}(S_2) + \Gamma_1 Z \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{m}{\sigma l_s l_r} u_{ad2} - \frac{1}{V_s} k_1 \text{sign}(S_1) + \Gamma_2 Z \end{cases}\quad (\text{II.27})$$

On essayera par la suite d'imposer une commande qui amènera ce système à l'origine. Donc à l'aide de ce petit changement de variable, les équations se sont simplifiées. Le seul problème qu'on va rencontrer c'est que le  $Z$  est inconnu. Donc on se propose un estimateur  $\xi$  qui aura la même dynamique que l'erreur. Donc on pose

$$\dot{\xi} = S\xi + N(\bar{x})\quad (\text{II.28})$$

Avec  $N(\bar{x})$  un paramètre pour bien estimer les effets des défauts. Donc le terme  $N(\bar{x})$  s'active dans le cas où il a présence de défaut sinon il est égal à zéro.

On peut dire que le  $\xi$  représente l'aspect FDI de la commande.

### II.3.2 L'aspect FDI de la commande

Il est intéressant de noter que dans cette technique, la phase de détection et d'isolation du défaut qui constitue le point de départ dans l'approche classique est décalée par rapport à la phase de reconfiguration de la commande. Celle-ci est réalisée en testant l'état du modèle interne qui s'active automatiquement pour compenser l'effet du défaut.

Cette technique est utilisée principalement pour le rejet de perturbations dans la régulation non linéaire de sortie et elle a été adaptée pour élaborer une commande FTC implicite de la machine asynchrone (13). Sur la base de ces travaux, nous proposons dans la suite une

application de cette technique à la machine asynchrone doublement alimenter puis nous élaborons une nouvelle approche de calcul de la commande additive.

Afin de synthétiser la commande, il nous faut juste de trouver un  $N(\bar{x})$  qui nous permettra d'estimer le  $Z$  afin que notre commande compense l'effet du défaut. Donc on quelque sorte l'objectif est de faire tendre  $\xi$  vers  $Z$  donc en d'autre terme de faire tendre qui est  $e = \xi - Z$  vers l'origine. Sachant que la dynamique de  $e$  est comma suit

$$e = \xi - Z$$

$$\dot{e} = \dot{\xi} - \dot{Z}$$

$$\dot{e} = S\xi + N(\bar{x}) - SZ$$

La dynamique de l'erreur est la suivante

$\dot{e} = Se + N(\bar{x})$	(II.29)
-----------------------------	---------

## II.4 SYNTHÈSE DE LA COMMANDE

Dans la même thématique de la synthèse d'une commande dite robuste, on se fixe une commande par mode glissant, cette dernière est robuste par construction. Donc, comme expliqué dans l'équation II.27 on pose deux surfaces de glissement de Slotine.

$$S_3 = \bar{x}_1 \tag{II.30}$$

$$S_4 = \bar{x}_2 \tag{II.31}$$

Donc on dérive et on trouve II.29 et On développe la première surface

$$S_3 = \bar{x}_1$$

$$\dot{S}_3 = \dot{\bar{x}}_1 = k_2 \text{sign}(S_2) + Bu_{ad1} + \Gamma_1 Z$$

Donc notre commande prendra la forme suivante

$$u_{ad1} = B^{-1}(k_2 \text{sign}(S_2) + k_3 \text{sign}(S_3) + \Gamma_1 \xi) \tag{II.32}$$

On applique la même chose pour la surface  $S_4$

$$S_4 = \bar{x}_2$$

$$\dot{S}_4 = \dot{\bar{x}}_2 = k_1 \text{sign}(S_1) + Bu_{ad2} + \Gamma_2 Z$$

Puis notre commande prendra la forme

$$u_{ad2} = B^{-1}(k_1 \text{sign}(S_1) + k_4 \text{sign}(S_4) + \Gamma_2 \xi) \tag{II.33}$$

