

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

Master Académique en Automatique
Option Commande des Systèmes

THÈME

*Diagnostic de défauts à base
d'observateurs : Application à la
Machine Asynchrone*

Dirigé par :

- *Mr : DJENNOUNE Said*
- *Melle : ALLALOU Amina Nasrine*

Présenté par :

AOUCHICHE Salem

Soutenu le : 14 / 11 / 2012.

Promotion 2012

REMERCIEMENTS

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour le Professeur DJENNOUNE Saïd pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour son suivi et l'aide précieuse qu'il m'a apporté tout au long de ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce projet de fin d'étude.

Mes sincères remerciements s'adressent à tous les membres du laboratoire L2CSP et du département d'Automatique pour leur accueil et leur sympathie, particulièrement à Mrs A. Maldi, R. Mansouri, H. Oubabas et Melle N. Djeghali.

Je tiens à remercier ma Co-directrice Melle Amina ALLALOU pour sa gentillesse et sa disponibilité, et à l'aide précieuse qu'elle m'a porté ainsi que le suivi tout au long du stage, je tiens à remercier également tous les membres de la Division Physique Applications Nucléaires du Centre de Recherche Nucléaire de Draria pour leurs accueil en particulier Mr M. Allek, le directeur de division et Mr S. Mazidi le chef de département.

Je tiens à remercier mes amis(es) pour leurs soutiens et pour toute l'attention qu'ils ont su me prodiguer lorsque j'en avais besoin.

Je tiens à remercier toute la promotion Académique en Automatique 2012 pour leurs aides et pour les bons moments passés ensemble.

Je tiens enfin à remercier ma famille : Mes frères et mes sœurs, Mahdi, Rabia, Rachid, Souhila et Lounis dont je suis très fier, mon père et ma mère qui m'ont toujours gardé leur amour, leurs encouragements, que dieu garde mes parents l'un pour l'autre.

DEDICACES

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à

Ma chère mère

Mon cher père

Mes sœurs Rabia et Souhila

*Mes frères Mahdi, Lounis, Rachid et sa femme Esméralda et leurs enfants Tony et
Cristiana*

Mes tantes et mes oncles

Mes collègues et mes amis (es)

Résumé

Les installations technologiques utilisent de plus en plus la machine asynchrone du fait de sa robustesse, sa puissance massique et son coût. Comme il est important de diagnostiquer de manière précoce les défauts qui peuvent affecter cette machine des approches de détection, de localisation et d'identification de défauts ont été développées ces dernières décennies. Notre travail consiste à accomplir cette tâche en mettant en œuvre des observateurs par modes glissants.

Mots clés :

Machine asynchrone, défauts, perturbation, diagnostic, observateur, modes glissants.

Liste des figures.

Figure I.1 : les différents défauts agissant sur le système.....	8.
Figure I.2 les étapes de diagnostic.....	12
Figure I.3 : La difficulté de localiser des défauts.....	14
Figure I.4 : Détection et localisation des défauts.....	16
Figure I.5 : Génération de résidus par estimation paramétrique.....	17
Figure I.6 : génération de résidus.....	20
Figure I.7 : structure de résidus directionnels.....	21
Figure I.8 : illustration des propriétés d'une table de signatures.....	22
Figure II.1 : Principe de la méthode à base d'observateur par modes glissants, Proposée pour la génération des résidus.....	38
Figure II.2 : structure d'observateurs généralisés.....	41
Figure II.3 : structure d'observateurs dédiés.....	42
Figure III.1 : Evolution des courants statorique à vide.....	49
Figure III.2 : Flux rotorique à vide.....	50
Figure III.3 : Evolution de la vitesse de rotation.....	50
Figure III.4 : Evolution des courants statorique en charge.....	51
Figure III.5 : Flux rotorique avec la charge.....	52
Figure III.6 : Evolution la vitesse de rotation de la MAS en charge.....	52
Figure III.7 : Courant statorique sur alpha et son estimé.....	57
Figure III.8 : Courant statorique sur beta et son estimé.....	57
Figure III.9 : Flux rotorique sur alpha et son estimé.....	57
Figure III.10 : Flux rotorique sur beta et son estimé.....	58
Figure III.11 : La vitesse de rotation et son estimé.....	58
Figure III.12 : Résidus en absence de défauts et de perturbation.....	58
Figure III.13 L'apparition d'un défaut au niveau de la résistance statorique.....	59
Figure III.14 L'apparition d'un défaut au niveau de l'inductance statorique.....	60
Figure III.15 L'apparition d'un défaut au niveau de la résistance rotorique.....	60
Figure III.16 L'apparition d'un défaut au niveau de l'inductance rotorique.....	61
Figure III.17 L'apparition d'une perturbation du couple résistant.....	61
Figure III.18 L'apparition d'une perturbation sur la friction.....	62
Figure III.19 l'apparition d'une perturbation sur l'inertie.....	62
Figure III.20 : Courant statorique I_{ds} et son estimé.....	67
Figure III.21 : Courant statorique I_{qs} et son estimé.....	68
Figure III.22 : Flux et son estimé.....	68
Figure III.23 : La vitesse de rotation.....	68
Figure III.24 : Premier défaut et son estimé.....	69
Figure III.25 : Deuxième défaut et son estimé.....	69

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic.....	5
1. Introduction	5
2. Intérêt et objectifs du diagnostic.....	6
3. Généralités et Définitions	6
3.1 Les termes utilisés en diagnostic	6
3.2 Types de défauts	7
a) Défauts actionneurs.....	8
b) Défauts capteurs	8
c) Défauts systèmes	9
d) Défauts à effets additifs	9
e) Défauts à effets multiplicatifs	9
3.3 Modélisation des défauts.....	9
3.4 Modélisation en présence des perturbations.....	10
4. Principe du diagnostic des défauts	11
4.1 Acquisition de données.....	13
4.2 Détection.....	13
4.3 Localisation	13
4.4 Identification.....	14
5. Classification des méthodes de diagnostic	15
5.1 Méthode quantitative	15
5.1.1 Principe de méthode quantitative	15
5.1.2 Méthode de diagnostic basée sur les observateurs	16
5.1.3 Méthodes d'estimation paramétrique	16
5.1.4 Méthode basée sur l'espace de parité.....	18
5.2 Méthode qualitative	18
5.2.1 Diagnostic par reconnaissance des formes.....	18
6. Principe de génération de vecteur de résidus pour la détection et la localisation des defaults..	19
6.1 Méthodologie générale pour la génération de vecteur résidu Pour un système linéaire :..	20
6.2 Evaluation des résidus	21
1. Résidus directionnels	21

2. Résidus structuré	22
Conclusion.....	23
Chapitre II : Observateurs dédiés au diagnostic	25
1. Introduction	25
2. Observabilité des systèmes non linéaires.....	25
2.1 Observabilité au sens du rang.....	26
3. Observateurs dédiés au diagnostic de défauts.....	27
3.1 Observateur des systèmes linéaires	27
3.1.1 Observateurs par mode glissants d'Edwards, Spurgeon et Patton	27
3.1.2 Observateur de Luenberger généralisé.....	29
3.2 Observateur des systèmes non linéaires	31
3.2.1 Observateurs à modes glissants.....	33
3.2.2 Observateurs par mode glissants de Walkat-Zak pour les systèmes non linéaires	37
3.2.3 Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes.....	38
4. Génération des résidus à l'aide d'observateurs.....	39
4.1 Découplage :	40
4.2 Structuration des résidus	40
4.2.1 Structure d'observateurs généralisés (Generalized.....	41
4.2.2 Structure d'observateur dédié.....	42
5. Conclusion.....	42
Chapitre III : Application du diagnostic de défauts sur la MAS.....	44
1. Introduction	44
2. Généralités sur la machine asynchrone.....	44
2.1 Définition	44
2.2 Description de la M.A.S Triphasée	45
3. Défauts de la machine asynchrone.....	45
3.1 Modèle de la machine asynchrone.....	46
3.2 Modélisation de la MAS dans le repère de Park :.....	46
3.3 Simulation de la machine asynchrone saine en boucle ouverte	49
3.3.1 Résultats de simulation de la machine asynchrone à vide ($C_r=0$)	49
3.3.2 Résultats de simulation de la machine asynchrone en charge ($C_r \neq 0$ à $t > 0.5s$) ..	51
4. Modélisation de la machine asynchrone en vue de son diagnostic	53
5. Application des méthodes à base d'observateurs par modes glissants pour la détection et localisation des défauts de la MAS	55

5.1	Observabilité de la machine asynchrone.....	55
5.2	Synthèse d'un observateur par mode glissants avec un capteur de vitesse pour MAS	55
5.3	Résultats de simulation en absence de défauts et de perturbation.....	57
5.4	Résultats de simulation en présence de défauts et absence de perturbations	59
5.5	Présence de perturbation	61
6.	Détection et reconstruction de défauts en utilisant un observateur par modes glissants [23] ...	64
6.1	Reconstruction des défauts	65
6.2	Analyse de la convergence de l'observateur	66
6.3	Résultats de simulation de la machine asynchrone dans le repère (d-q) par application de l'observateur par modes glissants	67
7.	Conclusion.....	71
	Conclusion générale.....	73
	Annexe I :	I
	Reference.....	7

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nos jours, le plus grand souci de l'industrie est le rendement (gain en productivité et en qualité de production). Mais quand on dit "rendement" on dit sûreté, bon fonctionnement et sécurité des dispositifs. Cette dernière condition est la principale préoccupation des industriels, car elle ne garantit pas seulement la protection des équipements industriels mais aussi, celle des personnes et de l'environnement.

La fonction de diagnostic consiste à détecter un défaut, de localiser son origine et de déterminer ses causes. Son principe général consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance dont on dispose sur son fonctionnement normal et anormal. Plusieurs chercheurs ont abordé la thématique de la surveillance industrielle et du diagnostic [2],[4],[5],[10],[12],[18]. Les approches de diagnostic développées durant ces dernières années peuvent être classées en deux grandes catégories : les approches avec modèles qui se basent sur l'existence d'un modèle du système à surveiller et les approches sans modèles qui se basent sur l'analyse des variables de surveillance et sur l'expertise humaine. Le principe des méthodes avec modèles repose sur la comparaison du comportement prévu par le modèle avec le comportement réellement observé du système.

L'automatisation des installations industrielles vise à augmenter la productivité des systèmes et à réduire les coûts de la maintenance des équipements de production. Ainsi, il est nécessaire de disposer d'une fonction permettant le diagnostic des défaillances pouvant affecter le fonctionnement du système. Ceci permet d'envisager des actions correctives pour que ce dernier retourne à son fonctionnement nominal ou à un fonctionnement dégradé. Un module de diagnostic est nécessaire, non seulement pour maintenir les performances et la productivité des systèmes, mais également pour limiter les conséquences des pannes qui peuvent être catastrophiques sur le plan des biens et des vies humaines.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres:

Le premier chapitre présente les différentes méthodes de diagnostic (FDI :Fault Detection and Isolation), la catégorisation des défauts, leurs modélisation, ainsi que la classification des méthodes de diagnostic : méthodes à base des modèles mathématiques faisant appel aux méthodes d'estimation d'état, estimation paramétrique et espace de parité, ainsi que les méthodes à base des modèles qualitatifs lesquelles sont basées sur des connaissances heuristiques du système et de son environnement ainsi que sur l'expertise humaine.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes à base de modèles analytiques plus particulièrement aux méthodes à base d'observateurs pour les systèmes linéaires et non linéaires, mais un intérêt particulier est porté aux observateurs par modes glissants.

L'application de deux approches de diagnostic à base d'observateurs par modes glissants à la machine asynchrone est présentée au troisième chapitre. Après la présentation et la modélisation de la celle-ci, il est question de tester les performances de ces deux méthodes pour la détection, la localisation et l'estimation des défauts.

Finalement, la conclusion récapitule le travail développé, commente les résultats trouvés et indique les perspectives de recherche ouvertes par cette étude.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic

1. Introduction

Un processus technologique conçu pour réaliser une tâche bien précise peut évoluer sous différents modes de fonctionnement, nous citons : les modes normaux (tels que le mode nominal), les anormaux (tels que les modes défaillants). Effectuer un diagnostic consiste à identifier le mode de fonctionnement en comparant l'information instantanée issue des processus à la connaissance à priori disponible. Toute déviation non permise du comportement normal doit être détecté et son origine localisée de manière à prévenir la défaillance avant qu'elle n'arrive et ainsi de mettre en place très tôt les actions correctrices nécessaires pour le retour à la normale.

Du fait de la variété des systèmes et des défauts à diagnostiquer ainsi que l'hétérogénéité des informations disponibles, diverses approches ont été développées pour la détection et la localisation des défauts. Ces approches peuvent être classées selon la disponibilité d'un modèle à surveiller. Dans le cas où le modèle n'est pas disponible, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes. Dans le deuxième cas, les redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle sont utilisées pour caractériser le mode de fonctionnement du système. Des signaux indicateurs de défauts nommés résidus, sensibles aux différents types de défauts, doivent être générés. Ils doivent contenir suffisamment d'information pour que soit possible la localisation d'un ou plusieurs défauts ; de plus ils doivent être insensibles aux perturbations. L'évaluation de ces résidus permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non [4],[5],[7],[8],[9],[10],[11].

2. Intérêt et objectifs du diagnostic

Dans le domaine de l'industrie et de la production industrielle le champ de la compétitivité repose sur plusieurs critères de performance, de robustesse et de qualité. Mais malgré toutes les assiduités pour l'établissement de ces conceptions, les défaillances de celles-ci se font fréquentes et peuvent résulter soit d'une fin de cycle de vie d'un élément et aussi de l'apparition soudaine d'une panne brusque. Alors que ces éléments de production représentent pour la plupart du temps des enjeux majeurs soit à buts lucratifs (ex : chaîne de production dans une usine) ou pour assurer un service (ex : un scanner dans un hôpital). Elles peuvent aussi toucher à un élément des plus importants qui représente la sécurité matérielle, environnementale, et même humaine. Pour éviter des conséquences irréversibles, des méthodes de supervision et de surveillance ont été mises en place et qui reposent toutes sur le diagnostic des systèmes.

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Plus généralement, le diagnostic apporte une contribution à la solution de détection et de localisation d'un mauvais fonctionnement.

3. Généralités et Définitions

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels.

3.1 Les termes utilisés en diagnostic

D'après Zwingelstein [4] les définitions de ces caractéristiques sont :

- **la fiabilité** : c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.
- **la disponibilité** : c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.
- **la sûreté** : c'est l'aptitude d'un système à respecter l'utilisateur et son environnement.

Les systèmes industriels sont souvent soumis à des anomalies ou des changements inattendus, qui entraînent un mauvais fonctionnement. Par rapport aux performances du système, trois types d'anomalies sont à considérer [5] :

❑ **Erreur :**

Tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle.

❑ **Défaut :**

L'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction(s) requise(s) avec des performances définies dans les spécifications techniques.

❑ **Défaillance :**

L'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. Les informations issues de capteurs du système sont utilisées pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Si le système fonctionne correctement et en l'absence de bruit ou d'erreurs de modélisation, la valeur du résidu est égale à zéro. Cette valeur reflète l'effet des défauts dans le système.

3.2 Types de défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Ils peuvent être purement aléatoires (défauts cataleptiques), ou progressifs dans le cas du vieillissement ou de l'usure (défauts évolutifs). Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation :

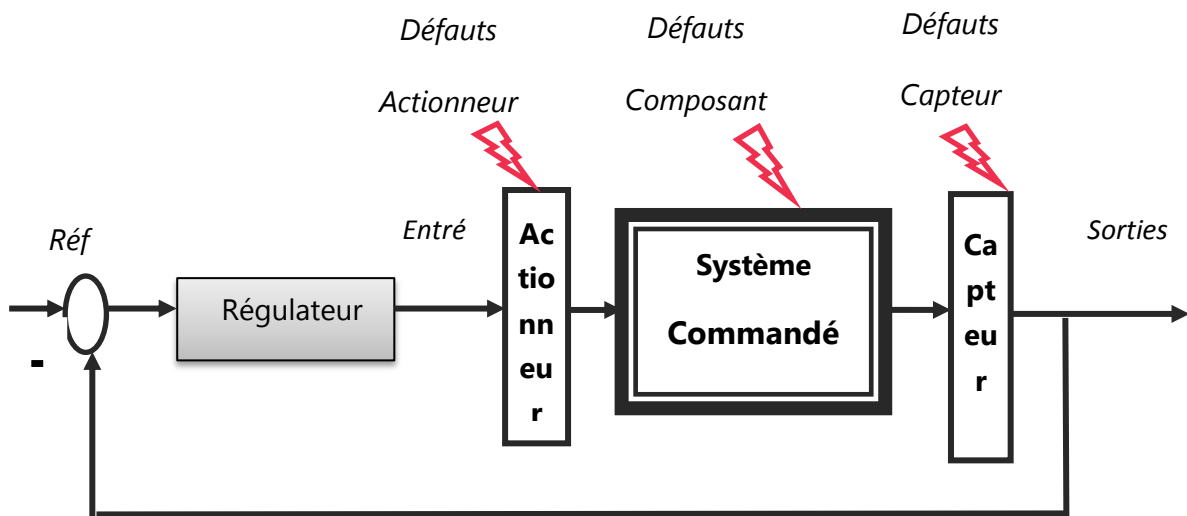


Figure I.1 : Différents défauts agissant sur le système.

a) Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des défauts d'actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système.

b) Défauts capteurs

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

c) Défauts systèmes

Ce type de défaut provient du système lui-même; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut à la catégorie des défauts capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche.

d) Défauts à effets additifs

Ils correspondent à des entrées inconnues agissant sur le système, et les sorties de ce système varie indépendamment des entrées connues.

e) Défauts à effets multiplicatifs

Ils correspondent à des modifications des paramètres du modèle représentant le système, ils engendrent des variations des sorties du système dont l'amplitude dépend de la valeur des entrées connues.

3.3 Modélisation des défauts

On considère le modèle linéaire d'un procédé, sa représentation d'état est comme suit : [24]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \dots\dots\dots (I.1)$$

Où $x(t)$ représente le vecteur d'état, $u(t)$ le vecteur de commandes et $y(t)$ le vecteur de sorties système, tels que : $x \in R^n$, $u \in R^m$,et $y \in R^p$,et les matrices A,B et C sont de dimensions respectivement $n \times n$, $n \times m$ et $n \times p$.

Alors les défauts sont modélisés de la manière suivante :

- ❑ Les défauts actionneurs sont modélisés comme des signaux additifs aux signaux d'entrée.
- ❑ Les défauts système ou composants sont modélisés comme une dynamique additionnelle avec une matrice de distribution.
- ❑ Les défauts capteurs sont modélisés par des signaux additifs aux signaux de sortie.

Le système avec défaut se met sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B(u(t) + f_a(t)) + Hf_p(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \dots\dots\dots (I.2)$$

Où $f_a(t)$, $f_p(t)$ et $f_c(t)$ représentent respectivement les défauts d'actionneurs, les défauts composants et les défauts des capteurs, $f_a(t) \in R^{m*1}$, $f_p(t) \in R^{c*1}$ et $f_c(t) \in R^{p*1}$. La matrice H est dite matrice de distribution de $f_p(t)$.

3.4 Modélisation en présence des perturbations

Le système est soumis aux défauts, aux incertitudes de modélisation mais aussi aux perturbations et bruits qui sont la plupart du temps des entrées inconnues, donc le système avec défauts et perturbation se met sous la forme suivante [24] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B(u(t) + f_a(t)) + Hf_p(t) + Ed_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) + d_c(t) \end{cases} \dots\dots\dots (I.3)$$

Où $d_a(t) \in R^{d*1}$, et $d_c(t) \in R^{p*1}$ représentent respectivement les perturbations et les bruits affectant le système. La matrice E est dite matrice de distribution de $d_a(t)$.

Pour des raisons de simplicité, il est préférable de mettre le système précédant sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \end{cases} \dots\dots\dots (I.4)$$

Où $E_f = [BH \ 0_{n*p}]$; $E_d = [E \ 0_{n*d}]$; $F_f = [0_{p*m} \ 0_{p*c} \ I_{p*p}]$; $F_d = [0_{p*d} \ I_{p*p}]$; $d(t) = [d_a \ d_c]^T \in R^q$ et $f(t) = [f_a \ f_c \ f_p]^T \in R^s$. les matrices I_{p*p} et 0_{n*p} sont respectivement la matrice identité de dimension $p \times p$ et la matrice nulle de dimension $n \times p$.

C'est cette dernière modélisation(I.4), qui est généralement prise en compte, dans les problèmes de détection et de localisation des défauts à base d'observateurs.

4. Principe du diagnostic des défauts

Le diagnostic consiste en la détection et l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'outils issues des statistiques, du traitement du signal ou de l'automatique en exploitant un ensemble d'informations.

