

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Ecole National Polytechnique

Département du Génie Electrique

Spécialité Automatique

*Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique*

THEME

**DIAGNOSTIC DE LA MACHINE
ASYNCHRONE A BASE D'OBSERVATEURS**

Etudié par :

M^{elle} BENZAOUI Wafa

Proposé et dirigé par :

M^r. M.S. BOUCHERIT

Juin 2007

Ecole Nationale Polytechnique, 10 Av. Hassan Badi, El Harrach, Alger, Algérie

Remerciement

Je remercie en premier lieu DIEU le tout puissant qui m'avoir donné la bonne foi et le courage pour accomplir ce modeste travail ainsi que mes parents

L'aboutissement à la réalisation d'un travail est le fruit de toutes les années de formation, c'est donc à tous mes enseignants que je voudrai d'abord exprimer mon respect et gratitude.

Mes sincères remerciements d'abord à mon promoteur « M.S. BOUCHERIT » qui a suivi l'évolution de mon projet, surtout, pour son aide précieuse, je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance.

Je tiens à remercier également les membres de jury pour avoir accepté de jurer ce mémoire.

J'adresse mes vifs remerciements, mes amies et tous qui m'aident pour leurs encouragements chacun de son nom.

Wafa

Dédicace

*Louange au dieu. Il n'est point d'autre dieu que lui. Nul
autre n'est digne d'adoration.*

*Si je vivrais je vis pour elle et si je mourrais je meurs et je
l'aime à le plus cher être sur la terre **Ma mère***

*A le symbole de sacrifice et courage
Mon père*

*A mes chères frères : **Med Tayeb, Sofiane et Tarek.***

*A ma chère sœur : **Soumia et sa petite famille.***

*A toutes mes amies et collègues : **Karima, Merieme,
Mounira, Fathya, Naziha, Choubeila, Amira...***

A ceux avec qui je partage de bons souvenirs

A tous que j'aime et tous qui m'aiment

Wafa

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I .<i>Panorama des défauts et méthodes de diagnostic</i>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Défauts de la machine asynchrone.....	5
I.2.1. Défauts statoriques.....	6
I.2.1.1. Court-circuit entre spires	6
I.2.1.2. Court-circuit entre phases.....	7
I.2.2. Défauts rotoriques	7
I.2.2.1. Ruptures de barres.....	8
I.2.2.2. Ruptures d'anneaux.....	8
I.2.2.3. Excentricité statique et dynamique.....	8
I.2.3. Défauts mécaniques	9
I.2.4. Défauts divers.....	9
I.3. Terminologie.....	10
I.4. Critère de performance d'un système de diagnostic.....	11
I.5. Classification des méthodes de diagnostic.....	11
I.5.1. Méthodes de diagnostic sans modèle.....	13
I.5.1.1. Surveillance avec outils statistiques.....	13
I.5.1.1.1. Test de franchissement de seuils.....	13
I.5.1.1.2. Test de moyenne.....	13
I.5.1.1.3. Test de variance.....	14
I.5.1.2. Surveillance par reconnaissance des formes	14
I.5.1.2.1. Reconnaissance des formes par une approche floue.....	14
I.5.1.2.2. Reconnaissance des formes par réseaux de neurones.....	14
I.5.2. Méthodes de diagnostic avec modèle	15
I.5.2.1. Les méthodes basées sur l'approche mono-signal.....	15
I.5.2.1.1. Redondances physiques.....	15

I.5.2.1.2. Analyse spectrale	16
I.5.2.1. L'approche multi-signaux ou redondances analytiques.....	16
I.5.2.1.1. Espace de parité	16
I.5.2.1.2. Observateurs	17
I.5.2.1.3. Estimation paramétrique.....	17
I.6. Les différentes étapes de diagnostic d'un système	18
I.6.1. Acquisition de données	18
I.6.2. Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts.....	19
I.6.3. Etape de détection.....	19
I.6.4. Etape de localisation.....	19
I.6.5. Etape de prise de décisions.....	20
I.7. Conclusion	21
Chapitre II : <i>Modélisation de la machine asynchrone</i>	
II.1. Introduction.....	23
II.2. Hypothèses.....	23
II.3. Equations électriques.....	24
II.3.1. Equations statoriques.....	24
II.3.2. Equations rotoriques.....	25
II.4. Modèle de Park.....	27
II.4.1. Modèle triphasé-triphasé.....	27
II.4.2. Transformation de Park.....	28
II.4.3. Choix du référentiel.....	30
II.4.4. Equations dans la repère (d,q) tournant à la vitesse ω	31
II.4.5. Equation mécanique.....	31
II.4.6. Mise sous forme d'état	32
II.4.7. Résultats de simulation.....	34
II.4.7.1. Evolution des paramètres en régime sain.....	34
II.4.7.2. Evolution des paramètres en régime de défauts	37
II.5. Conclusion	41
Chapitre III : <i>Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par les méthodes à base d'observateurs</i>	
III.1. Introduction	43

III.2. Observateurs dédiés au diagnostic des défauts.....	43
III.2.1. Observateur proportionnel	43
III.2.2. Observateur de Walcott et Žak[1].....	47
III.3. Synthèse d'observateurs et application sur la MAS.....	48
III.3.1. Observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants.....	48
III.3.2. Observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.....	58
III.3.3. Comparaison entre les deux approches	65
III.4. Conclusion	66
 Conclusion générale	 67

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître.