Afin de prouver sa convergence on pose une fonction de Lyapunov tout en remplaçant II.32 II.33 dans la fonction de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2}\bar{x}_1^2 + \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}\bar{x}_2^2$$

$$\dot{V} = \dot{\bar{x}}_1 + e^T \dot{e} + \bar{x}_2 \dot{\bar{x}}_2$$

$$\dot{V} = \bar{x}_1(-k_3 \text{sign}(S_3) - \Gamma_1 e) + e^T S e + e^T N(\bar{x}) + \bar{x}_2(k_4 \text{sign}(S_4) - \Gamma_2 e)$$

$$\dot{V} = -\bar{x}_1 k_3 \text{sign}(S_3) - \bar{x}_1 \Gamma_1 e + e^T S e + e^T N(\bar{x}) - \bar{x}_2 k_4 \text{sign}(S_4) - \bar{x}_2 \Gamma_2 e$$

On a  $\bar{x}_1 \text{sign}(S_3) > 0 \quad \forall \bar{x}_1$  même chose pour  $\bar{x}_2 \text{sign}(S_4) > 0 \quad \forall \bar{x}_2$  donc de ces résultats, on constate qu'il faut annuler ce qui reste pour qu'elle soit FSDN.

$$0 = -\bar{x}_1 \Gamma_1 e + e^T S e + e^T N(\bar{x}) - \bar{x}_2 \Gamma_2 e$$

Puisque S est antisymétrique  $e^T S e$  et on peut regrouper aussi les termes  $-\bar{x}_1 \Gamma_1 e$  et  $-\bar{x}_2 \Gamma_2 e$  sous forme matricielle  $-\bar{x}^T \Gamma e$  et vu que c'est un scalaire, il peut être réécrit en  $-e^T \Gamma \bar{x}$  ce qui rend l'équation comme suit

$$-e^T (\Gamma \bar{x} - N(\bar{x})) = 0$$

Donc on aura

$$N(\bar{x}) = \Gamma \bar{x} \tag{II.34}$$

Puisque on a  $N(\bar{x})$  comme décrit dans la forme II.34, s'il y a absence de défaut  $N(\bar{x}) = 0$  donc le  $\xi = 0$  on voit bien l'aspect FDI

## II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a pu englober la technique de commande par mode glissant appliqué à une commande tolérante aux défauts implicite

**Chapitre III**    *Test de robustesse de la  
commande*

### III.1 INTRODUCTION

Après avoir synthétisé la commande tolérante aux défauts implicite dite robuste, on implémente le code sur Matlab et effectue les différentes simulations que peuvent se produire. Afin de voir si on peut valider la commande ou pas. Durant ce chapitre, nous allons parler de la commande et le rejet de l'effet du défaut. Sans oublier les changements paramétriques de la matrice  $S$  qui est mis en place pour mieux modéliser le cas réel. (17)

### III.2 SIMULATION AVEC PRESENCE DE DEFAUT

Après avoir modélisé le système, on passe la simulation de ce dernier avec les paramètres qu'on trouvera attaché dans l'annexe 1

Dans la figure suivante on va montrer le terme additif qu'on ajoute aux courants statorique.

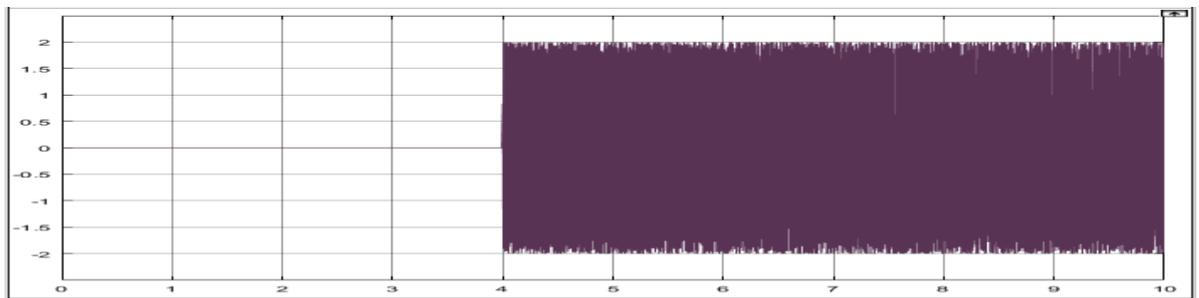


Figure III-1 : l'allure du défaut injecté(A)