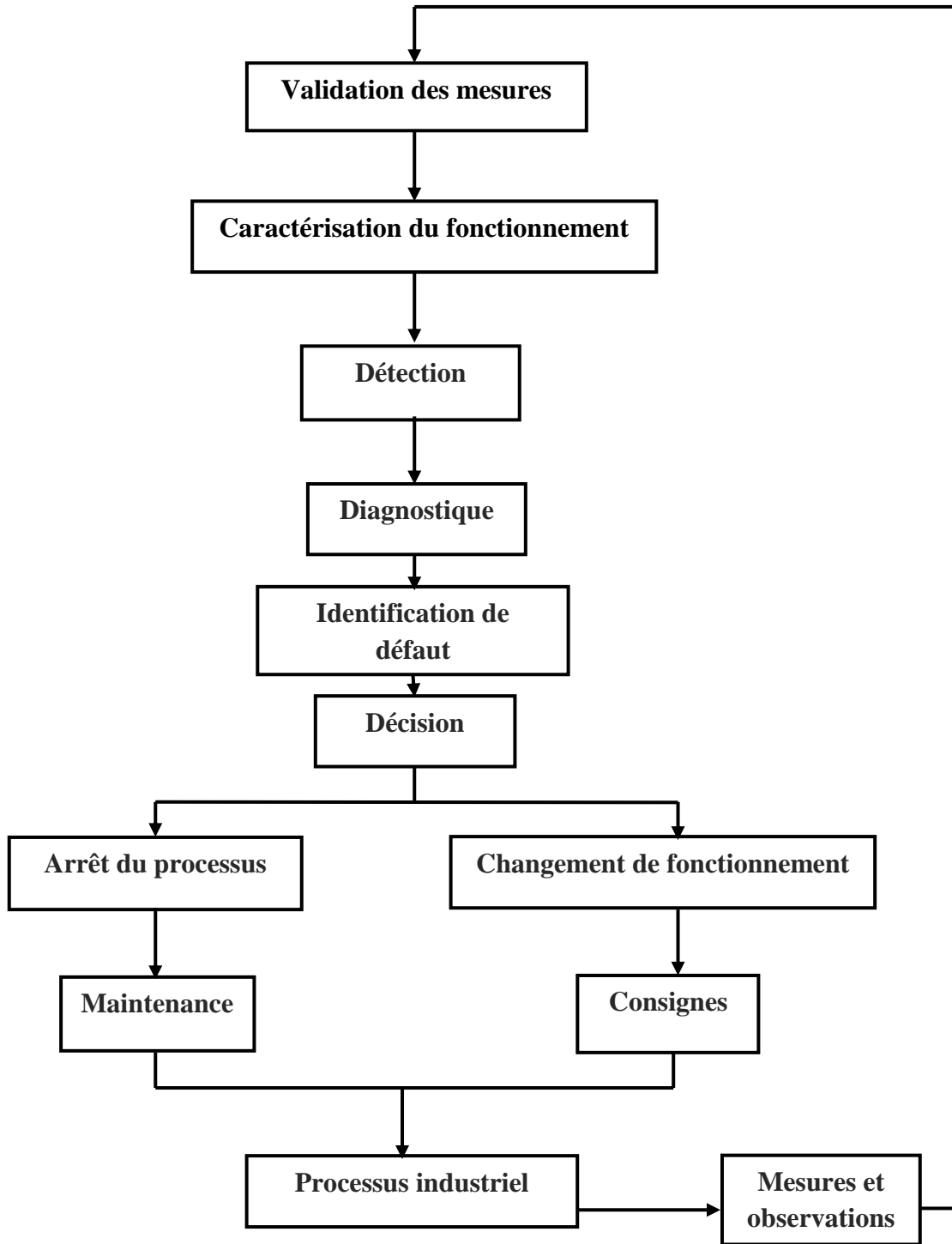
Cette définition résume les deux tâches essentielles en diagnostic :

- Observer les symptômes (indices) de la défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur ces observations

La procédure de diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes :

- ❑ L'extraction des informations à partir de mesures appropriées ou d'observations.
- ❑ La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic
- ❑ La prise de décision

Ces étapes de diagnostic sont résumées dans le schéma suivant :



FigureI.2 Etapes de diagnostic

4.1 Acquisition de données

Cette fonction doit fournir une image du procédé. Les fonctions suivantes doivent être réalisées :

- conditionnement et prétraitement du signal,
- validation du signal de mesure.

4.2 Détection

C'est l'opération qui permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non. La fonction de détection permet de discerner tout écart du système par rapport à son état de fonctionnement normal. Autrement dit, elle permet de déterminer la présence de défauts dans un système.

Les problèmes qui peuvent survenir lors de l'accomplissement de cette tâche sont :

- La fausse détection : conduisant à des arrêts ou des reconfigurations inutiles.
- La non-détection : peut conduire à une panne, intolérable dans les systèmes à haut niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire...)

4.3 Localisation

La localisation suit l'étape de détection ; elle attribue le défaut à un sous-système particulier : capteur, actionneur, organe de commande, processus...

Il s'agit de localiser le sous-système affecté par le défaut détecté, responsable de la défaillance du système. La localisation consiste, en effet, à remonter les symptômes pour retrouver l'ensemble des éléments défaillants. Ce problème est difficile à résoudre. En effet, il est possible de détecter une défaillance, ou une panne, résultant d'un défaut. Par contre, la détermination de son origine reste difficile puisque une panne peut résulter d'un ou plusieurs défauts, comme il est montré dans la figure : I.3.

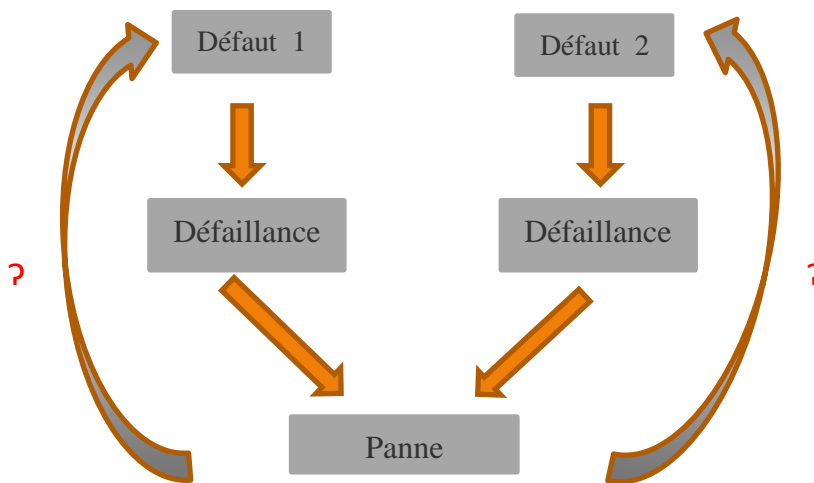


Figure I.3: Difficulté de localiser des défauts

4.4 Identification

L'identification consiste à déterminer la taille, l'amplitude et le comportement temporel du défaut.

5 Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes du diagnostic sont des méthodes modernes, elles permettent d'éliminer la redondance matérielle pour le diagnostic des systèmes industriels. Ces méthodes sont classifiées comme suit :

- Méthode quantitative
- Méthode qualitative

5.1 Méthode quantitative

L'approche à base de modèles mathématiques pour la détection et la localisation des défauts des systèmes industriels a fait l'objet de nombreux travaux durant ces trente dernières années. L'objectif est de fournir quelques outils basé modèle analytique pour la mise en œuvre d'un système de surveillance, destiné à la détection, à la localisation et éventuellement la reconstruction des défauts d'un procédé industriel.

5.1.1 Principe de méthode quantitative

Ce type d'approche, connu sous le nom plus général de redondance analytique, consiste à estimer, à l'aide d'un modèle mathématique du système, les grandeurs mesurées sur celui-ci.

Si le modèle reflète bien le comportement du système sain, tout écart entre les grandeurs estimées et mesurées traduira l'apparition d'un ou plusieurs défauts. Les défauts sont alors détectés par comparaison des résidus à des seuils convenablement choisis [6].

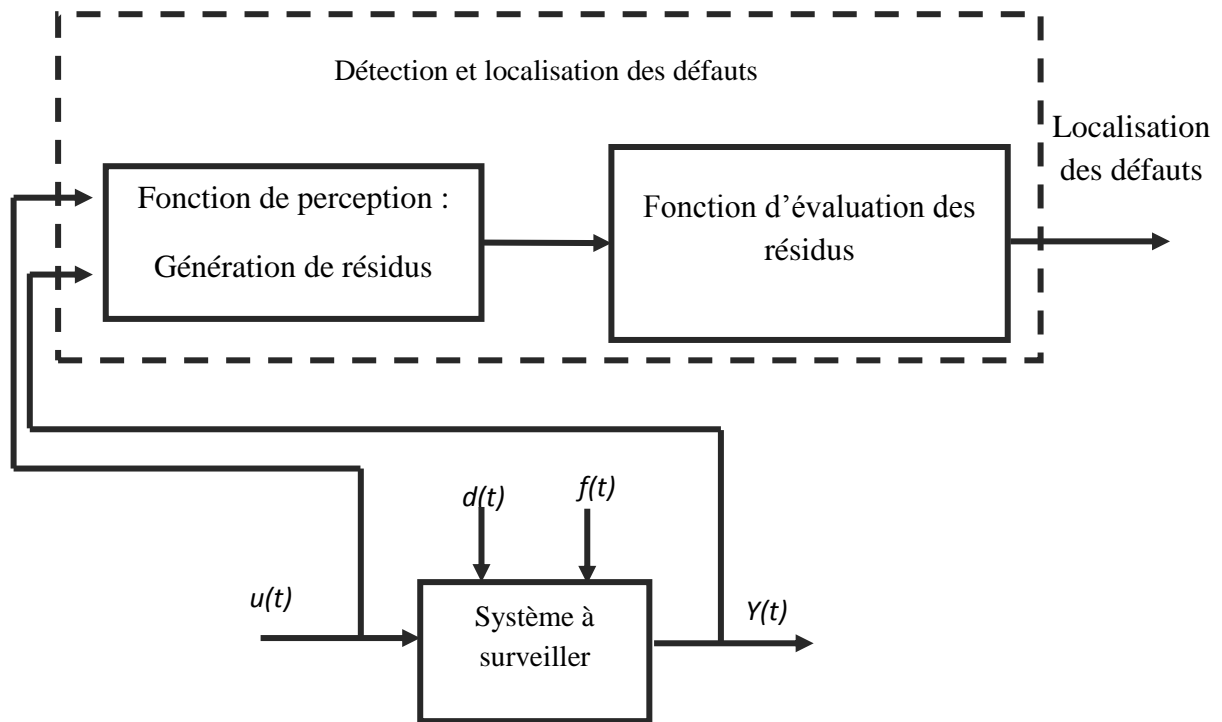


Figure I.4: Détection et localisation des défauts

5.1.2 Méthode de diagnostic basée sur les observateurs

L'idée fondamentale des approches basées sur les observateurs ou filtres est de prédire la sortie du système à partir des variables mesurées (ou une partie de ces variables) tels que par un observateur de Luenberger dans le cadre déterministe ou par un filtre de Kalman dans le contexte stochastique. Un résidu peut être conçu comme l'erreur de sortie pondérée (ou l'innovation dans le cadre stochastique). La flexibilité de ces approches réside dans le choix du gain des observateurs.

5.1.3 Méthodes d'estimation paramétrique

La détection et localisation des défauts peuvent être effectuées par l'utilisation des techniques d'identification, si la structure du modèle est connue [7]. L'idée de base consiste à

estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer à leurs analogues en état normal. On distingue deux approches : [8], [9] :

- Méthodes de l'erreur d'équation.
- Méthodes de l'erreur de sortie.

Pour détection de défauts par la méthode d'estimation paramétrique, on procède par les étapes suivantes :

1. Modélisation mathématique du procédé.
2. Description des relations entre les constantes physiques supposées connues et les paramètres du modèle.
3. Estimation des paramètres du modèle à partir des entrées et sorties du système en absence de défauts.
4. Estimation des paramètres du système en présence de défauts.
5. Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs nominales.

L'apparition d'un défaut au sein du système entraîne une modification de ses caractéristiques physiques d'où résulte une évolution significative des paramètres par rapport à leur valeur nominale autrement dit tout écart notable des paramètres par rapport aux valeurs nominales est révélateur d'un défaut. Le schéma suivant (figure I.5) représente le principe de la généralisation de résidu à partir d'une estimation paramétrique en temps réel des paramètres du système.

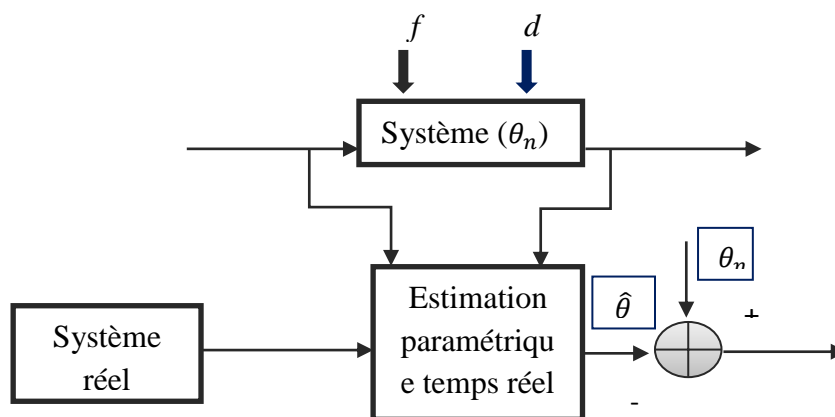


Figure I.5: Génération de résidus par estimation paramétrique.

Où $\hat{\theta}$ représente le vecteur des paramètres issu de l'identification en temps réel et θ_n les valeurs nominales correspondantes.

5.1.4 Méthode basée sur l'espace de parité

L'idée de base de cette méthode est de vérifier la cohérence entre les relations mathématiques du système et les mesures (relations redondance analytique). On suppose qu'une mesure puisse s'exprimer en fonction des autres par une relation connue. La différence entre la mesure et sa valeur calculée à l'aide du modèle est appelée résidu. Alors si le résidu est nul, les mesures sont cohérentes par rapport au modèle, donc le système est déclaré sans défaut. Et dans le cas où le résidu est non nul, indique l'apparition d'un écart, qui veut dire un défaut. Donc la méthode par espace de parité suppose la connaissance d'un modèle mathématique du système.

La redondance est une notion essentielle des techniques de diagnostic. Le terme redondance est utilisé ici pour traduire la possibilité de connaître la valeur d'une variable de différentes manière. On distingue deux types de redondances, la redondance statique et la redondance dynamique.

5.2 Méthode qualitative

Elle intervient en raison de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Dans ce cas, les connaissances utilisables reposent sur le savoir et l'expérience d'opérateur humaine maîtrisant l'installation à surveiller en basant sur des connaissances symboliques et/ou sur un ensemble de données numériques correspondant aux divers modes de fonctionnement de l'installation.

5.2.1 Diagnostic par reconnaissance des formes

La méthode de diagnostic par reconnaissance des formes permet d'associer un ensemble de mesures (continues ou discrètes) effectuées sur le système à des états de

fonctionnement connus. Cette fonction permet d'avoir une relation d'un espace caractéristique vers un espace de décision, de façon à minimiser le risque de mauvaise classification. Trois techniques de reconnaissance des formes sont :

La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la statistique. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance a priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte l'évolution du système. Les deux autres techniques de discrimination reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

➤ **L'avantage principal des méthodes qualitatives:**

Possibilité de n'utiliser que le modèle qualitatif: aucun besoin de grandeurs numériques des paramètres ni de connaissances profondes sur la structure du système.

➤ **Inconvénients**

Il n'est pas aisé de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations. D'autre part un problème combinatoire peut apparaître lors des procédures d'inférences pour les systèmes complexes.

6. Principe de génération de vecteur de résidus pour la détection et la localisation des defaults

Le problème de la détection et localisation des défauts par les méthodes à base de modèle mathématique revient aux problèmes de génération des résidus. La solution dépend de la structure des systèmes ainsi qu'aux types de défauts que l'on désire détecter. Parmi les méthodes les plus utilisées pour la génération des résidus sont cités les observateurs, les approches utilisant l'estimation paramétrique et l'espace de parité.

Le résidu est statiquement nul en absence de défauts et non nul en leur présence. Le résidu nous informe sur l'apparition de défauts et dans certain cas de leurs origines.

6.1 Méthodologie générale pour la génération de vecteur résidu Pour un système linéaire :

La structure typique d'un générateur de résidu :

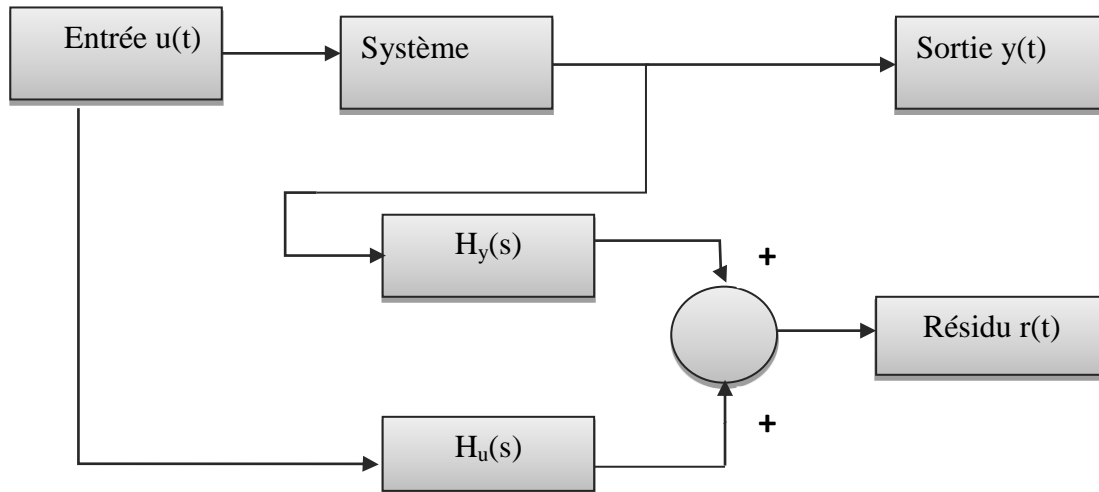


Figure I.6: Génération de résidus

Le système est soumis à une commande $u(t)$ et a des défauts $f(t)$, la sortie peut être écrite en utilisant la transformée de Laplace :

$$y(s) = G_u(s)U(s) + G_f(s)f(s) \dots \dots \dots (I.5)$$

Où $G_u(s)$ et $G_f(s)$ représentent respectivement les transferts sortie/commande et sortie/défauts. Le résidu est défini comme étant égal à :

$$R(s) = H_u(s)U(s) + H_y(s)Y(s) \dots \dots \dots (I.6)$$

D'où le résidu suivant :

$$R(s) = (H_u(s) + H_y(s)G_u(s))U(s) + H_y(s)G_f(s)f(s) \dots \dots \dots (I.7)$$

Comme le résidu doit être nul en absence de défauts, il faut que la condition suivante soit vérifiée :

$$H_u(s) + H_y(s)G_s(s) = 0 \quad \dots\dots\dots (I.8)$$

Par conséquent le problème de génération de résidus revient à la détermination des matrices $H_u(s)$ et $H_y(s)$, telles que la condition (I.8) soit vérifiée. [10]

6.2 Evaluation des résidus

La phase d'évaluation des résidus consiste à déterminer si le système se trouve dans un état de fonctionnement normal ou pas, donc c'est une étape de décision. Il existe deux approches pour la génération des résidus qui sont : résidus directionnels ou résidus structurés.

1. Résidus directionnels

La génération de résidus directionnels consiste à concevoir, pour chaque défaut, des résidus de sorte que leur vecteur reste confiné dans une direction spécifique de l'espace des résidus. En absence de défauts, le module du vecteur résidu est nul. Le problème d'isolation, dans ce cas, consiste à déterminer le défaut dont la direction du vecteur de résidus généré est la plus proche parmi tous les autres défauts. La figure suivante(I.7) illustre ceci.

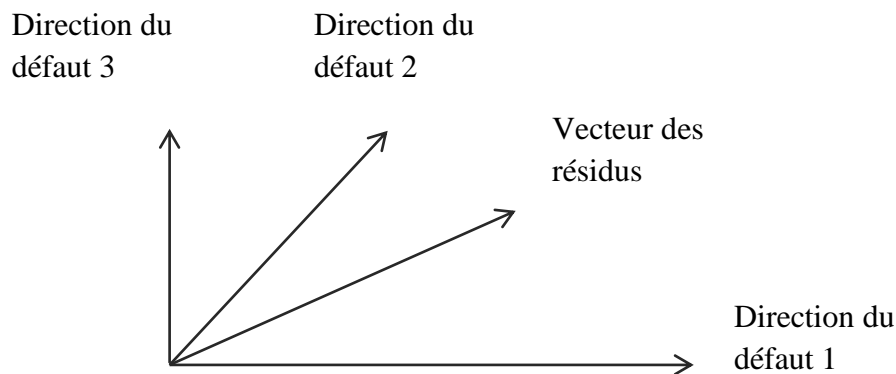


Figure I.7 : Structure de résidus directionnels.

2. Résidus structuré

Les résidus structurés sont conçus de manière à être sensibles à des sous-ensembles de défauts différents et de façon à ce que pour chaque défaut corresponde à un sous ensemble de résidus particulier. Ces ensembles permettent de structurer une table de signature appelée matrice d'incidence. La localisation des défauts est alors facilitée. En effet, les valeurs de résidus sont comparées à chaque instant à des seuils. On distingue trois types de matrices d'incidence:

- ❑ **Matrice d'incidence non-localisante** : une colonne nulle au moins ou bien deux colonnes soient identiques.
- ❑ **Matrice d'incidence faiblement localisante** : les colonnes soient non nulles et distinctes deux à deux.
- ❑ **Matrice d'incidence fortement localisante** : aucune colonne ne puisse être obtenue à partir d'une autre en remplaçant 1 par 0 vice versa.

<i>f1</i> <i>f2</i> <i>f3</i>	<i>f1</i> <i>f2</i> <i>f3</i>	<i>f1</i> <i>f2</i> <i>f3</i>
<i>r1</i> 0 1 0	<i>r1</i> 1 1 0	<i>r1</i> 1 1 0
<i>r2</i> 0 1 1	<i>r2</i> 1 0 1	<i>r2</i> 1 0 1
<i>r3</i> 0 1 1	<i>r3</i> 0 0 1	<i>r3</i> 0 1 1
non-localisante	faiblement localisante	fortement localisante

Figure I.8: illustration des propriétés d'une table de signatures.

Conclusion

Nous avons réalisé dans ce chapitre, une étude sur le diagnostic, qui consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. Les méthodes de diagnostic sont classifiées en deux catégories : les méthodes analytiques à base de modèle quantitatif (mathématique) tel que l'estimation paramétrique, l'espace de parité et l'estimation d'état, et les méthodes symboliques à base de modèle qualitatif par reconnaissance de forme ou traitement du signal par exemple.

Ces méthodes sont utilisées dans le but de la détection et localisation des défauts qui passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation des résidus.

A l'issue de ce chapitre on peut conclure que le problème du diagnostic à base de modèle analytique consiste à :

- Générer des résidus nuls en fonctionnement normal, et sensibles à tout défaut affectant le système à surveiller.
- Analyser ces résidus pour détecter la présence d'un défaut et localiser l'élément défaillant.
- Reconstruire le défaut survenu.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons uniquement aux méthodes analytiques à base d'observateur pour la détection, la localisation et l'estimation des défauts.

Chapitre II : Observateurs dédiés au diagnostic

Chapitre II : Observateurs dédiés au diagnostic

1. Introduction

Pour le problème de la détection et la localisation des défauts à base d'observateurs, on distingue deux méthodes du diagnostic; celles appliquées pour les systèmes linéarisés autour d'un point de fonctionnement, mais vu des erreurs de la linéarisation du système, cette méthode engendre des fausses alarmes. Et celles appliquée directement pour les systèmes non linéaires sauf qu'il n'existe pas de théorie exhaustive pour ce type de système jusqu'à présent.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques observateurs dédiés au diagnostic des systèmes linéaires et non linéaires, mais un intérêt particulier sera consacré aux observateurs par modes glissants connu pour leur robustesse.

2. Observabilité des systèmes non linéaires

Soit un système non linéaire de la forme :

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \dots\dots\dots (II.1)$$

Pour le système (II.1), le rôle d'un observateur consiste à estimer l'état du système $x(t)$ à partir de grandeurs supposées connues : son entrée $u(t)$ et sa sortie $y(t)$.

Un observateur O pour le système (II.1) peut être représenté comme suit:

$$O \quad \dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t)) + k(h(\hat{x}(t)) - y(t)) \dots\dots\dots (II.2)$$

Où k est le gain d'observateur. L'observateur doit vérifier la propriété que l'état estimé converge vers l'état réel.

De façon générale, la propriété structurelle d'un système appelée observabilité est une condition nécessaire à l'existence d'un observateur. Cette propriété étant vérifiée, l'étape suivante consiste à réaliser la synthèse de l'observateur proprement dit.

La notion d'observabilité d'un système non linéaire a été formalisée dans [12], elle peut être définie à partir de la notion d'indistinguabilité d'une paire d'états, au sens où un système sera dit observable si toute paire d'états du système peut être distinguée grâce aux sorties correspondantes, pour au moins une entrée.

L'observabilité pour un système non linéaire est plus compliquée que dans le cas linéaire, il n'existe pas de condition géométrique globale garantissant l'observabilité, cependant, une notion d'observabilité locale faible a été introduite dans [12] et peut être caractérisée par une condition du rang équivalent au cas linéaire.

2.1 Observabilité au sens du rang

Le système décrit par (II.1) est dit localement observable (ou observable au sens du rang), si pour un voisinage de x_0 il existe des entiers non négatifs l_1, l_2, \dots, l_p avec $l_1 + l_2 + \dots + l_p = n$ tels que dans \mathbb{R}^n , la matrice suivante : [12]

$$O = \begin{bmatrix} L_f^0 \left(\frac{\partial h_1(x)}{\partial x} \right) \\ L_f^1 \left(\frac{\partial h_1(x)}{\partial x} \right) \\ \vdots \\ L_f^{l_1-1} \left(\frac{\partial h_1(x)}{\partial x} \right) \\ L_f^0 \left(\frac{\partial h_2(x)}{\partial x} \right) \\ L_f^1 \left(\frac{\partial h_2(x)}{\partial x} \right) \\ \vdots \\ L_f^{l_2-1} \left(\frac{\partial h_2(x)}{\partial x} \right) \\ \vdots \\ L_f^0 \left(\frac{\partial h_p(x)}{\partial x} \right) \\ L_f^1 \left(\frac{\partial h_p(x)}{\partial x} \right) \\ \vdots \\ L_f^{l_p-1} \left(\frac{\partial h_p(x)}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.3)$$

Est non singulière.

Nous rappelons la dérivée de Lie d'une fonction $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ le long d'un champ de vecteurs $f(x) = [f_1(x) \dots f_n(x)]$: $L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h(x)}{\partial x_i} f_i(x)$. De façon récursive nous définissons $L_f^p h(x) = L_f(L_f^{p-1} h(x))$ avec $L_f^0 h(x) = h(x)$

3. Observateurs dédiés au diagnostic de défauts

3.1 Observateur des systèmes linéaires

3.1.1 Observateurs par mode glissants d'Edwards, Spurgeon et Patton

L'idée de conception d'un observateur par mode glissant pour la détection et localisation de défauts pour les systèmes linéaires proposée par Edwards, Spurgeon et Patton [13] est comme suit :

On considère le système linéaire défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_f f_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \dots\dots\dots (II.4)$$

Tels que : $f_a(t) \in R^q$ et $f_c(t) \in R^p$ sont respectivement les vecteurs défauts actionneurs et défauts capteurs.

Pour synthétiser un observateur par mode glissants, l'objectif consiste à reconstruire les états de sorte l'erreur d'estimation de la sortie tend vers zéro. Soit l'observateur suivant :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - G_l e_y + G_n S \dots\dots\dots (II.5)$$

Où G_l et G_n représentent les gains de l'observateur de dimension $n \times p$. S est une fonction discontinue et $e_y = (c\hat{x} - y)$. Supposons, dans un premier temps, le cas où seuls des défauts actionneurs agissent sur le système et que ces derniers vérifient :

$$\|f_a(t)\| \leq \rho(t, y, u) \dots\dots\dots (II.6)$$

$\rho(t, y, u): R \times R^p \times R^m \rightarrow R$ est connue. En supposant que $\rho \geq q$, les conditions d'existence d'un tel observateur, robuste vis-à-vis des défauts $f_a(t)$, sont :

$$C_1 : \text{rang}(CE_1) = q.$$

C_1 : Les zéros invariant de (A, E_f, C) sont stables.

Si la première condition est satisfaite, alors il existe un changement de variables $x \rightarrow Tx$

Tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + E_{f2}f_a \\ y = x_2 \end{cases} \dots\dots\dots (II.7)$$

Où $A_{11} \in R^{(n_p) \times (n_p)}$ est une matrice stable, $E_{f2} \in R^{q \times q}$ est non singulière. Une méthode de synthèse de l'observateur (II.5) a été proposée dans [13]. Ce dernier se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u - A_{12}e_y \\ \dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + S \\ \hat{y} = \hat{x}_2 \end{cases} \dots\dots\dots (II.8)$$

Où la matrice A_{22}^s est une matrice stable, et $e_y = \hat{x}_2 - x_2$ est l'erreur d'estimation de sortie.

La fonction discontinue S est proposée sous forme suivante :

$$S = \begin{cases} -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\|} \text{ si } e_y \neq 0 \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases} \dots\dots\dots (II.9)$$

$P_0 \in R^{p \times p}$ est une matrice semi définie positive, c'est la matrice de Lyapunov de A_{22}^s , solution de l'équation :

$$P_0 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_0 = -I \dots\dots\dots (II.10)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation des états est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 \\ \dot{e}_y = A_{21}e_1 + A_{22}^s e_y + S - E_{f2}f_a \end{cases} \dots\dots\dots (II.11)$$

Le système (II.11) est stable. Un régime de glissement s'instaure en forçant e_y à zero.

Les gains de l'observateur (II.5) sont donc donnés par :

$$G_l = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix} \text{ et } G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ l_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.12)$$

➤ **Exemple de reconstruction des défauts actionneurs ou composants :**

Supposant qu'un observateur, tel que défini par les équations (II.8), a été synthétisé et que le régime de glissement est établi. Durant le régime de glissement, nous avons :

$$e_y = 0 \text{ et } \dot{e}_y = 0 \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

Il s'en suit que :

$$0 = A_{21}e_1 - E_{f2}f_a + S_{eq} \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

Où S_{eq} est la surface équivalente qui représente l'effort nécessaire pour maintenir le régime de glissement [13]. En utilisant le fait que A_{11} soit stable et donc $e_1(t) \rightarrow 0$, alors :

$$S_{eq} \rightarrow E_{f2}f_a \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

Il a été proposé, pour le calcul de S_{eq} , de remplacer la fonction discontinue par une fonction continue, donnée par [13] :

$$S_\delta = -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

Où δ est un scalaire positif, suffisamment petit. Ainsi le défaut peut être estimé à l'aide de :

$$f_a(t) \approx -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| (E_{f2}^T E_{f2})^{-1} E_{f2}^T \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

3.1.2 Observateur de Luenberger généralisé

C'est l'un des observateurs proposé pour le problème fondamental de généralisation des résidus (Fundamental Problem of Residual Generation), qui permet l'estimation combinaison linéaire de l'état, découplé de l'effet des perturbations [11][9].

Pour les systèmes linéaires nous allons voir un exemple suivant :

Le principe de l'utilisation d'observateur de Luenberger généralisé pour la détection et localisation des défauts consiste à estimer une combinaison linéaire de l'état à savoir $Tx(t)$ ainsi que les grandeurs disponibles afin de générer le vecteur résidu, soit le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Où $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, et $y(t) \in R^p$ représente respectivement les vecteurs d'état, de commande et de sortie. $d(t) \in R^q$ et $f(t) \in R^n$ représente respectivement les perturbations et les défauts. La dynamique de l'observateur de Luenberger est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = N\hat{z} + Gy(t) + Mu(t) \\ r(t) = P\hat{z}(t) + Ky(t) \end{cases} \dots\dots\dots (II.19)$$

Où $\hat{z}(t)$ représente l'estimation de la combinaison linéaire des états. $r(t)$ est le vecteur résidu, déterminé à partir des états estimés, de la commande et de la sortie du système G, M, P, K et N sont des matrices de dimensions appropriées. La dynamique de l'erreur d'estimation et le résidu sont données par :

$$\begin{cases} \dot{e} = NT\hat{x} - (TA - GC)x - (TB - M)u - (TE_d - GF_d)d - (TE_f - GF_f)f \\ r = P\hat{z} + KCx + KF_d d + KF_f f \end{cases} \dots (II.20)$$

En absence de défauts et des entrées inconnues, le résidu et l'erreur d'estimation doit converger asymptotiquement vers zéro, pour assurer cette convergence, il suffit que l'observateur vérifient les conditions suivant : [9], [8]

$$\begin{cases} N \text{ stable} \\ NT = TA - GC \\ M = TB \\ GF_d - TE_d = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} PT = -KC \\ \text{et} \\ KF_d = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (II.21)$$

Et dans le cas de présence de défauts et les conditions précédentes (II.21) sont vérifiées, la dynamique de l'erreur et le résidu sont donnés par des expressions suivantes :

$$\begin{cases} \dot{e} = NT(\hat{x} - x) + (GF_f - TE_f)f \\ r = PT(\hat{x} - x) + KF_f f \end{cases} \dots\dots\dots (II.22)$$

L'observateur de Luenberger généralisé permet de générer des résidus robuste vis-à-vis des défauts, et découplé des perturbations comme l'indique l'expression suivante :

$$R(s) = G_{rd}(s)D(s) + G_{rf}(s)F(s) \dots\dots\dots (II.23)$$

Tel que :

$$\begin{cases} G_{rd}(s) = P(SI - N)^{-1}[GF_d - TE_d] + KF_d \\ \text{et} \\ G_{rf}(s) = P(SI - N)^{-1}[GF_f - TE_f] + KF_f \end{cases} \dots\dots\dots (II.24)$$

$G_{rd}(s)$ Représente le transfert résidu/perturbation.

$G_{rf}(s)$ Représente le transfert résidu/défauts.

3.2 Observateur des systèmes non linéaires

La plupart du temps, le système à surveiller a un comportement non-linéaire. Si le générateur de résidus est basé sur un modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement, lorsque l'état du système s'écarte notablement de ce point de fonctionnement normal, des dérivées importantes peuvent être observées, dues à cette non prise en compte du comportement non-linéaire. Afin de rendre les résidus robustes dans cette situation, il semble naturel d'employer un modèle non-linéaire décrivant au mieux le comportement du système considéré. Cette approche a été essentiellement développée par le professeur Paul Frank et son équipe [18], [19]. Elle est, en général, assez complexe et ne peut être utilisée que dans le cas de non-linéarité bien définies. Kondo Adjallah [20] a également proposé une démarche de conception de tels observateurs. Nous en exposons les principes ci-après.

Soit le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + F_a \\ y = Cx + F_c \end{cases} \dots\dots\dots (II.25)$$

$F_a \in R^n$ est un vecteur représente les défauts paramétriques et/ou actionneurs,

$F_c \in R^p$ est un vecteur représente défauts capteurs.

Soit l'observateur non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \psi(y) - \psi(\hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \dots\dots\dots (II.26)$$

Où ψ est une fonction analytique définie de $\mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$. Elle est déterminée de manière à assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation des états $e = x - \hat{x}$. La dynamique de cette erreur est donnée par :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = f(x, u) - f(\hat{x}, u) - \psi(y) + \psi(\hat{y}) \dots\dots\dots (II.27)$$

En supposant que l'état estimé tende asymptotiquement vers l'état réel, il est possible d'écrire un développement de Taylor du premier ordre des fonctions $f(x, u)$ et $\psi(y)$:

$$f(x, u) = f(\hat{x} + e, u) = f(\hat{x}, u) + D_{\hat{x}}(f)e, \text{ tel que: } D_{\hat{x}}(f) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x^T} \right|_{x = \hat{x}} \dots\dots\dots (II.28)$$

$$\psi(y) = \psi(\hat{y}) + D_{\hat{y}}(\psi)Ce, \text{ avec } D_{\hat{y}}(\psi) = \left. \frac{\partial \psi(y)}{\partial y^T} \right|_{y = \hat{y}} \dots\dots\dots (II.29)$$

Ainsi, l'équation (II.27) devient :

$$\dot{e} = (D_{\hat{x}}(f) - D_{\hat{y}}(\psi)C)e \dots\dots\dots (II.30)$$

Le problème consiste donc à déterminer une fonction $\psi(y)$, de sorte que l'erreur d'estimation converge asymptotiquement vers 0. La méthodologie de synthèse de cet observateur, telle que décrite dans [ADJ94], suppose que :

$$\psi(y) = R(\hat{x}, u)y \dots\dots\dots (II.31)$$

Et

$$R(\hat{x}, u) = P^{-1}F(\hat{x}, u)C^T Q \dots\dots\dots (II.32)$$

P est une matrice définie positive, telle que $V(e) = \frac{1}{2}e^T P e$ définie une fonction de Lyapunov.

$F(\hat{x}, u)$ et Q sont des matrices carrées de dimensions respectives $n \times n$ et $p \times p$ vérifiant les conditions suivantes :

$$\|PD_{\hat{x}}(f)\| < \|F(\hat{x}, u)\| \text{ et } \|F(\hat{x}, u)\| \text{ Définie positive} \dots\dots\dots (II.33)$$

$$[C^T Q C - 1] \text{ est semi définie positive} \dots\dots\dots (II.34)$$

Où le symbole $\| \cdot \|$ désigne la norme euclidienne.

La matrice $F(\hat{x}, u)$ a été proposée dans [ADJ94] sous la forme :

$$F(\hat{x}, u) = \text{diag}(\Phi, (\hat{x}, u)), \text{ avec } \Phi, (\hat{x}, u) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |\alpha_{ij}(\hat{x}, u) + \alpha_{ij}(\hat{x}, u)| \dots\dots\dots (II.35)$$

L'objectif est de reconstruire l'état et la sortie du système, la détection et la localisation des défauts sont faites par analyse des erreurs d'estimation, la dynamique de ces erreurs d'estimation est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{e} = [D_{\hat{x}}(f) - R(\hat{x}, u)F_c + F_a] \dots\dots\dots (II.36)$$

L'erreur estimation est traduite par un résidu, en absence de défauts, les résidus sont nuls, mais en leurs présences, ils sont différents de zéro.

3.2.1 Observateurs à modes glissants

L'observateur à modes glissant est un observateur dont le terme correcteur est une fonction signe. Considérons le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \dots\dots\dots (II.37)$$

$C = \text{diag} \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ et le vecteur ligne $C_1 = (1, 0, \dots, 0)$

L'un des observateurs à modes glissants le plus simple qui pouvant lui être associé est :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \lambda \text{sign}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \dots\dots\dots (II.38)$$

Où λ est une matrice de gain $n \times p$ qui peut être dépendante du temps et de l'erreur, avec $\text{sign}(y - \hat{y}) = (\text{sign}(y_1 - \hat{y}_1), \dots, \text{sign}(y_p - \hat{y}_p))^t$.

Où $\text{sign}(\cdot)$ est une fonction classique et $S = y - \hat{y}$ est la surface de glissement.

Ainsi l'erreur est $e = x - \hat{x}$

Alors la dynamique de l'erreur d'observation devient :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = f(x, u) - f(\hat{x}, u) - \lambda \text{sign}(y - \hat{y}) \dots\dots\dots (II.39)$$

La surface du glissement $S=0$ est attractive si et seulement si $S^T \dot{S} < 0$, cette condition définit la région dans laquelle le mode de glissement existe. Pendant le glissement, les

dynamiques de l'erreur d'estimation sont réduites de l'ordre n (système initial) à l'ordre $n-p$ (système équivalent d'ordre réduit).

3.2.1.1 Exemple de synthèse de l'observateur

Dans cette partie, nous présentons un observateur de flux par modes glissant dans le repère $(\alpha-\beta)$ de la machine asynchrone, où le vecteur d'entrée est $V = [V_1 \ V_2]^T$ et le vecteur d'état est $X = [I_{s\alpha}, I_{s\beta}, \Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}]$ comme suit [14] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\gamma x_1 + a \hat{x}_3 + Kp\omega \hat{x}_4 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\gamma x_2 + a \hat{x}_4 - Kp\omega \hat{x}_3 + eV_2 + \lambda_2^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_3 = bx_1 - c\hat{x}_3 - p\omega \hat{x}_4 + \lambda_3^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_4 = bx_2 - c\hat{x}_4 + p\omega \hat{x}_3 + \lambda_4^T I_s \end{cases} \dots\dots\dots (II.40)$$

Où a, b, c, e, K, p, ω et γ sont des paramètres appropriés à la machine asynchrone et les $\lambda_i^T, i=0, \dots, 4$ sont les gains de l'observateur à déterminer avec les $\lambda_i^T = [\lambda_{i1}^T \ \lambda_{i2}^T]$ et le vecteur I_s est donné par :

$$I_s = \begin{bmatrix} \text{sign}(S1) \\ \text{sign}(S2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.41)$$

Les surfaces de glissement sont définies comme suit

$$S = \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x_1 - \hat{x}_1 \\ x_2 - \hat{x}_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.42)$$

$$Q = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} a & -p\omega K \\ p\omega K & a \end{bmatrix}, \quad D = a^2 + p^2 \omega^2 K^2 \dots\dots\dots (II.43)$$

Le choix de Q est fait de manière à faciliter le calcul des gains de l'observateur. Les variables mesurables sont les courants statorique $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ et la vitesse du rotor ω . On suppose que la vitesse ω est fonction dérivable bornée et dont la dérivée $\dot{\omega}$ par rapport au temps est aussi bornée.