Dans ce qui va suivre on va Visualiser seulement que les grandeurs suivante les courant  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  puis la première surface de glissement pour voir l'évolution de la puissance puis la deuxième surface pour voir la puissance réactive.

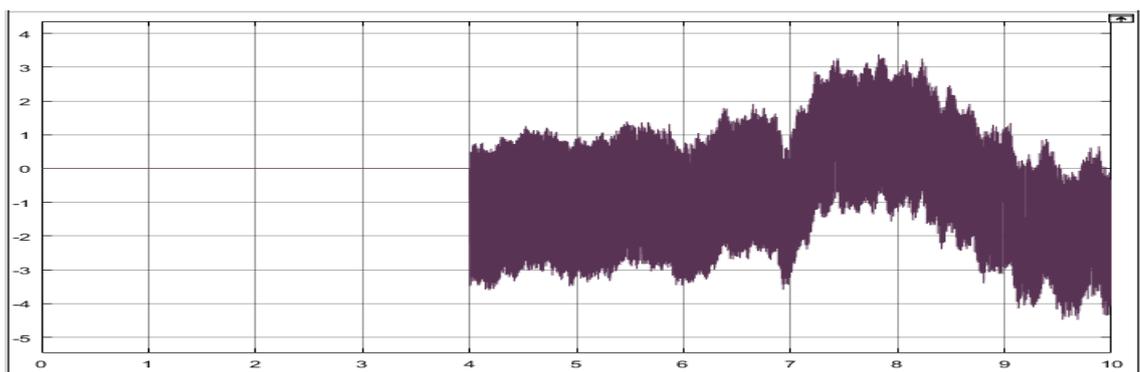


Figure III-2 :  $i_{sd}$  avec présence d'un défaut(A)

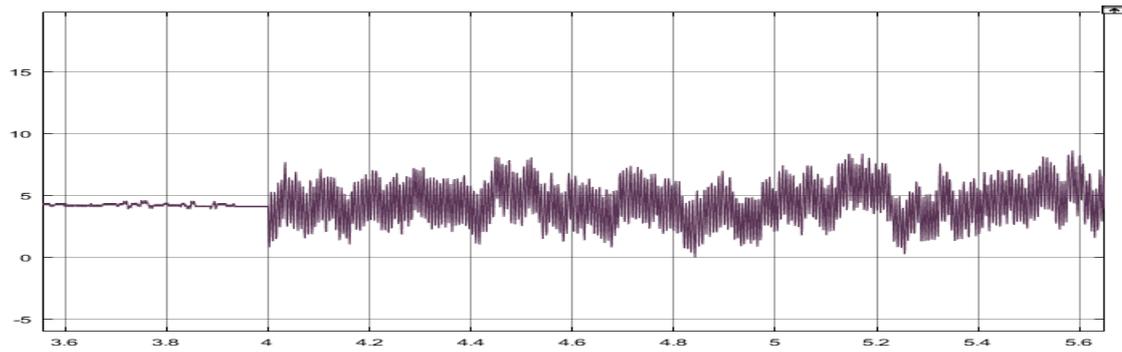


Figure III-3 : Isq avec présence de défaut(A)