La dynamique de l'erreur d'observation est donné par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = ae_3 + Kp\omega e_4 - \lambda_1^T I_s \\ \dot{e}_2 = ae_4 + Kp\omega e_3 - \lambda_2^T I_s \\ \dot{e}_3 = -ce_3 + p\omega e_4 - \lambda_3^T I_s \\ \dot{e}_4 = -ce_4 + p\omega e_3 - \lambda_4^T I_s \end{cases} \dots\dots\dots (II.44)$$

Où $e_i = x_i - \hat{x}_i, i=1, \dots, 4$.

La synthèse de l'observateur consiste donc à déterminer les gains λ_1^T et λ_2^T de façon à assurer l'attractivité de la surface de glissement $S=0$, et à calculer λ_3^T et λ_4^T tels que le système d'ordre réduit obtenu quand $S \equiv \dot{S} \equiv 0$ est localement stable.

3.2.1.2 Attractivité de la surface de glissement

Choisissons la fonction de Lyapunov $V = \frac{1}{2} S^T S$. La condition d'attractivité de la surface $S=0$ est donné par :

$$\dot{V} = S^T \dot{S} < 0 \quad \forall S \neq 0 \quad \dots\dots\dots (II.45)$$

$$\dot{S} = Q \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} + \dot{Q} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{S} = Q \left[\begin{pmatrix} a & p\omega K \\ -p\omega K & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda_{11} \lambda_{12} \\ \lambda_{21} \lambda_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sign}(S_1) \\ \text{sign}(S_2) \end{pmatrix} \right] + \dot{Q} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.46)$$

$$\dot{Q} = \begin{bmatrix} n1 & -n2 \\ n2 & n1 \end{bmatrix}, \quad n1 = -\frac{2ap^2K^2\omega\dot{\omega}}{D^2}, \quad n2 = \frac{pK(D\dot{\omega} - 2p^2K^2\omega\dot{\omega})}{D^2};$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_{11} \lambda_{12} \\ \lambda_{21} \lambda_{22} \end{pmatrix} = Q^{-1} \Delta, \quad \Delta = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\dot{V} = S^T \dot{S} = S_1 [f_1 - \delta_1 \text{sign}(S_1)] + S_2 [f_2 - \delta_2 \text{sign}(S_2)] \dots\dots\dots (II.47)$$

$$\begin{cases} f_1 = e_3 + n_1 e_1 - n_2 e_2 \\ f_2 = e_4 + n_2 e_1 - n_1 e_2 \end{cases}$$

Pour garantir l'attractivité de la surface $S=0$, il suffit que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\delta_1 > |f_1|_{max} , \delta_2 > |f_2|_{max} \dots\dots\dots (II.48)$$

3.2.1.3 La dynamique sur la surface de glissement

La propriété d'invariance de S permet d'obtenir le vecteur équivalent \tilde{I}_s . Ainsi sur la surface de glissement la dynamique (\dot{S}) devienne :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} [I_s] \dots\dots\dots (II.49)$$

Le vecteur équivalent, sur la surface de glissement est donné par :

$$\tilde{I}_s = \begin{pmatrix} \frac{e_3}{\delta_1} \\ \frac{e_4}{\delta_2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (II.50)$$

Avec cette dernière expression, le système d'ordre réduit s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} - \frac{\lambda_{31}}{\delta_1} - p\omega - \frac{\lambda_{32}}{\delta_2} \\ p\omega - \frac{\lambda_{41}}{\delta_1} - \frac{1}{T_r} - \frac{\lambda_{42}}{\delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.51)$$

Les gains de correction λ_3 et λ_4 sont calculés par identification à un système équivalent avec une dynamique qui assure le comportement désiré, à savoir :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.52)$$

Avec q_1 et $q_2 > 0$, et enfin on aura

$$\begin{bmatrix} \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} \lambda_{12} \\ \lambda_{21} \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 - \frac{1}{T_r})\delta_1 & -p\omega \delta_2 \\ p\omega \delta_1 & (q_2 - \frac{1}{T_r})\delta_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.53)$$

On remarque que l'observateur par modes glissant est, par construction, robuste en stabilité vis-à-vis des incertitudes paramétriques.

3.2.2 Observateurs par mode glissants de Walkat-Zak pour les systèmes non linéaires

Soit la classe particulière, de systèmes non linéaires, définie par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \dots\dots\dots (II.54)$$

Où $x \in X \subset R^n, u \in U \subset R^m$ et $y \in Y \subset R^p$ représentent les vecteurs d'état, de commande et de sortie du système. Les matrices A et C sont de dimensions appropriées. $f(x, u)$ est une fonction non linéaire. L'observateur par modes glissants de Walkat-Zak est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + f(\hat{x}, u) + L(y - C\hat{x}) + S(\hat{x}, y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \dots\dots\dots (II.55)$$

Où $S(\hat{x}, y)$ est une fonction discontinue donnée par :

$$S = \begin{cases} \frac{P^{-1}C^T C e}{\|Ce\|} & si \|Ce\| > \varepsilon \\ \frac{P^{-1}C^T C e}{\varepsilon} & si \|Ce\| \leq \varepsilon \end{cases} \dots\dots\dots (II.56)$$

$e = x - \hat{x}$ Représente l'erreur d'estimation des états et ε est la borne supérieure des incertitudes. P est une matrice définie positive, elle est solution de l'équation de Riccati suivante:

$$(A - LC)^T P + p(A - LC) + \lambda_f P P + l = -Q \dots\dots\dots (II.57)$$

Q est une matrice définie positive, λ_f représente la constante de Lipchitz de f, telle que :

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \lambda_f \|x_1 - x_2\| \quad \forall x_1, x_2 \in X \quad \dots\dots\dots(\text{II.58})$$

Différentes approches ont été proposées pour l'application de cet observateur pour des fins de diagnostic. Pour plus de détails se référer à [15], [9].

3.2.3 Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes

L'idée de base de l'approche, qui a été proposé pour la génération de résidus en utilisant la théorie des modes glissants, consiste à synthétiser des observateurs par modes glissants, robustes vis-à-vis, non seulement des entrées inconnues, mais aussi des défauts et d'utiliser ainsi les états estimés pour la régénération de résidus robustes. Ces résidus, qui ne sont rien d'autres qu'une combinaison des différents défauts, vont permettre la détection de la présence d'un défaut tout en rejetant les perturbations et éventuellement la reconstruction de ce dernier. Cette approche est une continuité du travail effectué dans [9].

La figure suivante illustre le principe de cette méthode :

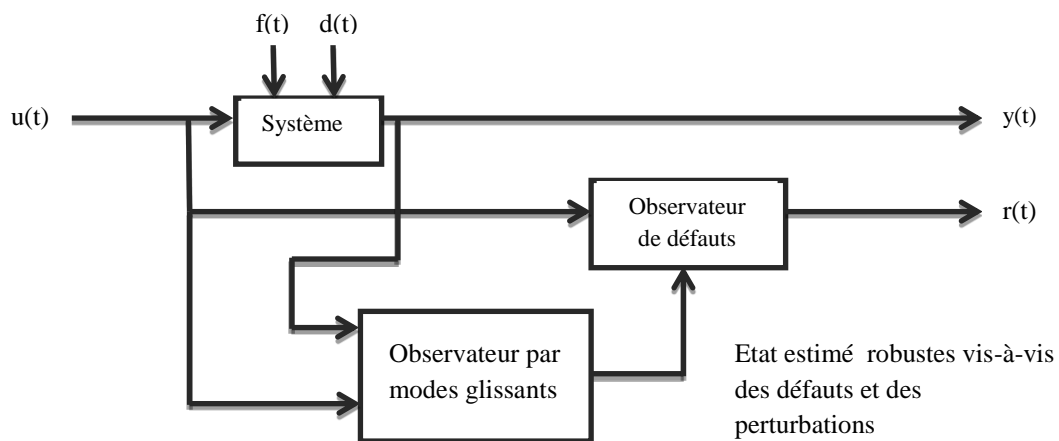


Figure II.1 : Principe de la méthode à base d'observateur par modes glissants, Proposée pour la génération des résidus.

Soit le système, soumis à des défauts et perturbations, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.59})$$

Où $x \in R^n, u \in R^m$ et $y \in R^p$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande et le vecteur de sortie. $d \in R^q$ et $f \in R^P$ Sont respectivement les perturbations et les défauts agissant sur le système.

Proposition

S'il existe une matrice constante T, vérifiant la condition $TE_d(x) = 0$. Alors, il est possible de définir un générateur de résidus sensibles aux défauts et insensibles aux perturbations, selon le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{x} - NTA(\hat{x}, u) \\ \hat{r} = z + NT\hat{x} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.60})$$

Où \hat{x} désigne l'état estimé par un observateur par modes glissants, robuste vis-à-vis des défauts et des perturbations. \hat{r} Représente le vecteur des résidus. N est une matrice définie positive, déterminée de façon à avoir la dynamique de l'observateur plus rapide que celle du système.

4. Génération des résidus à l'aide d'observateurs

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

Le problème de la détection et localisation des défauts par les méthodes à base d'observateur revient à la génération des résidus, et ces résidus doivent être sensibles aux défauts que l'on désire détecter, tout en rejetant les perturbations qui affectent le système afin

de distinguer les différents défauts agissant sur le système. Alors on parle du découplage et structuration des résidus.

4.1 Découplage :

Le découplage des résidus de l'effet des perturbations a fait l'objet de plusieurs études [16], [11], il est défini comme étant l'opération qui consiste à rendre le résidu complètement insensible à une entrée bien déterminée, dans ce cas le problème revient à un générateur de résidus de sorte à satisfaire les conditions suivantes :

- ❑ Le résidu doit être insensible aux entrées inconnues
- ❑ Le résidu doit être sensible aux défauts à détecter
- ❑ En absence de défauts le résidu doit converger asymptotiquement vers zéro

Alors le générateur de résidu proposé qui doit être sensible aux défauts et insensible aux perturbations est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{x} - NTA(\hat{x}, u) \\ \hat{r} = z + NT\hat{x} \end{cases} \dots\dots\dots (II.61)$$

Où z est la variable d'état définissant le générateur des résidus, \hat{x} désigne l'état estimé par un observateur par mode glissant, robuste vis-à-vis des défauts et perturbations. \hat{r} représente le vecteur des résidus, N est une matrice définie positive, déterminée d'une manière à avoir la dynamique de l'observateur soit plus rapide que celle du système, T est une matrice de découplage, elle est déterminée d'une manière à satisfaire la condition $TE_d(x) = 0$.

4.2 Structuration des résidus

Les résidus doivent permettre la distinction entre les défauts agissant sur le système. Si on suppose un observateur qui génère le vecteur résidu il doit être de dimension égale au nombre de défaut à la fois il possède la propriété suivante [16]:

$$r(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_q(t) \end{pmatrix} \begin{array}{l} \longrightarrow r_1(t) \text{ Sensible au défaut } f_1 \\ \longrightarrow r_2(t) \text{ Sensible au défaut } f_2 \\ \longrightarrow r_q(t) \text{ Sensible au défaut } f_q \end{array}$$

avec $q = \dim (f(t))$.

Mais cette structure reste toujours difficile à établir, alors il vaut mieux de procéder par les bancs d'observateur.

La technique consiste à mettre en œuvre plusieurs observateurs excités par une combinaison judicieusement choisie des entrées et des sorties du système, générant chacun des résidus destinés à révéler un ou plusieurs défauts spécifiques du système. Cette technique a été introduite par Clark (1975) [17]. Les objectifs poursuivis peuvent être différents : soit tous les défauts, même simultanés doivent être détectés et isolés, soit on se limite à détecter et isoler un seul défaut à la fois. Il existe deux types de structure d'observateur qui sont : [10]

4.2.1 Structure d'observateurs généralisés (Generalized Observer Scheme)

C'est une structure où le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les entrées sauf la $i^{\text{ème}}$ entrée et toute les sorties, la sortie de cette observateur est donc sensible aux défauts de toutes les entrées sauf ceux de la $i^{\text{ème}}$.

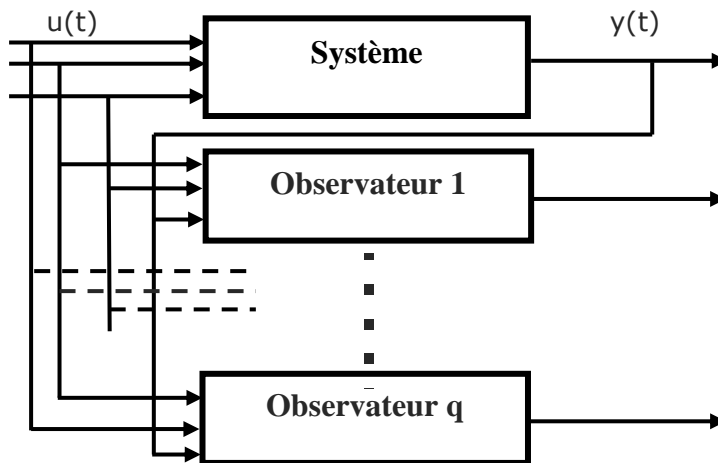


Figure II.2 : structure d'observateurs généralisés

4.2.2 Structure d'observateur dédié (Dedicated Observer Scheme)

La figure suivante illustre le principe de détection de défauts par un observateur dédié. Le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par la $i^{\text{ème}}$ entrée et toutes les sorties ; les $(m-1)$ entrées qui restent sont considérées comme inconnues et la sortie de cet $i^{\text{ème}}$ observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées.

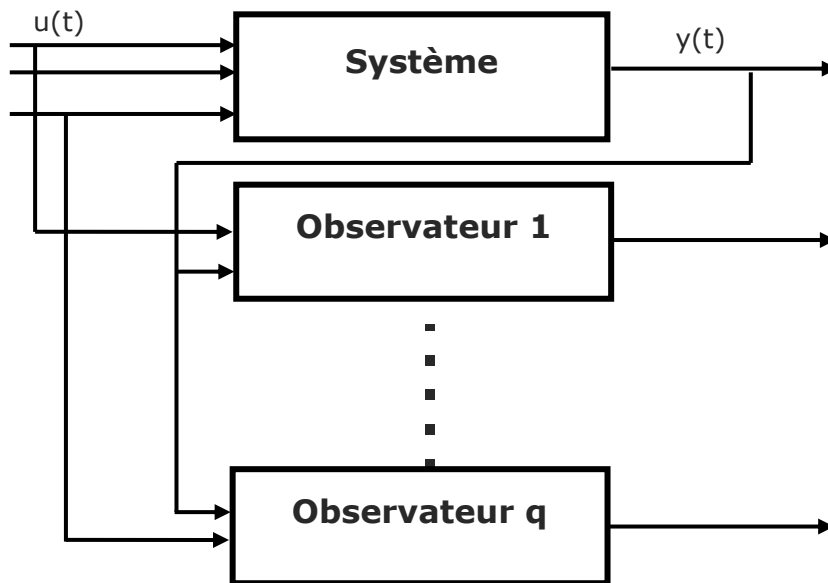


Figure II.3 : structure d'observateurs dédiés

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la détection et localisation de défauts par les méthodes à base d'observateurs pour les systèmes linéaires et non linéaires, et un intérêt particulier aux observateur en mode glissant pour leurs qualité de robustesse et aussi leurs efficacité pour la génération des résidus.

Afin de tester ces méthodes, notre choix d'étude a porté sur la machine asynchrone, sachant qu'elle représente l'entraînement électrique le plus utilisé dans l'industrie, pour sa simplicité et sa souplesse. Le chapitre suivant il sera question d'appliquer les méthodes de diagnostic à base d'observateurs en mode glissant.

***Chapitre III : Application du
diagnostic de défauts sur la
machine asynchrone***

Chapitre III : Application du diagnostic de défauts sur la MAS

1. Introduction

La machine asynchrone est largement utilisée dans le domaine des puissances du fait qu'elle présente de nombreux avantages tels que sa puissance, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre et aussi son faible coût.

Suite au vieillissement de la machine asynchrone, elle devient plus vulnérable et donc plus susceptible de montrer des défaillances. Par conséquent, il est nécessaire de procéder à sa maintenance préventive, sa surveillance et à son diagnostic afin d'améliorer sa fiabilité.

Dans ce chapitre, nous décrivons la machine asynchrone ainsi que les défauts pouvant l'affecter. Dans ce travail, notre intérêt portera sur les défauts dus aux variations des grandeurs physiques tels que les résistances et les inductances statorique et rotorique. Après avoir établi une modélisation de cette machine en utilisant la transformation du Park. En exploitant ce modèle, deux méthodes à base d'observateurs par modes glissants sont mises en œuvre afin de réaliser la détection, localisation et estimation des défauts. La première méthode concerne la synthèse d'un observateur par mode glissant avec capteur de vitesse pour la détection et l'isolation [24]. La seconde méthode permet de plus la reconstruction des défauts [23].

2. Généralités sur la machine asynchrone

2.1 Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales, le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique. La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

2.2 Description de la M.A.S Triphasée

Le moteur asynchrone comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans des encoches et relié à la source d'alimentation, et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écurueil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer.

Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction:

➤ La machine asynchrone se comporte comme un transformateur dont le rotor est en court-circuit.

➤ La vitesse de rotation Ω_s du champ tournant d'origine statorique, rigidement liée à la fréquence f_s de tension triphasée d'alimentation :

$$\Omega_s = 60 \frac{f_s}{p} (tr/min) \dots\dots\dots(III.1)$$

On désigne par p le nombre de pairs de pôles de la machine.

3. Défauts de la machine asynchrone

Les défauts typiques des machines asynchrones peuvent être regroupés comme suit : [21], [22], [24]

- ❑ Des défauts du stator ayant pour résultat l'ouverture ou le court-circuit d'un ou plusieurs enroulements d'une phase statorique.
- ❑ Un raccordement anormal des enroulements du stator.
- ❑ Un défaut au niveau du rotor qui serait une rupture total ou partielle d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écurueil ou une rupture d'une position d'anneau.
- ❑ Un défaut de contact balai-bague dans le cas d'un rotor bobiné.
- ❑ Des irrégularités statiques et / ou dynamiques de l'espace vide entre stator et rotor (défauts d'excentricité).
- ❑ Un bobinage d'excitation du rotor court-circuité.
- ❑ Un axe coudé ou incliné (excentricité dynamique).
- ❑ Un défaut d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement prématuré dû au milieu de fonctionnement hostile ou non et à la façon dont est alimenté le moteur.

- Une dégradation par usure prématurée ou non des roulements à billes.

3.1 Modèle de la machine asynchrone

Dans ce qui suit, la transformation de Park permet d'obtenir une représentation biphasée équivalente de la machine. Cette transformation fait appel à deux changements de coordonnées : la transformation de Concordia et un changement de repère par rotation.

3.2 Modélisation de la MAS dans le repère de Park :

La transformation de Park appelée souvent transformation à deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- d'axe direct
- d'axe en quadrature
- homopolaire

d : Indice de la composante directe

q : Indice de la composante en quadrature

o : Indice de la composante homopolaire

La transformation du modèle d'un enroulement triphasé en un modèle d'un enroulement biphasé, en prenant en compte la conservation des puissances est permis par la matrice de Park donnée ci après :

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

Le facteur $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$: est là pour conserver la puissance électrique instantanée

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

θ est l'angle de rotation du repère(d, q) .

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.4)$$

La transformation du modèle d'un enroulement biphasée (d-q) en un modèle d'un enroulement biphasée (α - β), on exprime toutes les grandeurs dans un seul repère. Les grandeurs statoriques et rotoriques sont projetées dans le repère généralisé (d-q), qui décalé d'un angle θ par rapport au repère fixe ($\alpha - \beta$) cette transformation se fait à l'aide de la matrice orthonormale de rotation $T_{(d,q)}(\theta)$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = T_{(d,q)}(\theta) \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = T_{(d,q)}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.5)$$

Où $T_{(d,q)}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}; \quad T_{(d,q)}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.6)$

Le modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park est non linéaire à cause de la présence de la vitesse dans les équations électriques du système d'état. L'extension éventuelle du système à d'autres variables augmenterait cette non linéarité.

➤ **Dans le repere (d-q)**

Dans ce référentiel, le repère (d-q) tourne à la vitesse électrique du champs tournant ω_s . Nous pouvons aligner l'axe (od) avec le courant magnétique rotorique(le flux rotorique (ϕ_{dr})), alors dans ce cas on aura $\frac{d\phi_{qr}}{dt} = 0$, cet asservissement du flux rotorique est connu sous le nom de commande par le champ orienté. Le modèle sain de la machine asynchrone dans ce référentiel (d-q) est donné par les équations (III.7) où le vecteur commande [V_{ds} V_{qs}] et les variables d'état sont [i_{ds} , i_{qs} , ϕ_{dr} , Ω] : [23]

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} &= -a i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \phi_{dr} + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{qs}}{dt} &= -a i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P \phi_{dr} \Omega + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} &= \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{dr} \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{P L_m}{L_r J} i_{qs} \phi_{dr} - \frac{f}{J} \Omega - \frac{T}{J} \end{aligned} \right. \dots\dots\dots (III.7)$$

$$\omega_s = P\Omega + \frac{L_m}{\tau_r \phi_{dr}} i_{qs} \dots\dots\dots (III.8)$$

$$a = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) \text{ et } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

L_m, L_r, L_s sont les inductances respectivement mutuelle, rotorique et statorique. ω_s est la pulsation statorique, τ_r constante du temps ($\frac{L_r}{R_r}$). P nombre de pair de pôles, J est le moment d'inertie, T c'est le couple résistant, f est les frictions.

➤ **Dans le repère (α - β)**

Le modèle de la machine asynchrone dans le repère se met sous la forme suivante[24] :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \dots\dots\dots (III.9)$$

Où les variables d'état sont $x = [I_{\alpha s} \ I_{\beta s} \ \phi_{\alpha r} \ \phi_{\beta r} \ \Omega]^T$, et la commande $u = [V_{\alpha s} \ V_{\beta s}]^T$ et la sortie est $y = [I_{s\alpha} \ I_{s\beta} \ \omega]^T$.

$$A(x, u) = \begin{bmatrix} -\gamma x_1 + a x_3 + K p x_4 x_5 + e V_1 \\ -\gamma x_2 + a x_4 - K p x_3 x_5 + e V_2 \\ b x_1 - c x_3 - p x_4 x_5 \\ b x_2 - c x_4 + p x_3 x_5 \\ d(x_3 x_2 - x_1 x_4) - \frac{c_r}{J} - \frac{K_f}{J} x_5 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \dots\dots\dots (III.10)$$

Où :

$$\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_r^2 L_s}; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad K = \frac{L_m}{\sigma L_r L_s};$$

$$a = \frac{K}{T_r}; \quad b = \frac{L_m}{T_r}; \quad c = \frac{1}{T_r}; \quad e = \frac{1}{\sigma L_s}; \quad d = \frac{p L_m}{J L_r}.$$

3.3 Simulation de la machine asynchrone saine en boucle ouverte

Après avoir établi un modèle de la machine asynchrone (III.10), un programme a été développé en utilisant MATLAB 7.14 pour simuler son comportement en boucle ouverte en absence de défauts (Les paramètres de cette machine se trouvent dans l'annexe I). Les simulations obtenues à vide et en charge sont représentées sur les figures suivantes :

3.3.1 Résultats de simulation de la machine asynchrone à vide (Cr=0)

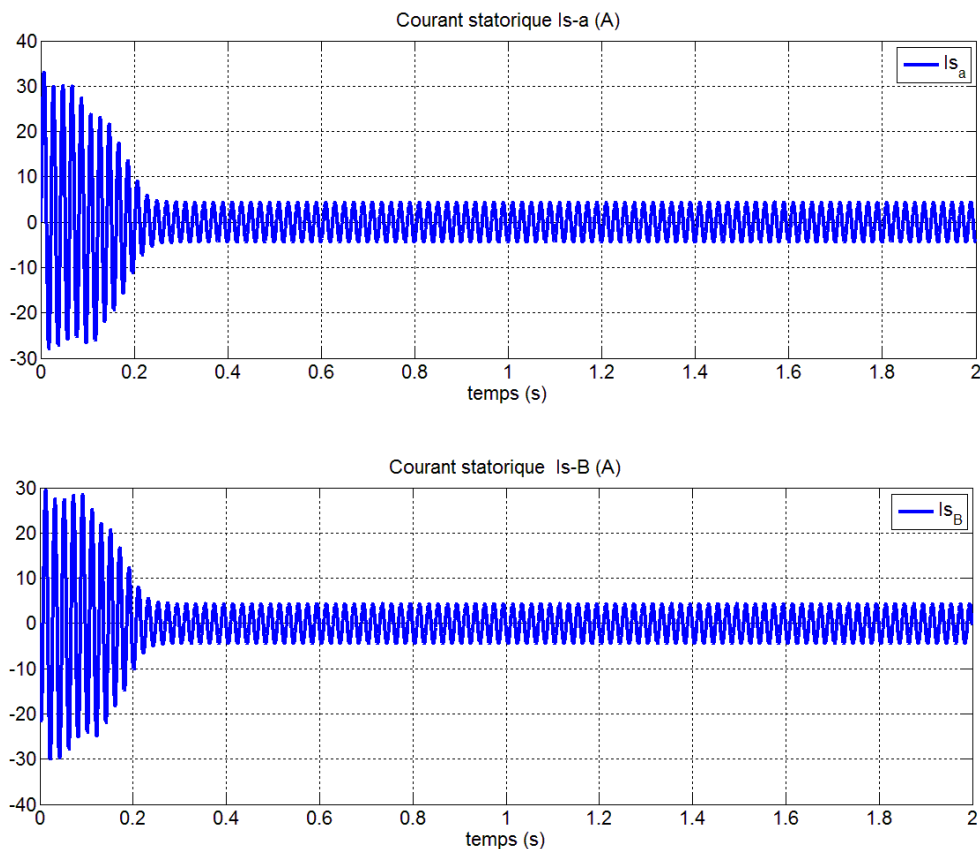


Figure III.1 : Evolution des courants statorique à vide

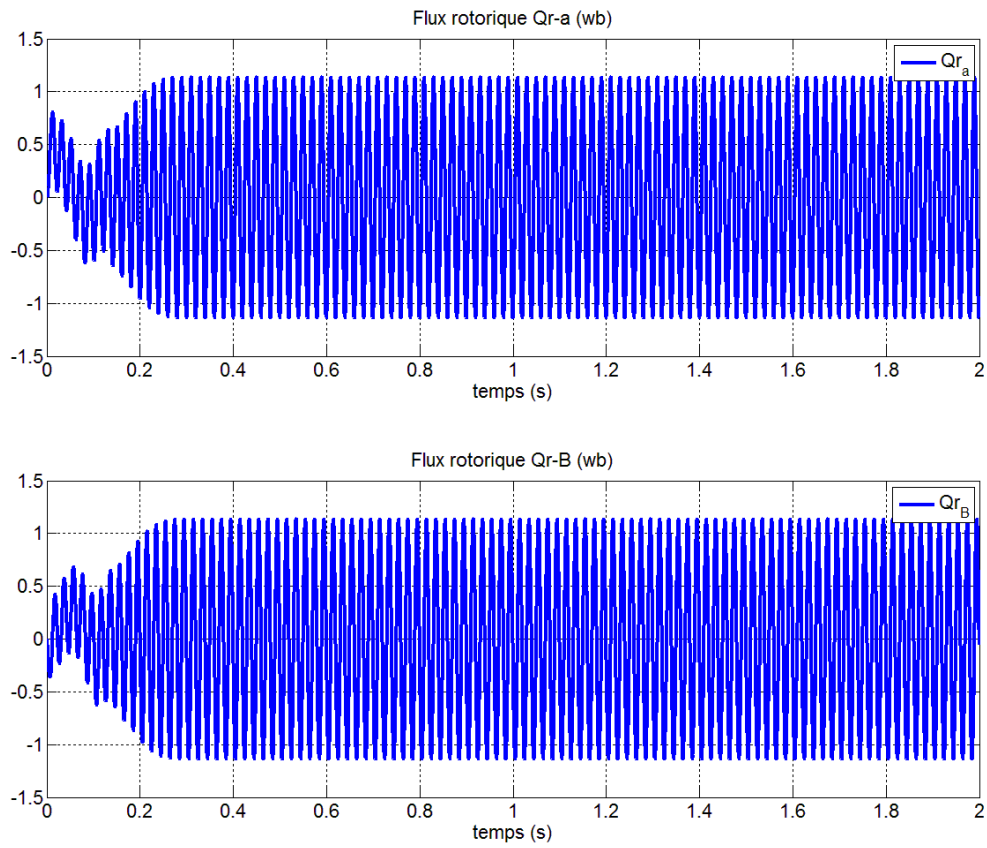


Figure III.2: Flux rotorique à vide

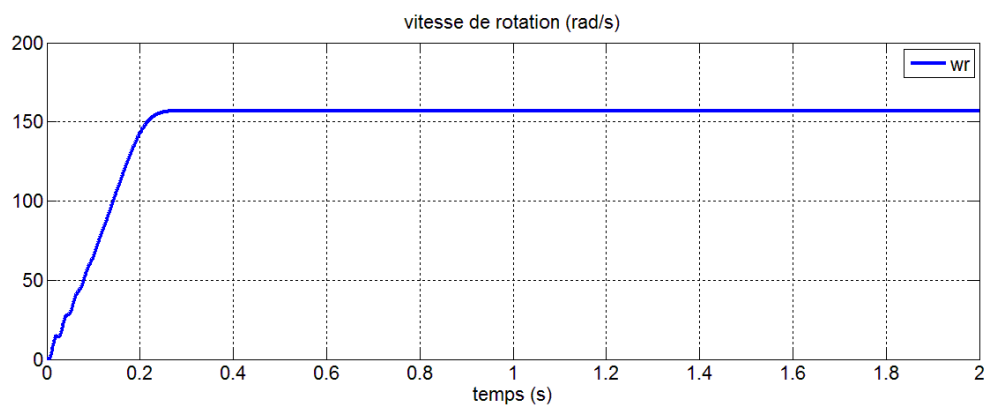


Figure III.3: Evolution de la vitesse de rotation à vide

3.3.2 Résultats de simulation de la machine asynchrone en charge ($C_r \neq 0$ à $t > 0.5s$)

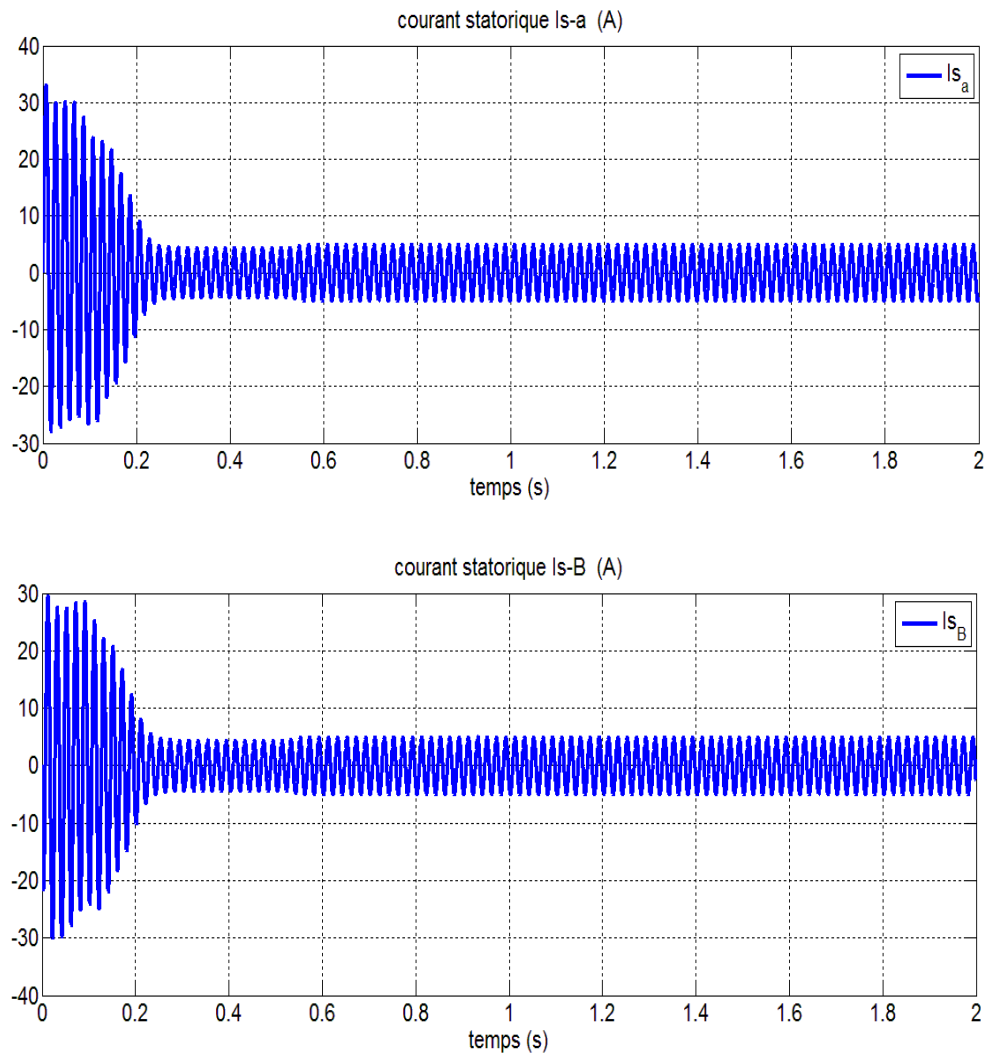


Figure III.4 : Evolution des courants statorique en charge

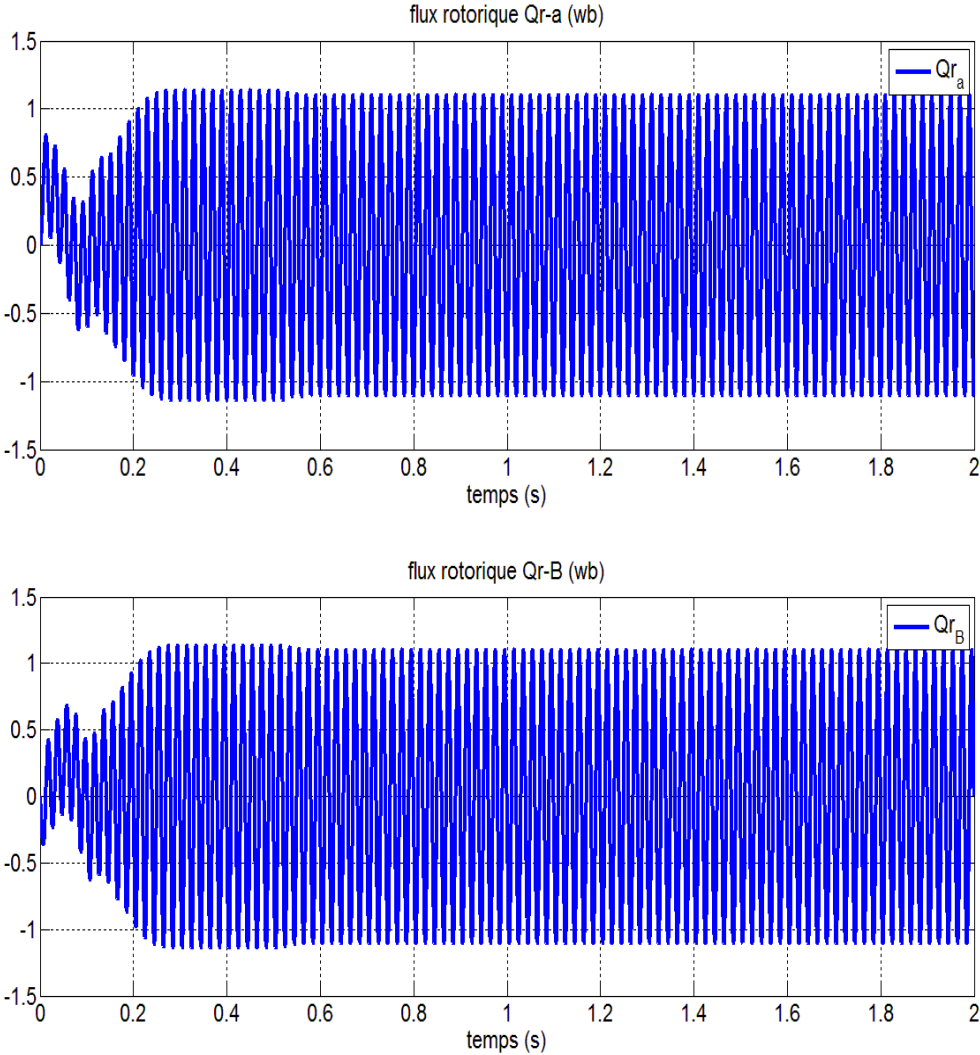


Figure III.5: Flux rotorique avec la charge

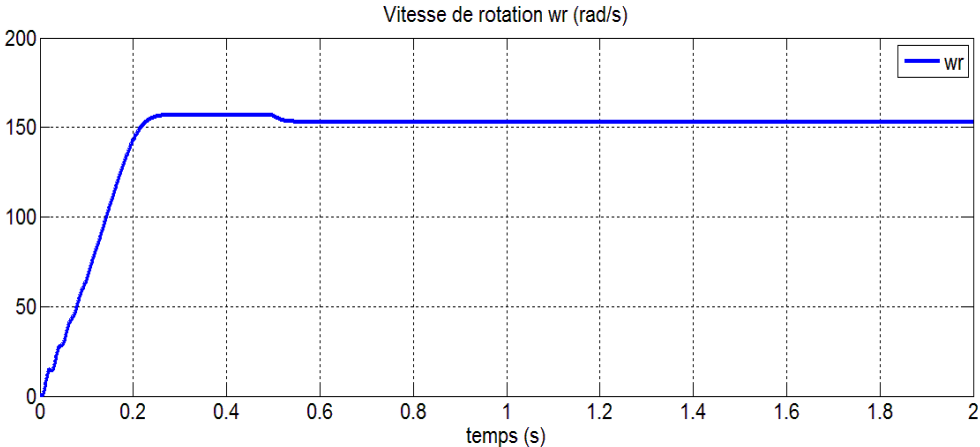


Figure III.6 : Evolution la vitesse de rotation de la MAS en charge.

Interprétation des résultats :

Sur les figures **III.1, III.2 et III.3**, sont représentées les évolutions des courants statorique, flux rotorique et vitesse de rotation pour la machine asynchrone alimenté en tension.

En régime transitoire, les courants statorique oscillent entre -30A et 30A, pour atteindre ± 5 A en régime permanent et cela est dû au fait que la vitesse du rotor s’approche de celle du champ tournant (vitesse du synchronisme). Lors de l’application du couple résistant des ondulations sont apparues (les courants évoluent entre ± 7 A).

Au démarrage, les flux rotorique oscillent autour de zéro et l’amplitude de ces oscillations augmente jusqu’à atteindre les valeurs max (1.2wb) en régime permanent. Dès qu’on applique le couple de charge, les oscillations sont légèrement réduites.

La vitesse de rotation se stabilise à une vitesse de ≈ 157 rad/s en 0.3s. A l’application du couple résistant de 5 N.m à l’instant $t= 0.5$ s la vitesse de rotation décroît du fait qu’elle est inversement proportionnelle à la charge, et la vitesse se stabilise à la valeur 153 rad/s inférieur à la vitesse du synchronisme.

4. Modélisation de la machine asynchrone en vue de son diagnostic

Le diagnostic des défauts de la MAS par les méthodes à base de modèle, et plus particulièrement celles à base d’observateurs, nécessite une modélisation adéquate de celle-ci où il sera mis en évidence les défauts que l’on désire détecter et éventuellement les entrées inconnues.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la détection et la localisation des défauts se traduisant par des variations des résistances et inductances statorique et rotorique de la MAS, en supposant que la détection doit se faire indépendamment des variations du couple résistant, des frottements et de l’inertie. Ces derniers sont donc considérés comme étant des perturbations.

On considère le système d’équations décrit dans l’annexe

$$\begin{cases} \dot{X} = g(X, U, d, f) \\ Y = CX \end{cases} \dots\dots\dots (III.11)$$

le vecteur défaut est représenté par les variations des résistances et inductances statorique et rotorique autour de leurs valeurs nominales, à savoir :

$$f = \begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_s \\ \Delta R_r \\ \Delta L_r \end{bmatrix} \quad \text{Tel que : } \begin{cases} \Delta R_s = R_s - R_{s0} \\ \Delta L_s = L_s - L_{s0} \\ \Delta R_r = R_r - R_{r0} \\ \Delta L_r = L_r - L_{r0} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III. 12)}$$

R_{s0} , L_{s0} , R_{r0} , L_{r0} étant respectivement les valeurs nominales de la résistance statorique, inductance statorique, résistance rotorique et de l'inductance rotorique.

Les perturbations sont représentées par les variations du couple résistant, des frottements et de l'inertie autour de leurs valeurs nominales données respectivement par C_{r0} , K_{f0} et j_0 :

$$d = \begin{bmatrix} \Delta C_r \\ \Delta K_f \\ \Delta j \end{bmatrix} \quad \text{Tel que : } \begin{cases} \Delta C_r = C_r - C_{r0} \\ \Delta K_f = K_f - K_{f0} \\ \Delta j = j - j_0 \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III.13)}$$

Le modèle défaillant de la machine se met sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = A(X, U) + E_d(X)d + E_f(X)f \\ Y = CX \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III.14)}$$

Où $E_d(X)$ et $E_f(X)$ sont des distributions vectorielles déterminées en effectuant un développement de Taylor de $g(X, U, d, f)$ autour des valeurs nominales des paramètres considérées telles que :

$$E_d(X) = \frac{\partial g(X, U, d, f)}{\partial d} \Big|_{C_{r0}, K_{f0}, j_0} \quad \text{et} \quad E_f(X) = \frac{\partial g(X, U, d, f)}{\partial f} \Big|_{R_{s0}, L_{s0}, R_{r0}, L_{r0}}$$

Les valeurs de ces distributions peuvent être consultées en annexe I.