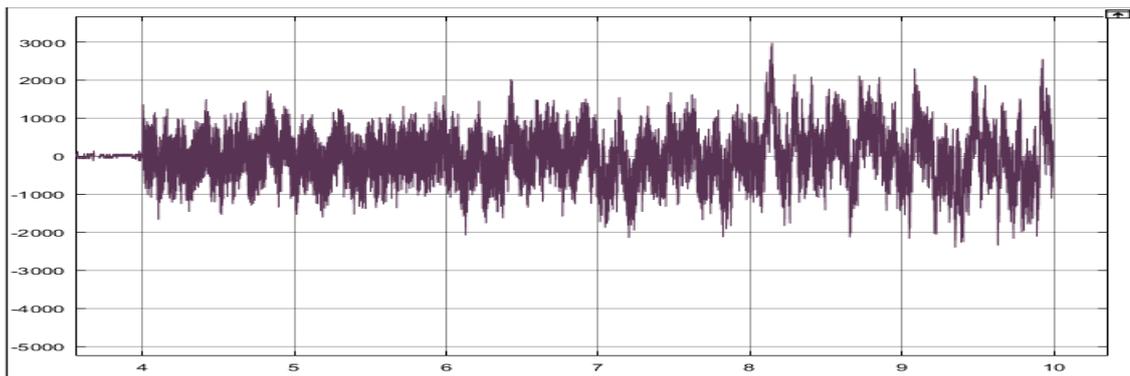


Figure III-4 : l'erreur entre la puissance active et la puissance référence(W)

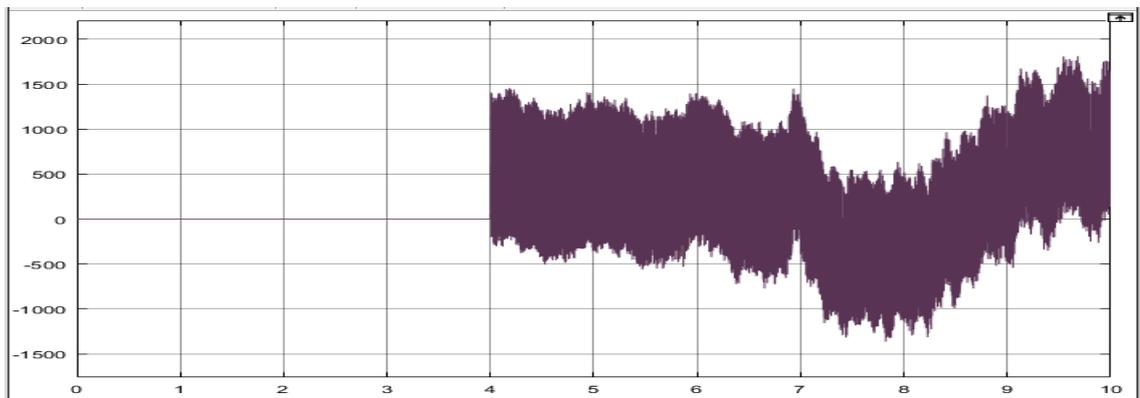


Figure III-5 : l'erreur de la deuxième surface (VAr)

Même si l'amplitude du défaut est de l'ordre de quelque Ampère seulement elle prend se répercute sur les puissances active et réactive jusqu'à atteindre 1500 Var pour la puissance active la fluctuation est de l'ordre de 2000 W

### III.3 SIMULATION DU SYSTEME AVEC DEFAUT ET COMMANDE

Même chose, on introduit le défaut à la seconde 4 et que la commande est appliquée à la seconde 6