5. Application des méthodes à base d'observateurs par modes glissants pour la détection et localisation des défauts de la MAS

5.1 Observabilité de la machine asynchrone

Appliquons la propriété [II.2.1] au système précédant (III.10) lorsque la sortie est $y = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \omega]^T$, on ne rencontre pas de difficulté pour trouver des entiers non négatifs, par exemple $l_1, l_2, l_3 = \{2, 2, 1\}$. On obtient ainsi la matrice d'observabilité suivante :

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma & 0 & \frac{K}{T_r} & pK\omega & pK\phi_{r\beta} \\ 0 & -\gamma & -pK\omega & \frac{K}{T_r} & -pK\phi_{r\alpha} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.15)$$

Le déterminant de cette matrice est $O = a^2 + p^2 K^2 \omega^2$. Le rang de la matrice (O) est égale à l'ordre du système (5) et ceci indépendamment de la vitesse. Le système est donc uniformément localement observable.

Dans ce qui suit, nous proposons de mettre en œuvre un observateur par modes glissants pour la détection des défauts se traduisant par des variations des grandeurs statorique et rotorique de la MAS puis d'étudier sa performance pour la localisation.

5.2 Synthèse d'un observateur par mode glissants avec un capteur de vitesse pour MAS

Les mesures dont nous disposons sont la vitesse et les courants, et comme la vitesse est considérée comme étant une variable lente par rapport aux grandeurs électriques. Elle ne sera pas utilisée pour la correction de l'observateur sur les autres variables.

On considère l'observateur par mode glissants de la machine asynchrone défini par les équations suivantes [24]:

$$\begin{cases} \hat{x}_1 = -\gamma x_1 + a \hat{x}_3 + Kp\hat{x}_4 x_5 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \hat{x}_2 = -\gamma x_2 + a \hat{x}_4 - Kp\hat{x}_3 x_5 + eV_2 + \lambda_2^T I_s \\ \hat{x}_3 = bx_1 - c\hat{x}_3 - p\hat{x}_4 x_5 + \lambda_3^T I_s \\ \hat{x}_4 = bx_2 - c\hat{x}_4 + p\hat{x}_3 x_5 + \lambda_4^T I_s \\ \hat{x}_5 = d(\hat{x}_3 x_2 - x_1 \hat{x}_4) - \frac{c_r}{J} - \frac{K_f}{J} x_5 + q_1(x_5 - \hat{x}_5) + \lambda_5^T I_s \end{cases} \dots\dots\dots (III.15)$$

Où

$$X = [I_{sa} \ I_{s\beta} \ \phi_{ra} \ \phi_{r\beta} \ \Omega]^T$$

$$I_s = [\text{sign}(S_1) \ \text{sign}(S_2)]^T \text{ et } \begin{cases} S_1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ S_2 = x_2 - \hat{x}_2 \end{cases} \dots\dots\dots (III.16)$$

Où S_1 et S_2 représentent les surfaces de glissement, les gains $q_1; \lambda_1^T; \lambda_2^T; \lambda_3^T; \lambda_4^T$ et λ_5^T sont calculés de manière à assurer la convergence asymptotique des erreurs d'observation (voir l'annexe I).

$$\begin{bmatrix} \lambda_1^T \\ \lambda_2^T \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \text{ Et } Q = \frac{1}{(a^2 + (Kp x_5)^2)} \begin{bmatrix} a & -Kp x_5 \\ Kp x_5 & a \end{bmatrix}; \dots\dots\dots (III.17)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_3^T \\ \lambda_4^T \end{bmatrix} = \left[\begin{pmatrix} -c - p x_5 \\ p x_5 - c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix}; \dots\dots\dots (III.18)$$

$$\lambda_5^T = [\lambda_{51} \ \lambda_{52}]^T, \quad \begin{bmatrix} \lambda_{51} \\ \lambda_{52} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} x_2 & -x_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.19)$$

Or:

$$\delta_1 \geq \|e_3\|_{max} \text{ et } \delta_2 \geq \|e_4\|_{max}, \quad q_1 > 0, \quad q_3 > 0, \quad q_4 > 0. \dots\dots\dots (III.20)$$

sign_{eq} représente la valeur moyenne de la fonction sign, dans notre cas, elle est approximée par la fonction mathématique arc tangente.

Pour la simulation du système défaillant, nous considérons des variations de 50% autour des valeurs nominales, les résultats de la simulation sont comme suit :

5.3 Résultats de simulation en absence de défauts et de perturbation

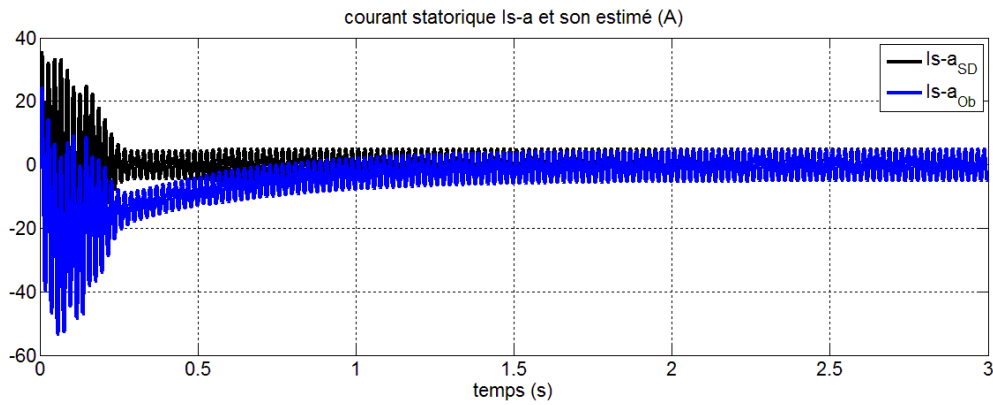


Figure III.7 : Courant statorique alpha et son estimé

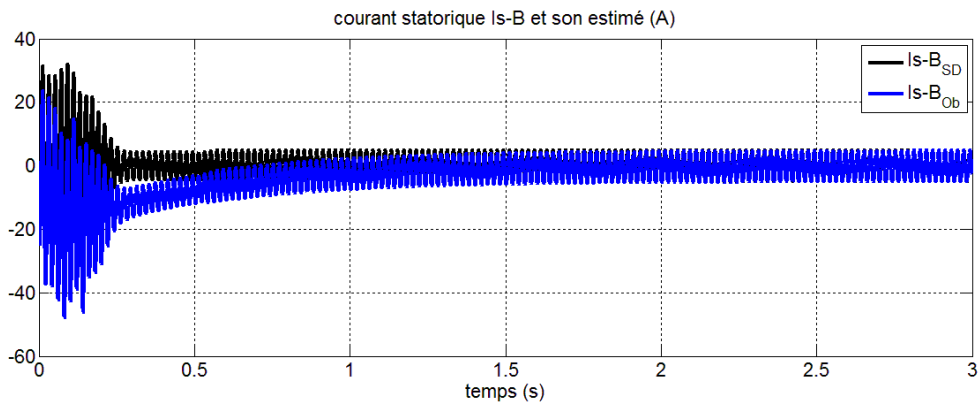


Figure III.8 : Courant statorique beta et son estimé

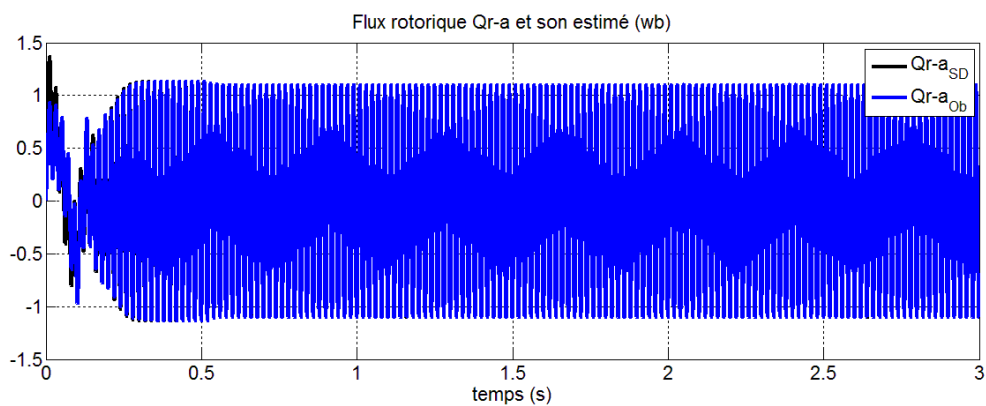


Figure III.9 : Flux rotorique alpha et son estimé

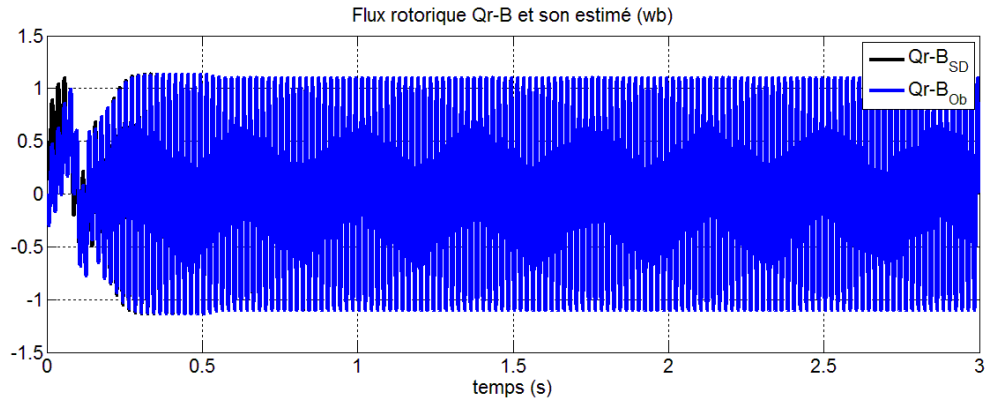


Figure III.10 : Flux rotorique beta et son estimé

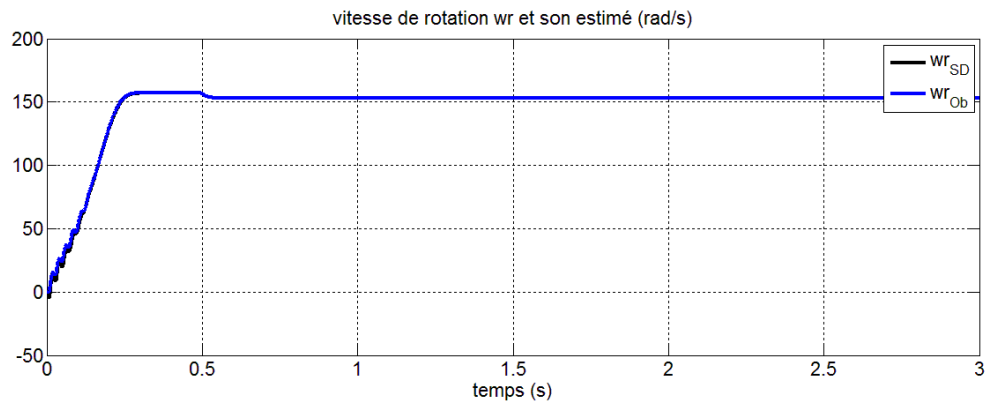


Figure III.11 : La vitesse de rotation et son estimé

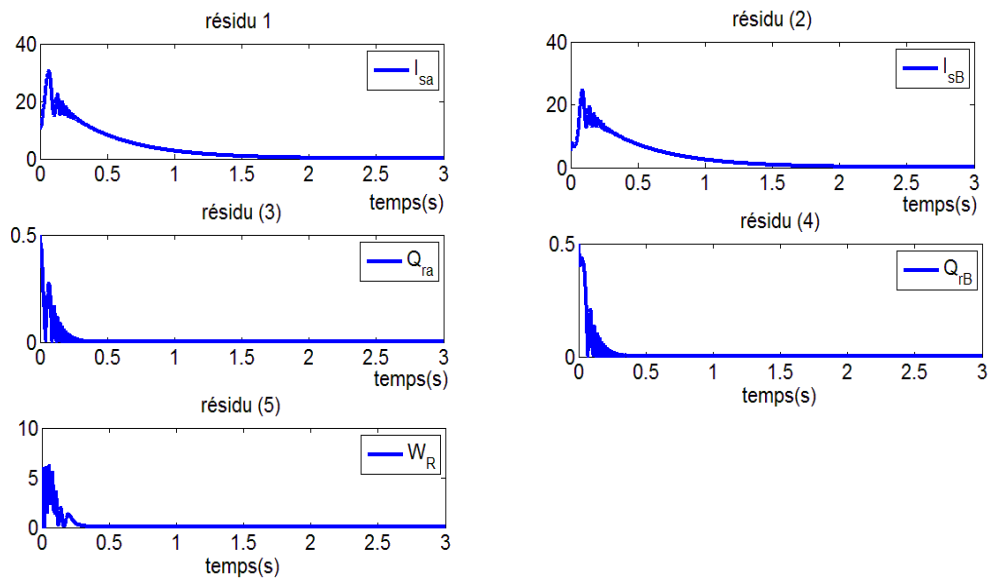


Figure III.12: Résidus en absence de défauts et de perturbation.

Interprétation des résultats

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation en absence de défauts et de perturbations. On constate que l'observateur a bien estimé les états du système, l'erreur d'observation converge vers zéro rapidement. L'apparition d'un écart au démarrage est dû au fait que les conditions initiales de l'observateur et celle du système étudié sont différentes. Les résidus définis comme grandeurs de comparaison entre les mesures et leurs estimées sont identiquement nuls.