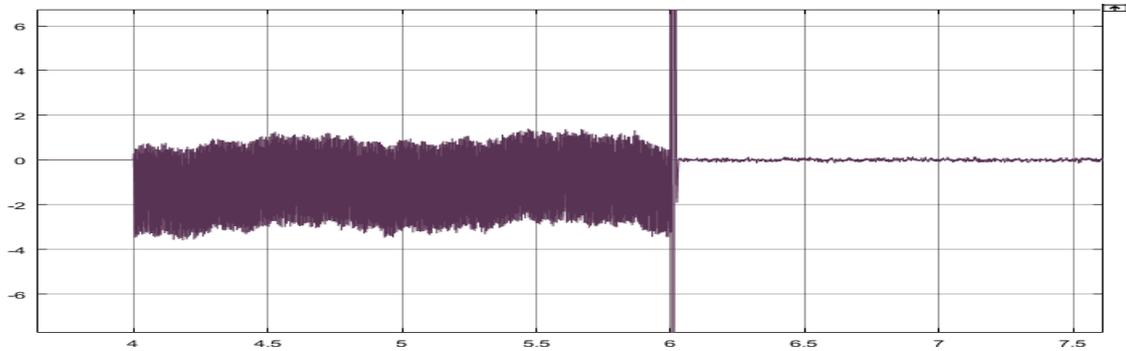


Figure III-6:  $I_{sd}$  avec présence d'un défaut avec commande additive(A)

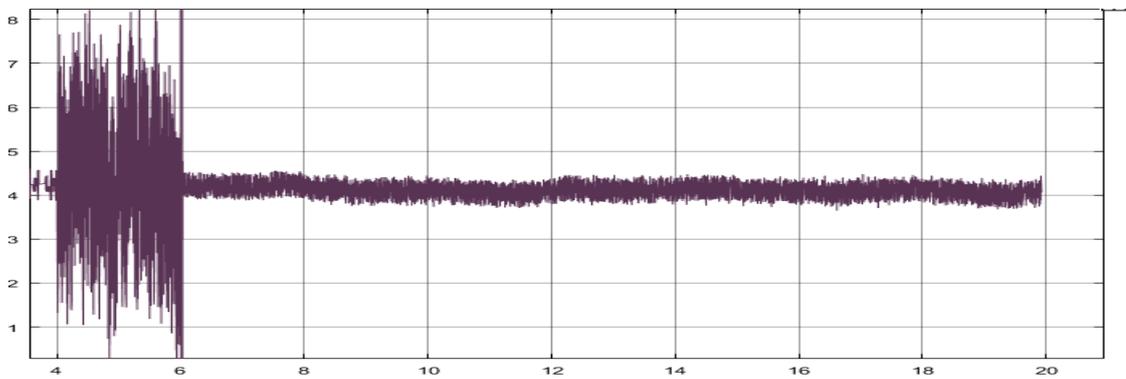


Figure III-7 :  $I_{sq}$  avec présence d'un défaut avec commande additive(A)

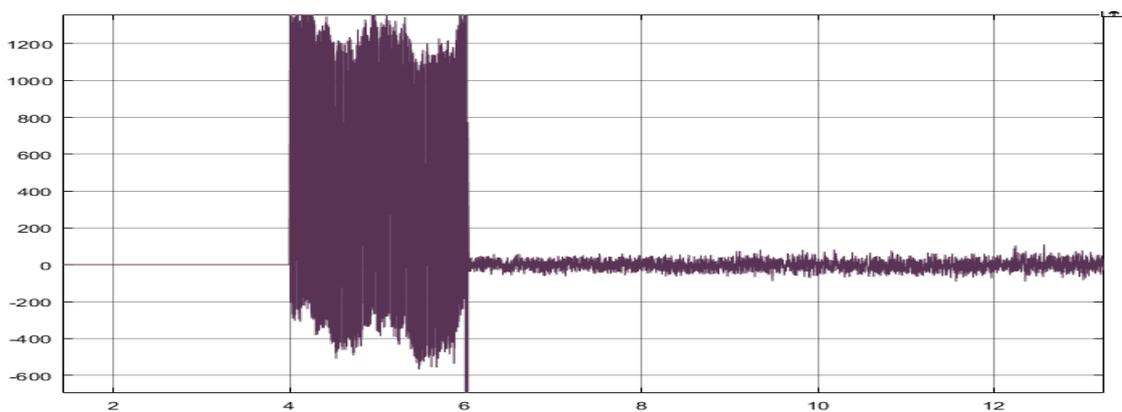


Figure III-8 :  $Q$  en avec une présence d'un défaut avec commande additive(Var)

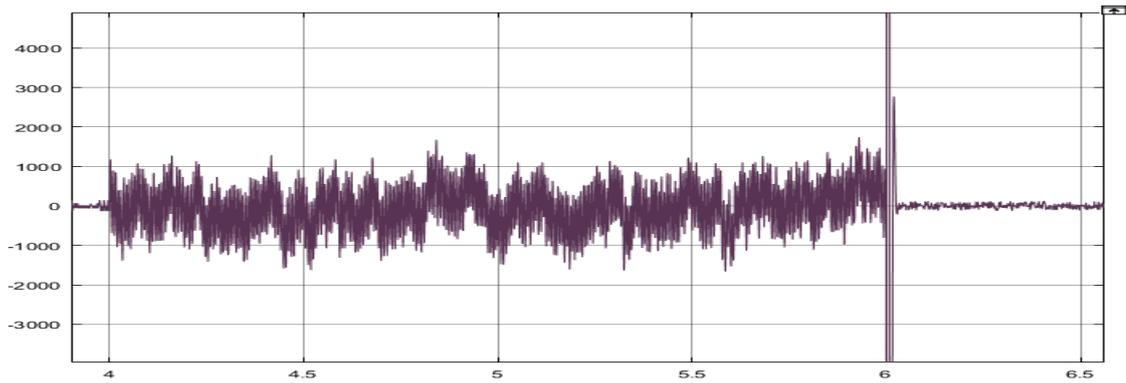


Figure III-9: l'erreur de la surface  $S1$  avec présence d'un défaut avec commande additive( $W$ )

### III.4 SIMULATION DU SYSTEME AVEC VARIATION PARAMETRIQUE DE LA DYNAMIQUE DE L'ERREUR

Maintenant testons sa robustesse vis-à-vis les paramètres de la perturbation, donc dans la matrice du système exogène vont changer sans pour autant changer la dynamique du système et on trouve :

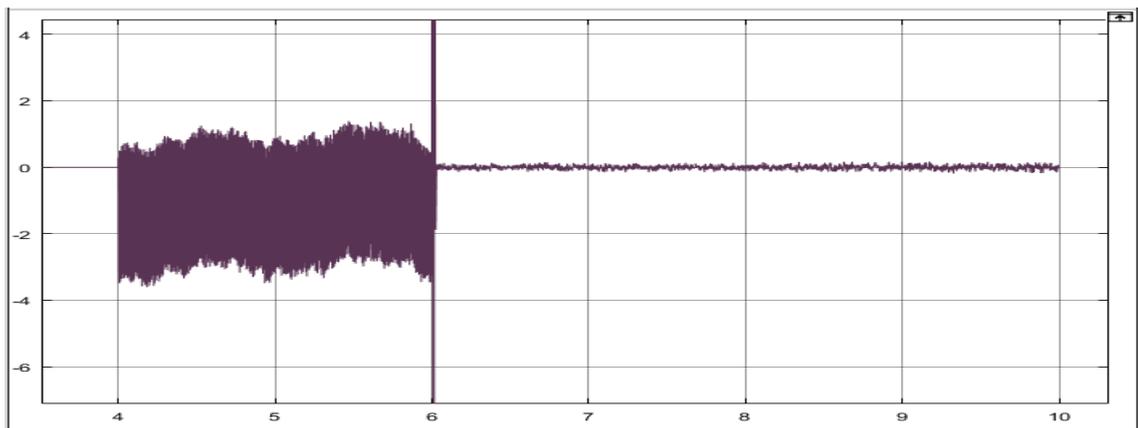


Figure III-10 :  $Isd$  issue d'un exo-système biaisé( $A$ )