5.4 Résultats de simulation en présence de défauts et absence de perturbations

➤ Défaut_statorique

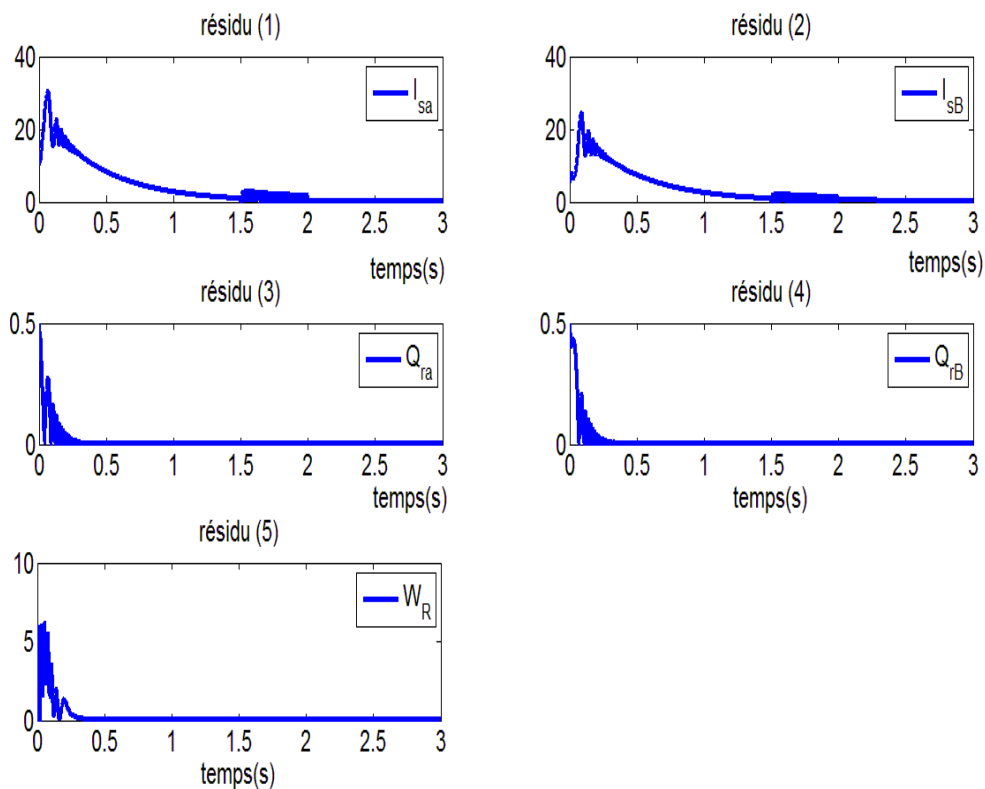


Figure III.13 Apparition d'un défaut au niveau de la résistance statorique

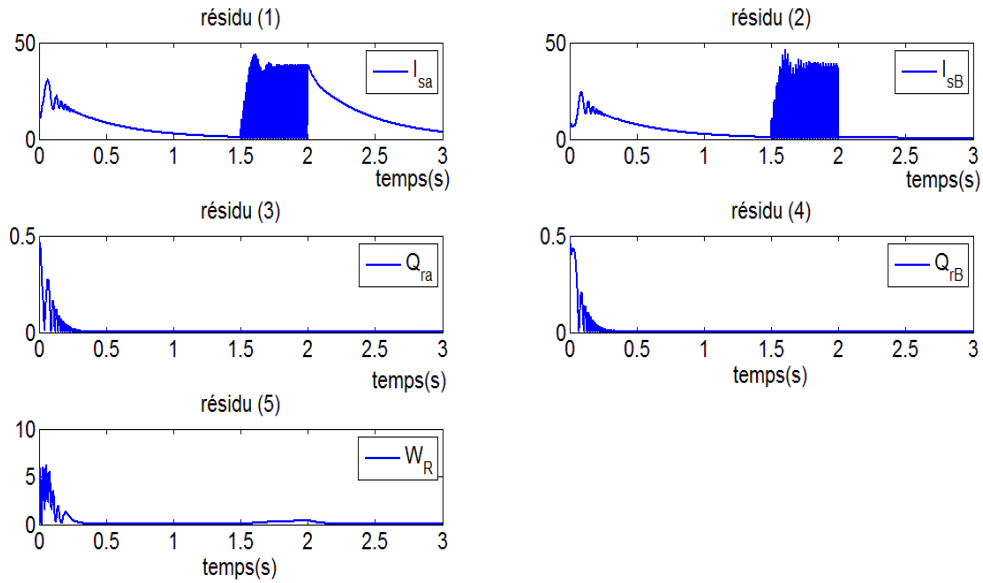


Figure III.14 Apparition d'un défaut au niveau de l'inductance statorique

➤ Défaut rotorique

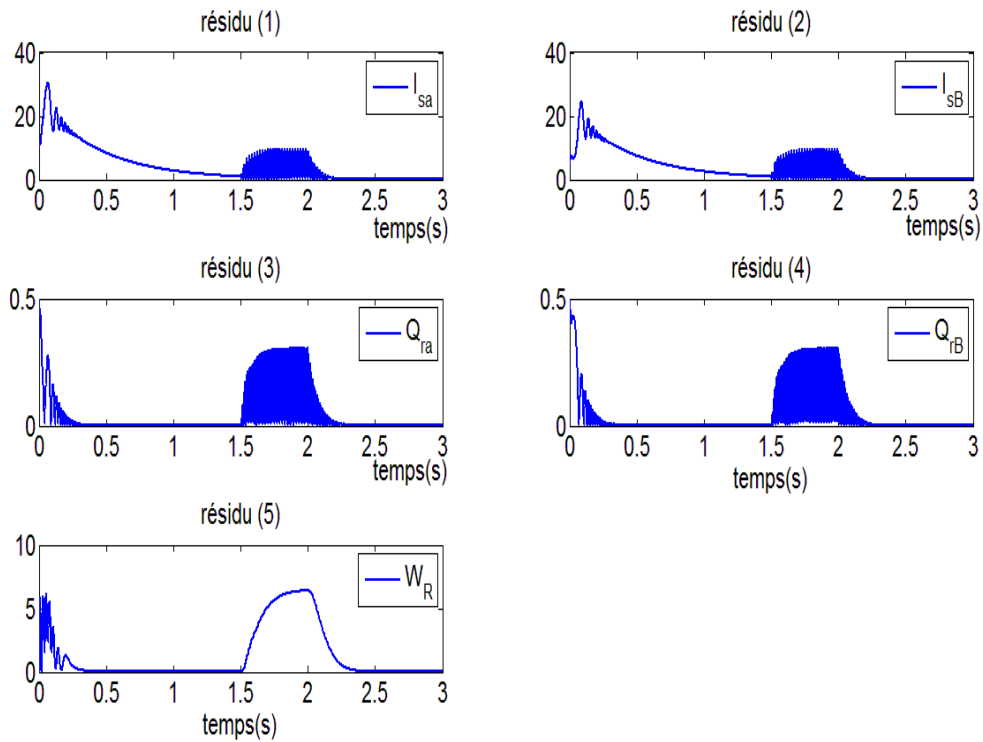


Figure III.15 : Apparition d'un défaut au niveau de la résistance rotorique

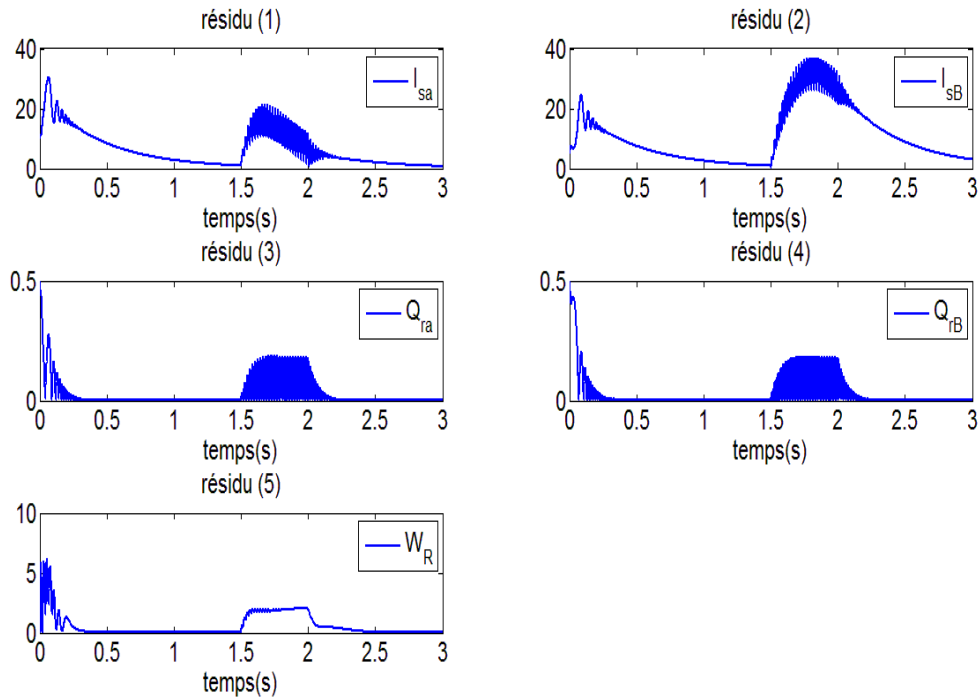


Figure III.16 : Apparition d'un défaut au niveau de l'inductance rotorique

5.5 Présence de perturbation

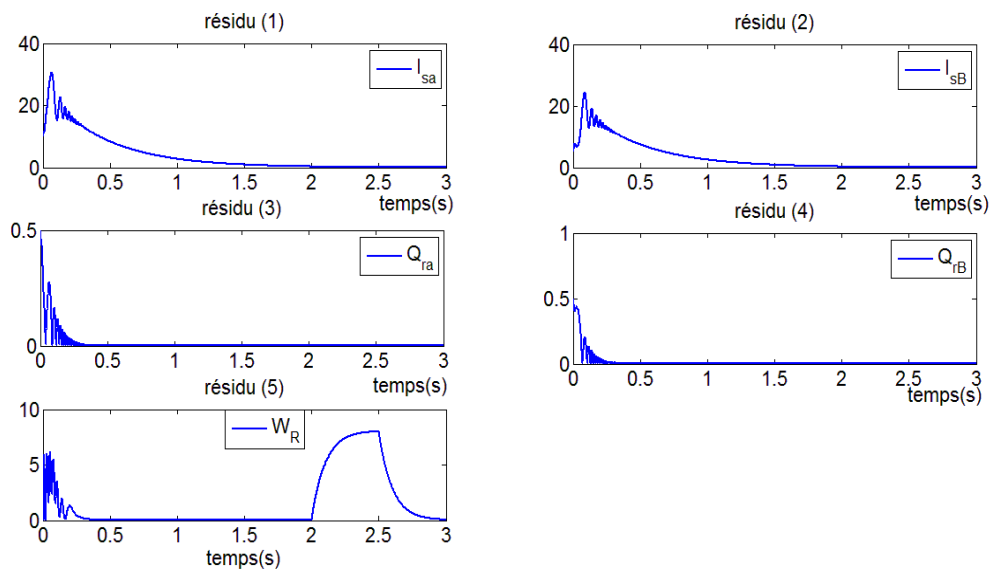


Figure III. 17 : Apparition d'une perturbation du couple résistant

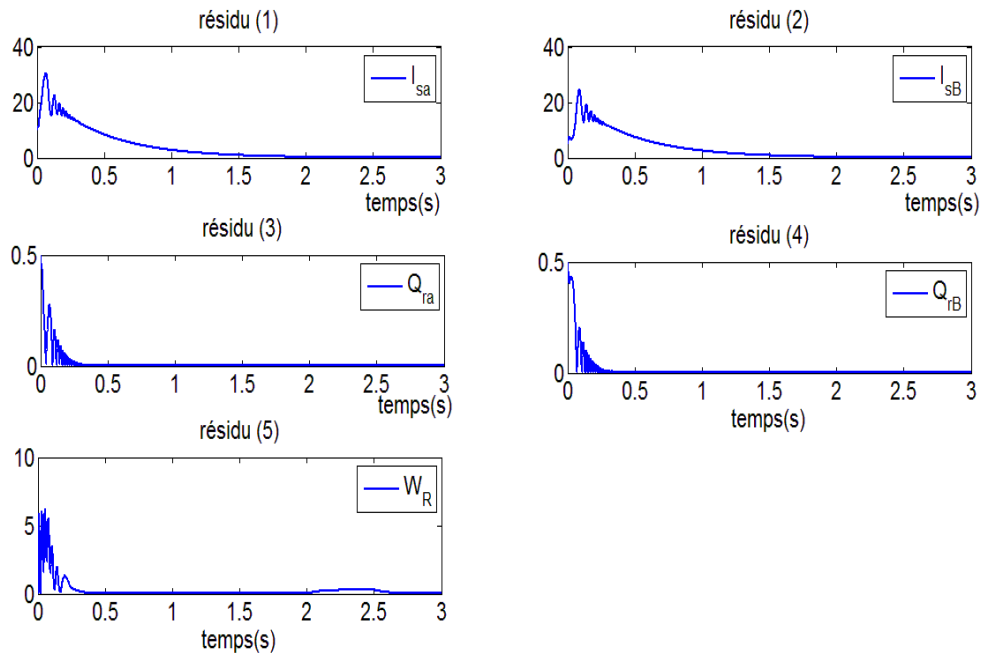


Figure III.18 : Apparition d'une perturbation sur la friction

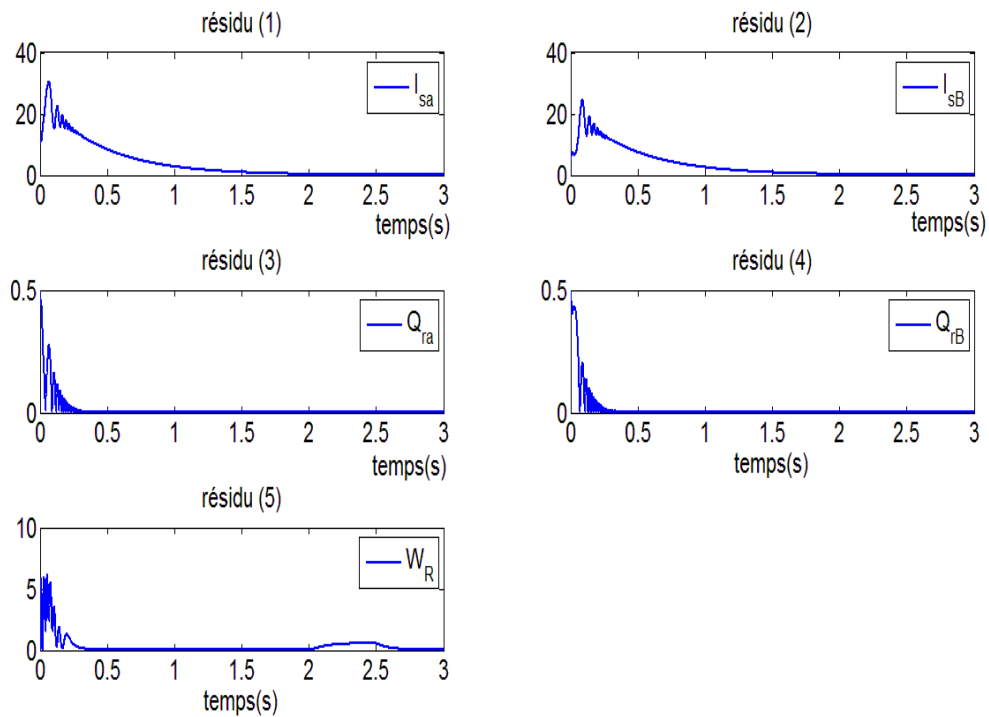


Figure III.19 : Apparition d'une perturbation sur l'inertie

Interprétation des résultats

Les figures (III.13, III.14, III.15, III.16) représentent les simulations obtenues suite à l'apparition des défauts statoriques et rotoriques (variations de 50% de $t= 1.5s$ à $t= 2s$), nous notons alors un écart entre le comportement du système et les estimations de l'observateur, ceci se traduit par l'écartement des résidus du zéro.

Les figures (III.17, III.18, III.19) représentent les simulations obtenues suite à l'apparition des perturbations respectivement couple résistant, les frottements et l'inertie entre $t=2s$ et $t=2.5s$. Nous remarquons que les perturbations n'affectent aucunes des variables d'états sauf la vitesse de rotation.

Pour analyser la possibilité d'établir une isolation des défauts et un découplage des perturbations, nous dressons la table de signature suivante :

	résidu (1)	résidu (2)	résidu (3)	résidu (4)	résidu (5)
Défauts stator (ΔR)	1	1	0	0	0
Défauts stator (ΔL)	1	1	0	0	0
Défauts rotor (ΔR)	1	1	1	1	1
Défauts rotor (ΔL)	1	1	1	1	1
Perturbation (ΔCr)	0	0	0	0	1
Perturbation (ΔKf)	0	0	0	0	1
Perturbation (ΔJ)	0	0	0	0	1

Tableau 1 : Table de signature de défauts

D'après le tableau 1, nous constatons qu'en la présence de défauts statoriques les résidus (1) et (2) sont affectés et en la présence de défauts rotoriques tous les résidus varient. Aussi, les perturbations considérées n'influencent que le cinquième résidu. Donc la différenciation entre défauts stator et rotor est possible indépendamment des perturbations. D'

autre part, nous proposons pour la distinction entre une variation d'une inductance ou celle d'une résistance des méthodes plus élaborées.

6. Détection et reconstruction de défauts en utilisant un observateur par modes glissants [23]

Considérons le modèle du moteur asynchrone en présence de défauts statoriques et rotoriques. En présence de ces défauts, des harmoniques apparaissent dans les courants du moteur. Dans [23], il est proposé un modèle dans le repère (d-q) où sont modélisés ces défauts. Ce modèle est donné comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = -ai_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \phi_{dr} + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} + \Gamma_d(w) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -ai_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P \phi_{dr} \Omega + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} + \Gamma_q(w) \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{dr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{PL_m}{L_r J} i_{qs} \phi_{dr} - \frac{f}{J} \Omega - \frac{T}{J} \end{array} \right. \dots\dots\dots (III.21)$$

$$\omega_s = P\Omega + \frac{L_m}{\tau_r \phi_{dr}} i_{qs}$$

Où :

$$a = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right). \quad \sigma \text{ est le coefficient de dispersion, donné par: } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Les termes $\Gamma_d(w)$ et $\Gamma_q(w)$ représentent les effets des défauts et sont donnés par :

$$\Gamma_d(w) = a Q_d w - \omega_s Q_q w + Q_d S w$$

$$\Gamma_q(w) = a Q_q w + \omega_s Q_d w + Q_q S w$$

w est l'état exogène du système utilisé pour modéliser les harmoniques générées par les défauts. Sa dynamique est donnée comme suit :

$$\dot{w} = Sw, \quad w \in \mathbb{R}^{2N}$$

$$S = \text{diag}(S_i),$$

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i \\ -\omega_i & 0 \end{bmatrix}, i = 1, \dots, N.$$

ω_i sont les pulsations des harmoniques générées par les défauts rotoriques et statoriques.

N est le nombre des harmoniques générées par les défauts.

6.1 Reconstruction des défauts

Considérons le système (III.21), où les courants i_{ds} , i_{qs} et la vitesse Ω sont supposés mesurables. Afin de reconstruire (estimer) les effets des défauts $\Gamma_d(w)$ et $\Gamma_q(w)$, nous utilisons l'observateur par modes glissants suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\hat{i}_{ds}}{dt} = -a\hat{i}_{ds} + \hat{\omega}_s i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \hat{\phi}_{dr} + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} - u_d \text{sign}(s_d) \\ \frac{d\hat{i}_{qs}}{dt} = -a\hat{i}_{qs} - \hat{\omega}_s i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P \hat{\phi}_{dr} \Omega + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} - u_q \text{sign}(s_q) \\ \frac{d\hat{\phi}_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \hat{\phi}_{dr} \\ \hat{\omega}_s = P\Omega + \frac{L_m}{\tau_r \hat{\phi}_{dr}} i_{qs} \end{array} \right. \dots\dots\dots (III.22)$$

Où : $\hat{i}_{ds}, \hat{i}_{qs}$ sont les courants statoriques estimés et $\hat{\phi}_{dr}$ est le flux estimé. $u_d > 0$ et $u_q > 0$ sont des paramètres de conception. s_d et s_q sont les surfaces de glissement données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} s_d = \hat{i}_{ds} - i_{ds} \\ s_q = \hat{i}_{qs} - i_{qs} \end{array} \right.$$

6.2 Analyse de la convergence de l'observateur

Les erreurs d'estimation des courants et du flux sont définis comme suit : $e_d = s_d = \hat{i}_{ds} - i_{ds}$, $e_q = s_q = \hat{i}_{qs} - i_{qs}$, $e_\phi = \hat{\phi}_{dr} - \phi_{dr}$. Les dynamiques des erreurs d'estimation sont données comme suit :

$$\begin{cases} \frac{de_d}{dt} = -a e_d + (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} e_\phi - \Gamma_d(w) - u_d \text{sign}(e_d) \\ \frac{de_q}{dt} = -a e_q - (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P\Omega e_\phi - \Gamma_q(w) - u_q \text{sign}(e_q) \\ \frac{de_\phi}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} e_\phi \end{cases} \dots\dots\dots (III.23)$$

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} e_q^2$$

En dérivant V par rapport au temps on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e_d (-a e_d + (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} e_\phi - \Gamma_d(w) - u_d \text{sign}(e_d)) \\ &\quad + e_q (-a e_q - (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P\Omega e_\phi - \Gamma_q(w) - u_q \text{sign}(e_q)) \end{aligned}$$

En choisissant:

$$\begin{aligned} u_d &> \left| -a e_d + (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} e_\phi - \Gamma_d(w) \right|_{\max} \\ u_q &> \left| -a e_q - (\hat{\omega}_s - \omega_s) i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P\Omega e_\phi - \Gamma_q(w) \right|_{\max} \end{aligned}$$

La dérivée de V devient :

$$\frac{dV}{dt} \leq 0$$

Ceci signifie que le mode glissant est atteint, c-à-dire : $\dot{e}_d = e_d = 0$ et $\dot{e}_q = e_q = 0$. Par conséquent les équations (III.23) deviennent :

$$+(\hat{\omega}_s - \omega_s)i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} e_\phi - \Gamma_d(w) - u_d \text{sign}(e_d) = 0 \quad \dots\dots\dots (III.24)$$

$$-(\hat{\omega}_s - \omega_s)i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P\Omega e_\phi - \Gamma_q(w) - u_q \text{sign}(e_q) = 0 \quad \dots\dots\dots (III.25)$$

$$\frac{de_\phi}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} e_\phi \quad \dots\dots\dots (III.26)$$

L'équation (III.26) montre que e_ϕ tend vers zéro quand $t \rightarrow \infty$, alors $\hat{\omega}_s \rightarrow \omega_s$, donc les estimés des défauts sont donnés comme suit :

$$\hat{\Gamma}_d(w) = -u_d \text{sign}_{e_q}(e_d)$$

$$\hat{\Gamma}_q(w) = -u_q \text{sign}_{e_q}(e_q)$$

La fonction sign est approximée par la fonction tangente hyperbolique.

6.3 Résultats de simulation de la machine asynchrone dans le repère (d-q) par application de l'observateur par modes glissants

Les paramètres de l'observateur utilisés dans les simulations sont : $u_d = u_q = 26000$.