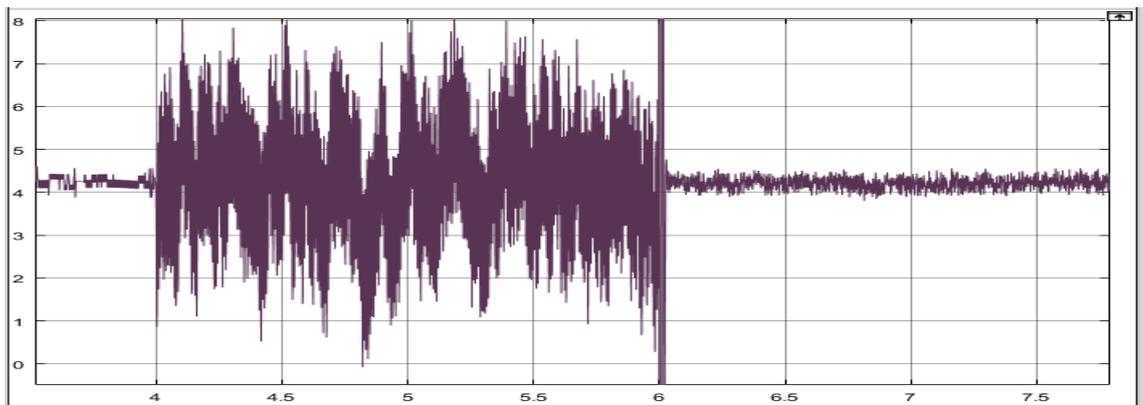


Figure III-11 :  $Isq$  issue d'un exo-système biaisé

On voit bien même si la fréquence du défaut n'est pas vraiment égale à fréquence étudié, seulement la commande peut compenser même si l'exo-système est biaisé. La fréquence choisit est de 25% de la fréquence théorique. Et a 25% de tolérance l'objectif est plus qu'atteint

## *CONCLUSION GENARALE*

L'objectif principal de ce travail était d'élaborer une commande tolérante aux défauts implicite robuste utilisé pour une compensation des effets des défauts d'une machine asynchrone doublement alimenté servant de génératrice dans une chaine éolienne.

Pour ce faire, nous avons d'abord commencé par donner un rappel sur la modélisation et faire apparaitre quelques notions relatives à la machine. Puis nous avons parlé de la commande nominale appliquée, et des surfaces de glissement utilisé afin de contrôler la machine d'un point de vu puissance qu'elle active ou réactive. Et notre choix pour les modes glissants n'est pas juste des notions qu'on a appliqué, mais il représente des qualités robustes par construction. Puis on s'est focalisé sur les défauts des machines tournantes, en précisant leur effet sur le spectre du courant statorique étant donné qu'on a choisi cette méthode de diagnostic point la des défauts car elle se fait sur des signaux disponibles à la mesure et elle contient des informations sur la majorité des défauts.

On s'est basée sur les résultats de l'étude du spectre du courant statorique pour régénérer l'effet des défauts de la machine sur ces derniers via un exo-système, Nous avons constaté que de tels défauts ne peuvent pas être rejeté par la commande nominale, aussi leur présence dégrade fortement la qualité de l'énergie produite et à long terme causera la destruction de la génératrice. Donc, nous avons une commande tolérante au défaut implicite et robuste par construction qui est elle aussi par mode glissant afin d'augmenter la robustesse globale de la commande.

Puis on a trouvé que la commande est robuste et admet un biais de 25% de la fréquence du défaut. On a fini ce travail par une commenter les résultats obtenue de la simulation.