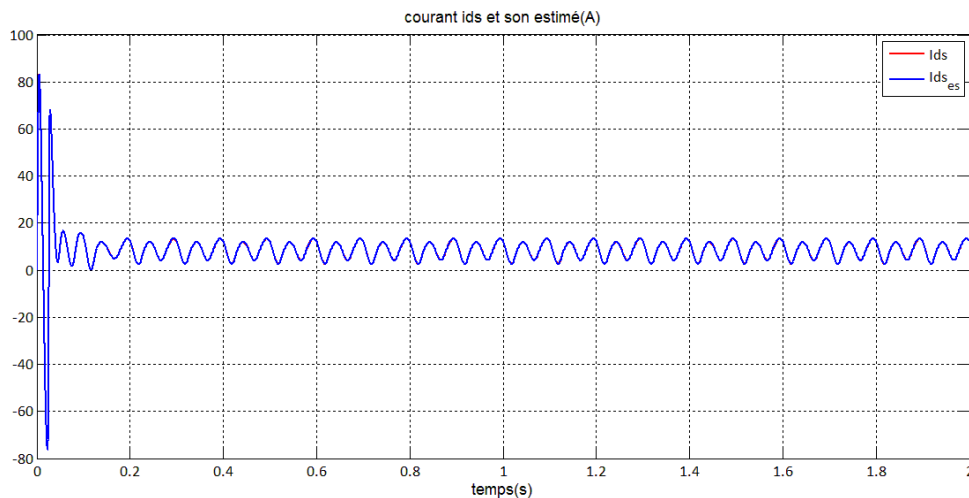


Figure III.20 : Courant statorique I_{ds} et son estimé

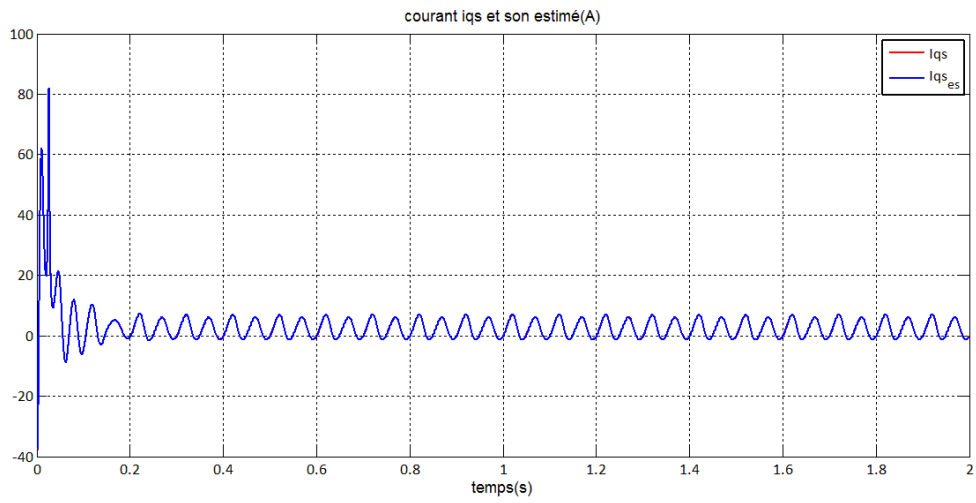


Figure III.21 : Courant statorique I_{qs} et son estimé

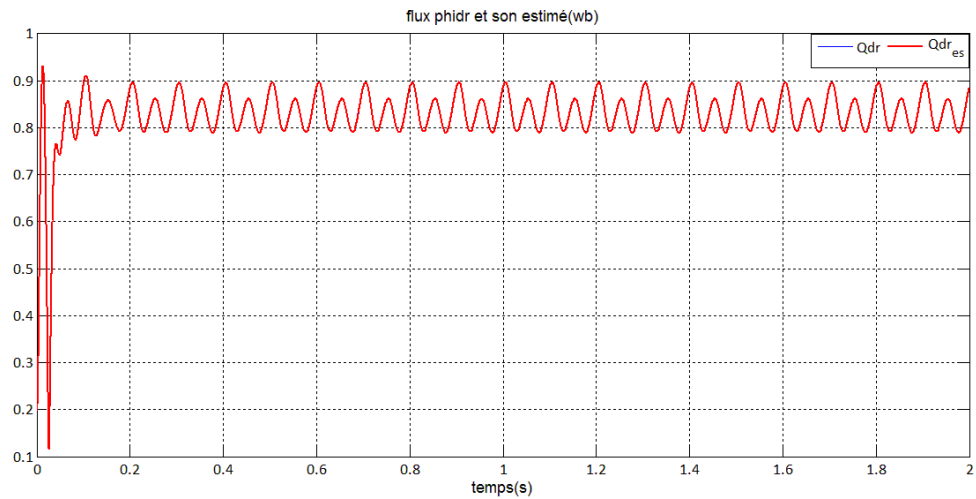


Figure III.22 : Flux et son estimé

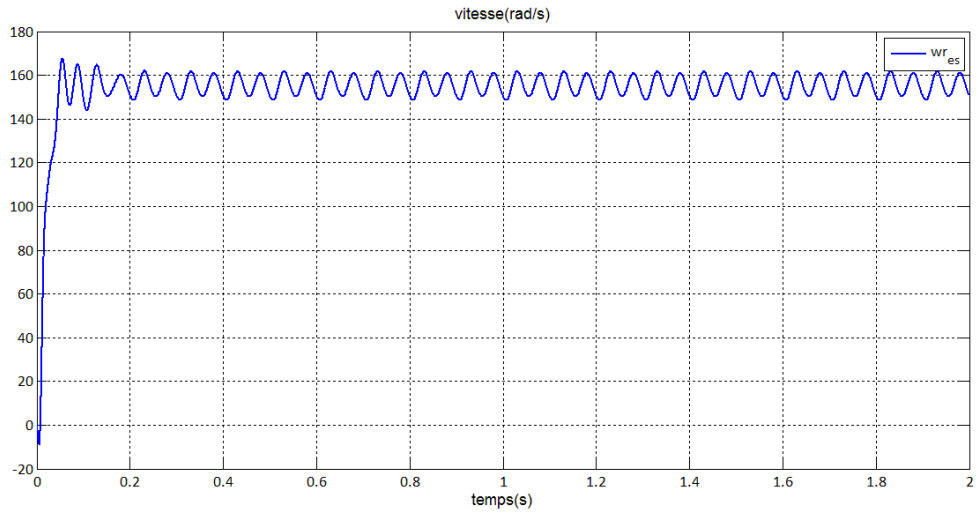


Figure III.23: La vitesse de rotation

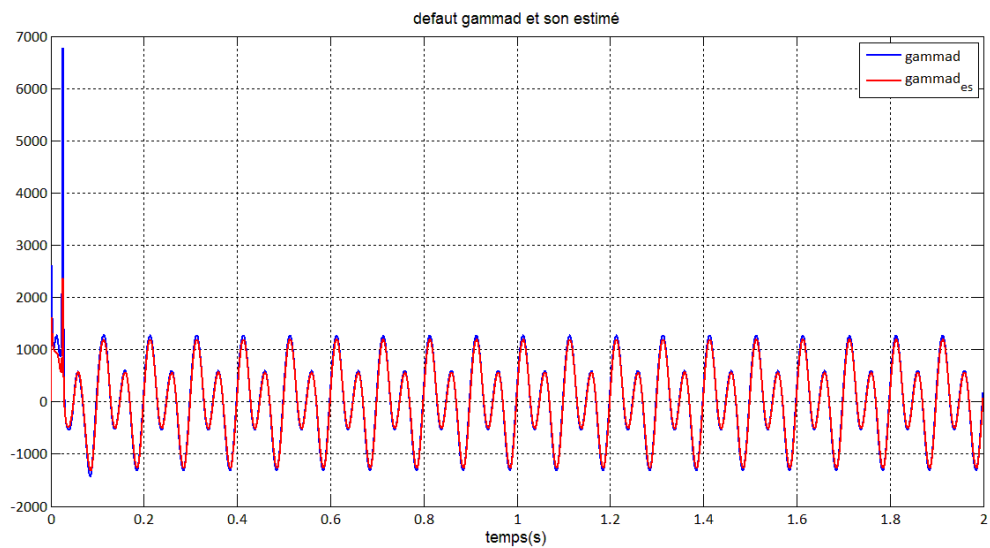


Figure III.24 : Premier défaut et son estimé

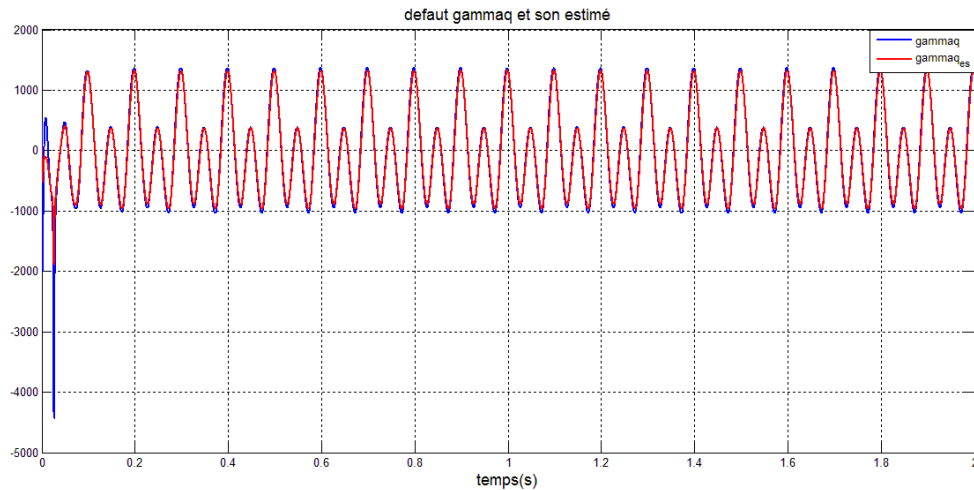


Figure III.25 : Deuxième défaut et son estimé

Interprétation des résultats

D'après les figures III.20, III.21, III.22, III.23, III.24, III.25, nous constatons que les courants estimés par l'observateur convergent vers leurs valeurs réelles. Aussi, les défauts estimés sont analogues aux valeurs injectés. Alors, la méthode proposée par [23] permet la détection et la reconstruction des défauts.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de la machine asynchrone sous forme de représentation d'état dans deux repères qui sont le repère (d-q) et le repère (α - β) ainsi que les défauts pouvant affecter cette machine. La première application consiste à détecter les variations des grandeurs statoriques et rotoriques. Les perturbations considérées sont les variations du couple, des frottements ainsi que l'inertie. L'observateur mis en œuvre dans cette application permet la détection sauf que l'isolation ne pourra être effectuée qu'avec la jonction d'une méthode dédiée à la localisation telle que les approches à base de logique floue ou du traitement du signal. La deuxième application a permis la reconstruction des harmoniques dues aux défauts stator et rotor, ceci permettra dans le cas d'un système avec commande la reconfiguration de celle-ci afin de ramener le système à son fonctionnement nominal ou à un fonctionnement dégradé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié la détection, la localisation et la reconstruction de défauts à base d'observateurs par modes glissants appliqués à la machine asynchrone.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les approches utilisées pour le diagnostic des systèmes technologiques, particulièrement les méthodes se basant sur les modèles mathématiques.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié quelques observateurs dédiés au diagnostic de défauts pour les systèmes linéaires et non linéaires. Nous avons focalisé notre étude sur les observateurs par modes glissants.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine asynchrone afin de réaliser son diagnostic à base d'observateurs par modes glissants. Des résultats satisfaisants en utilisant l'observateur proposé par [24] ont été obtenus pour la détection des variations statoriques et rotoriques. Pour la localisation nous proposons pour un travail futur d'utiliser la transformée en ondelettes ou la discrimination floue ce qui permettra une meilleure différenciation entre les défauts. L'utilisation de la méthode proposée par [23] permet d'avoir une reconstruction des harmoniques qui sont dû aux défauts statoriques et rotoriques, cette reconstruction peut être alors utilisée pour la synthèse d'une commande tolérante.

Le sujet est loin d'être épuisé. Plusieurs problèmes restent encore posés, nous proposons comme perspectives de prospecter d'autres observateurs afin de comparer leurs performances à ceux développés par modes glissants pour cette même application.

Annexe I :

Parametres de la machine

Puissance nominale 1.5 Kw

Tension nominale : 220/380 v

Rendement nominal : 0.78

Facteur de puissance nominal : 0.80

Vitesse nominale : 1420 tr/mn

Frequence nominale : 50 Hz

Resistance rotorique (R_r) : 3.805 Ω

Resistance statorique (R_s) : 4.850 Ω

Inductance cyclique du stator (L_s) : 0.274H

Inductance cyclique du rotor (L_r) : 0.274H

Inductance mutuelle cyclique (L_m) : 0.258H

Nombre de paire de poles (p) : 2

Moment d'inertie (j) : 0.031 kg.m²

Coefficient de frottement (K_f) : 0.001136 kg.m²/s

Les matrices de distribution

$$E_{f_1}(X) = \frac{\partial g(X,U,d,f)}{\partial R_s} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} x_1 \\ -\frac{1}{\sigma L_s} x_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$E_{f_2}(X) = \frac{\partial g(X,U,d,f)}{\partial L_s} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 x_1 + a_1 x_3 + pK_1 x_4 x_5 + e_1 V_1 \\ -\gamma_1 x_2 + a_1 x_4 + pK_1 x_3 x_5 + e_1 V_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$E_{f_3}(X) = \frac{\partial g(X,U,d,f)}{\partial R_r} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} x_1 + \frac{L_m}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} x_3 \\ -\frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} x_2 + \frac{L_m}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} x_4 \\ \frac{L_m}{L_r} x_1 - \frac{1}{L_r} x_3 \\ \frac{L_m}{L_r} x_2 - \frac{1}{L_r} x_4 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$E_{f_4}(X) = \frac{\partial g(X,U,d,f)}{\partial L_r} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\gamma_2 x_1 + a_2 x_3 + pK_2 x_4 x_5 + e_2 V_1 \\ -\gamma_2 x_2 + a_2 x_4 + pK_2 x_3 x_5 + e_2 V_2 \\ -\frac{L_m R_r}{L_r^2} x_1 + \frac{R_r}{L_r^2} x_3 \\ -\frac{L_m R_r}{L_r^2} x_2 + \frac{R_r}{L_r^2} x_4 \\ -\frac{pL_m}{jL_r^2} (x_3 x_2 - x_1 x_4) \end{bmatrix};$$

$$\gamma_1 = -\frac{R_s L_r^2}{(L_r L_s - L_m^2)^2} - \frac{R_r L_m^2}{(L_r L_s - L_m^2) L_r}; \quad \gamma_2 = \frac{R_s (L_r L_s - L_m^2) - R_s L_r L_s}{(L_r L_s - L_m^2)^2} - \frac{R_r L_m^2 (2L_r L_s - L_m^2)}{(L_r L_s - L_m^2)^2 L_r^2};$$

$$K_1 = K_2 = \frac{L_m L_r}{(L_r L_s - L_m^2)^2}; \quad a_1 = \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2)^2}; \quad a_2 = \frac{R_r L_m}{(L_r L_s - L_m^2) L_r^2} - \frac{L_m R_r L_s}{L_r (L_r L_s - L_m^2)^2};$$

$$e_1 = \frac{L_r^2}{(L_r L_s - L_m^2)^2}; \quad e_2 = \frac{1}{(L_r L_s - L_m^2)} - \frac{L_r L_s}{(L_r L_s - L_m^2)^2};$$

$$E_d(X) = \frac{\partial g(x, u, d, f)}{\partial d} \Big|_{d=0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j_0} & -\frac{x_5}{j_0} & -\frac{pLm}{j_0 Lr} (x_3 x_2 - x_1 x_4) + \frac{C_{r0}}{j_0^2} + \frac{K_{f0}}{j_0^2} x_5 \end{bmatrix}$$

La dynamique des erreurs d'observation est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a e_3 + K p x_5 e_4 - \lambda_1^T I_s \\ \dot{e}_2 = a e_4 + K p x_5 e_3 - \lambda_2^T I_s \\ \dot{e}_3 = -c e_3 + p x_5 e_4 - \lambda_3^T I_s \\ \dot{e}_4 = -c e_4 + p x_5 e_3 - \lambda_4^T I_s \\ \dot{e}_5 = d(x_2 e_3 - x_1 e_4) + q_1 e_5 - \lambda_5^T I_s \end{cases}$$

Pour déterminer les gains d'observateur, on utilise la fonction Lyapunov définie positive :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad \text{où} \quad S = Q(e_1, e_2)^T$$

Q est matrice régulière telle que $S=0 \Rightarrow e_1 = e_2 = \dot{e}_1 = \dot{e}_2 = 0$.

La condition d'attractivité de la surface $S=0$ est donnée par :

$$\dot{V} = S^T \frac{\partial S}{\partial t} < 0 \quad \forall S \neq 0$$

En posant :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1^T \\ \lambda_2^T \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix};$$

Alors :

$$\dot{V} = S^T \begin{bmatrix} a e_3 + K p x_5 e_4 \\ a e_4 + K p x_5 e_3 \end{bmatrix} - S_1 \delta_1 \text{sign}(S_1) - S_2 \delta_2 \text{sign}(S_2) + S^T \dot{Q} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

Si Q s'écrit en fonction de la vitesse, il est possible de négliger le terme \dot{Q} .

Soit alors :

$$Q = \frac{1}{(a^2 + (K p x_5)^2)} \begin{bmatrix} a & -K p x_5 \\ K p x_5 & a \end{bmatrix}$$

Ainsi

$$\dot{V} = S_1(e_3 - \delta_1 \text{sign}(S_1)) - S_2(e_4 - \delta_2 \text{sign}(S_2))$$

Et les gains δ_1 et δ_2 sont déterminés de manière à assurer la convergence de l'erreur d'estimation vers zéro. Par conséquent, ils doivent vérifier les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \delta_1 > |e_3|_{max} \\ \delta_2 > |e_4|_{max} \end{cases}$$

Sur la surface de glissement, $S=0$ et $\dot{S} = 0$, d'où $\begin{cases} \dot{e}_1 = 0 \\ \dot{e}_2 = 0 \end{cases}$

Ainsi on trouve :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = Q^{-1} \left[\begin{pmatrix} e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix} I_s \right]$$

Le vecteur équivalent, sur la surface de glissement, est donné par :

$$\tilde{I}_s = \begin{pmatrix} \frac{e_3}{\delta_1} \\ \frac{e_4}{\delta_2} \end{pmatrix}$$

La dynamique réduite sur la surface est alors donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = \left[\left(-c - \frac{\lambda_{31}}{\delta_1} \right) \left(-px_5 - \frac{\lambda_{32}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \\ \dot{e}_4 = \left[\left(px_5 - \frac{\lambda_{41}}{\delta_1} \right) \left(-c - \frac{\lambda_{42}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \\ \dot{e}_5 = \left[\left(dx_2 - \frac{\lambda_{51}}{\delta_1} \right) \left(-dx_1 - \frac{\lambda_{52}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} - q_1 e_5 \end{cases}$$

Ainsi, en posant :

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda_{51}}{\delta_1} & \frac{\lambda_{52}}{\delta_2} \end{bmatrix} = d[x_2 \quad -x_1]$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{31} & \lambda_{32} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & -px_5 \\ px_5 & -c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix}$$

Alors :

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = -q_3 e_3 \\ \dot{e}_4 = -q_4 e_4 \\ \dot{e}_5 = -q_1 e_5 \end{cases}$$

Afin d'avoir une dynamique de l'erreur d'observation stable, les conditions suivantes doit être satisfaite :

$$\begin{cases} q_1 > 0 \\ q_3 > 0 \\ q_4 > 0 \end{cases}$$

Annexe II

Modèle sain de la machine asynchrone

Dans le repère (d-q)

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \phi_{dr} + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -a i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P \phi_{dr} \Omega + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{dr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{P L_m}{L_r J} i_{qs} \phi_{dr} - \frac{f}{J} \Omega - \frac{T}{J} \end{cases}$$

$$\text{Où } \omega_s = P\Omega + \frac{L_m}{\tau_r \phi_{dr}} i_{qs}$$

$$a = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) ; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} ;$$

L_m, L_r, L_s sont les inductances respectivement mutuelle, rotorique et statorique. ω_s est la pulsation statorique, τ_r constante du temps ($\frac{L_r}{R_r}$). P nombre de pair de pôles, J est le moment d'inertie, T c'est le couple résistant, f est les frictions.

Modèle avec défauts de la machine asynchrone :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \phi_{dr} + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} + \Gamma_d(w) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -a i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} P \phi_{dr} \Omega + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} + \Gamma_q(w) \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{dr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{P L_m}{L_r J} i_{qs} \phi_{dr} - \frac{f}{J} \Omega - \frac{T}{J} \end{cases}$$

$$\omega_s = P\Omega + \frac{L_m}{\tau_r \phi_{dr}} i_{qs}$$

Où :

$$a = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right). \sigma \text{ est le coefficient de dispersion, donné par: } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Les termes $\Gamma_d(w)$ et $\Gamma_q(w)$ représentent les effets des défauts sont donnés par :

$$\Gamma_d(w) = a Q_d w - \omega_s Q_q w + Q_d S w$$

$$\Gamma_q(w) = a Q_q w + \omega_s Q_d w + Q_q S w$$

w est l'état du système exogène utilisé pour modéliser les harmoniques générées par les défauts. Sa dynamique est donnée comme suit :

$$\dot{w} = S w, \quad w \in \mathbb{R}^{2N}$$

$$S = \text{diag}(S_i),$$

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i \\ -\omega_i & 0 \end{bmatrix}, i = 1, \dots, N.$$

ω_i sont les pulsations des harmoniques générées par les défauts rotoriques et statoriques.

N est le nombre des harmoniques générées par les défauts.

Reference

- [1] T.J. Harris, C. Seppala, and L.D. Desborough. A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. *Journal Process of Control*, 9(1):1–17, 1999.
- [2] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3):293–311, 2003.
- [3] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. part II: Qualitative models-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3):313–326, 2003.
- [4] G. Zwingelstein «*Diagnostic des Défaillances*». serie Diagnostic et Maintenance, Paris, Hermès, 1995.
- [5] R. Isermann, “process fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods” *Automatic*, volume 20, p 387-404, année 1984.
- [6] R. Isermann . «Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods: An Introduction». *Control Eng. Practice*, vol. 5, n° 5, 1997, pp. 639-652.
- [7] R. Isermann. «Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods». *In : IFAC SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp. 597-612.- Espoo, Finland, June 1994.
- [8] A. Mazhoud, «Détection et localisation des pannes dans le système de commande : Approches à base d'observateurs » Thèse de Magister, ENP, Alger, 2000.
- [9] N. Oucief , ‘Diagnostic à base d'observateurs de défauts dans les systèmes de commandes, application au pendule inversé’ Thèse de Magister EMP, Alger, 2004
- [10] D. Maquin, J. Ragot « diagnostic des systèmes linéaires » Hermes Science Europe, 2000
- [11] H. Henry, « Diagnostic et contrôle de cohérence des systèmes multi-variables incertains » thèse de Doctorat, Université Bordeaux1, 1999.

- [12] R.Hermann and A.Krener .Nonlinear controllability and observability, IEEE Transactions on Automatic control 728 740, Octobre 1977.
- [13] C.Edwards, S.Spurgeon et Patton ‘sliding mode observers for fault detection and isolation ’, automatica, Vol 36 pp541-553, 2000
- [14] R. Alvarez Salas. ‘Développement de lois de commandes avec observateurs pour la machine asynchrone ’ thèse de doctorat INPG, Grenoble,2002.
- [15] A. Alissandri, T.Hawkinson, A.j.Healy et G.veruggio, ‘Robust model-based fault diagnosis for Unmanned UderwaterVehicules using siliding mode observers’ 11th international symposium on unmanned Under watered Submersible Technology, 1999
- [16] C.Join, « diagnostic des systèmes non linéaires, contribution aux méthodes de découplage »Thèse de Doctorat, spécialité Automatique, Université Poincaré, Nancy, 2002.
- [17] R.N. Clark et al “Detection Instrument Malfunctions in control Systems” IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-11, 1975
- [18] D.Hengy, et P.M.Frank, Component failure detection via nonlinear state observers. Proc. of the IFAC Workshop on Fault Detection and Safety in Chemical Plants, p. 153-157, Kyoto, Japan. 1986
- [19] R.Seliger, et P.M. Frank, Fault diagnosis by disturbance decoupled nonlinear observers. Proc. of the 30th IEEE-CDC, vol. 3, p. 2248-2253, December 11-13, Brighton, UK .1991
- [20] K. Adjallah, *Contribution au diagnostic de systèmes par observateur d'état*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. 1993
- [21] Y. Hamed “Contribution à la surveillance et au diagnostic des machines électriques”. Thèse de doctorat. Département de génie électrique. Ecole doctorale SPI-EEA de Lyon. Juillet 1995.
- [22] H. Razik et G. Didier, ‘Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone’ , Université Henry Poincaré, Nancy1, 7 Janvier 2003.

[23] N. Djeghali, M. Ghanes, S. Djennoune, J.P. Barbotet M. Tadjine, Fault tolerant control for induction motors using sliding mode observers, *The 11th International Workshop On Variable Structure Systems*, Mexico City, pp. 190-196, 2010.

[24] T.M. Laleg “ Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d’Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts : Application à la machine Asynchrone et au Robot SCARA. Thèse d’Ingéniorat, ENP d’Alger 2004.