## BIBLIOGRAPHIE

(1)	<i>survey of failures in wind power systemsn with focus on swedish wind power plants during 1997-2005.</i> <b>Bertling, J. Ribrant and L.</b> 2007, IEEE trans on energy conversion, pp. 167-173.
(2)	<b>Ramahaleomiarantsoa, FJ.</b> <i>Diagnostic des systemes à énergies renouvelables de type éolien.</i> 2013.
(3)	synthèse des differents défauts de la machine asynchrone. <i>electronique.</i> [Enligne]16fevrier 2011.  <a href="http://electronique1.blogspot.com/2011/02/synthese-des-differents-defauts-de-la.html">http://electronique1.blogspot.com/2011/02/synthese-des-differents-defauts-de-la.html</a> .
(4)	<b>Casimir, R.</b> <i>diagnostic des défauts des machines asynchrone par reconnaissance des formes.</i> Lyon, France : s.n., 2003.
(5)	<i>DFIG-based wind turbine fault diagnosis using a specefic discrete wavelet transform.</i> <b>Al-Ahmar, Benbouzidi, Amirat and Ben Elghalil.</b> 2008. 2008 International conference on electrical machines.
(6)	<i>Reliability of faut tolerant control systems.</i> <b>Wu. Orlando,</b> USA : Processing of the 40th IEEE conference on decision and control, 2001.
(7)	<i>Reconfigurable contol system design via perfect model-following.</i> <b>PJ.Antsaklis, Z.Gao and.</b> New Orleans : s.n., 1991
(8)	<i>Fault tolerant control: the pseudo-inverse method revisited.</i> <b>Staroswjecki, M.</b> 2005.
(9)	<b>Maciejowski, JM.</b> Modeling and predictive controle : Enabling technologies For reconfiguration. <i>annual reviews in control.</i> 23, 1999.
(10)	<b>Rodrigues, M.</b> <i>Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqué aux systèmes décrits pas des multi-modèles linéaire.</i> 2005.

(11)	<b>Metatla, S.</b> <i>optimisation et régulation des puissances d'une éolienne a base d'une MADA.</i> 2009.
(12)	<i>semiglobal nonlinear outpout regulation with adaptativen internal model.</i> <b>Isidori, Serrani A.</b> Sydney, Australia : 39th IEEE conference on decision ans control, 2000.
(13)	<i>Implicit Fault Tolerant Control: application to induction motors.</i> <b>C. Bonivento, L. Marconi, A. Paoli, C. Rossi.</b> s.l. : IFAC, 2002.
(14)	<b>Chakir, M.</b> <i>Commande robuste tolérante aux défauts application à la MSAP.</i> ALGER : s.n., 2006.
(15)	<b>Meloul, A.</b> <i>Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone a double alimentation d'une éolienne.</i> 2011.
(16)	<b>TRAJIN, Baptiste.</b> <i>Analyse et traitement des grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécanique dans les entrainement electriques.</i> Toulouse : s.n., 2009.
(17)	<b>Zekrifa, A.S Takherist, M</b> « modélisation de la chaine éolienne et commande tolérante aux défauts » Alger 2016

## ANNEXES

### PARAMETRES DE LA CHAINE EOLIENNE

#### Caractéristiques de la MADA

- Puissance nominale :  $P_n = 2(\text{KW})$
- Nombre de paire de pôle :  $P = 2$
- Résistance statorique :  $R_s = 1.8(\text{O})$
- Inductance statorique :  $L_s = 0.072(\text{H})$
- Résistance rotorique :  $R_r = 1.8(\text{O})$
- Inductance rotorique :  $L_r = 0.071(\text{H})$
- mutuelle inductance :  $M = 0.07(\text{H})$

#### Caractéristiques du réseau

- Tension d'alimentation :  $220/380(\text{V})$
- Fréquence du réseau :  $f = 50$

#### Caractéristiques de la turbine

- Nombre de pâles : 3
- Inertie totale :  $J_{in} = 0.5(\text{Kg.m}^2)$
- Rayon de la turbine :  $R = 1.2(\text{m})$
- Gain du multiplicateur :  $G = 7$