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

Donc, c'est par sa robustesse, coût faible, fiabilité, facilité à entretenir et par sa souplesse, qu'il y a un intérêt croissant pour l'utilisation de la machine asynchrone dans les entraînements électriques. Son domaine d'application est déjà très vaste; nous le trouvons dans la traction ferroviaire, la propulsion électrique des navires, le pompage, la ventilation, les machines outils, les laminoirs les machines à papier et la voiture électrique entre autres.

De nombreux dysfonctionnements peuvent altérer la sécurité, la fiabilité et la disponibilité d'un système. C'est pourquoi la conception des systèmes de détection occupe une place de plus en plus importante dans la réalisation des systèmes automatisés. Par la variété et la nature des concepts et des outils qu'il utilise, le diagnostic fait maintenant parti du domaine de l'automatique moderne.

Durant maintenant plus d'une quarantaine d'années, des études et des recherches ont été menées sur la façon dont on pourrait détecter une panne, une défaillance et d'y comprendre la relation cause à effet. Ainsi, on pourrait améliorer la fiabilité de la machine asynchrone, donc augmenter sa durée de vie.

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses, elles se répartissent en deux grandes familles : méthodes sans modèle, et méthodes avec connaissance à priori d'un modèle physique. Dans la première famille l'approche la plus classique, est celle basée sur l'analyse des vibrations. Récemment de nouvelles approches, fondées sur les nouvelles techniques de l'intelligence artificielle sont développées.

Les méthodes à base de modèle, reposent sur le suivi des variables d'état de la machine, ou le suivi des paramètres de la machine afin de générer un signal nommé résidu. Le résidu est un indicateur de défaut, il est nul en régime sain et s'écarte de zéro en présence de défaut. Plusieurs approches sont regroupées dans cette famille, la plus efficace est l'approche à base d'observateurs. Son principe est d'étudier la cohérence comportementale du modèle vis-à-vis du système réel. En régime sain.

L'observateur permet de reconstituer le vecteur d'état et l'estimation de la sortie du système, à partir de la connaissance de la commande et de la sortie de celui-ci. Cette estimation en régime sain est comparée à celle obtenue en temps réel. Dans le but de générer les résidus.

Nous présentons dans ce travail, la détection de défauts de la machine asynchrone à base d'observateurs. Le travail comporte trois chapitres :

Le premier chapitre présente les différents défauts pouvant altérer le fonctionnement de la machine asynchrone. Puis on donne une classification des méthodes de diagnostic et une description succincte de chaque méthode.

La modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park fait l'objet du deuxième chapitre. Ce modèle facilite la synthèse d'observateurs.

Dans le troisième chapitre, nous présentons des observateurs utilisés dans le domaine de diagnostic. Puis nous mettrons l'accent sur deux observateurs : l'observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants, et l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.

En dernier lieu, nous essayons de donner une synthèse du travail effectué. C'est la conclusion générale.

Chapitre I

Panorama des défauts et méthodes de diagnostic

I.1. Introduction

Malgré la robustesse des machines asynchrones, elles présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré. Les défauts pouvant altérer le bon fonctionnement de la machine asynchrone peuvent être prévisibles ou intempestifs ; leurs causes sont très variées.

Les méthodes de surveillance sont généralement divisées en deux groupes : méthodologies de surveillance avec modèle et sans modèle.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un panorama des défauts, et de présenter les techniques les plus courantes en surveillance d'équipements industriels. Dans la littérature associée à ce domaine, on peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est pourquoi on a donné des définitions des mots clés.

I.2. Défauts de la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage d'écureuil est connue par sa robustesse, mais elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique.

En général, ces défauts peuvent être classés en quatre catégories de base :

- Défauts statoriques.
- Défauts rotoriques.
- Défauts mécaniques.
- Défauts d'origine divers.

Ces défauts produisent les symptômes ci-dessous [17]:

- Déséquilibre des forces électromotrices et des courants de lignes.
- Augmentation des couples pulsatoires.
- Dégradation du couple moyen de la machine.
- Augmentation des pertes et réduction du rendement.
- Echauffement excessif.

La figure ci-après présente l'étude statistique des pannes, pouvant altérer le fonctionnement normal de la machine asynchrone :

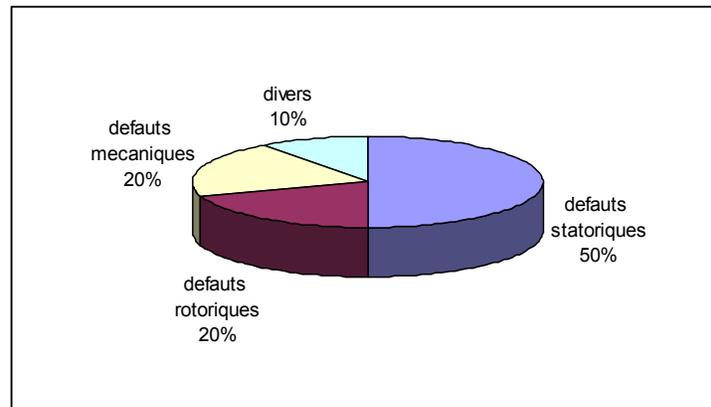


Fig. I.1. Statistiques des pannes

I.2.1. Défauts statoriques

Les défauts statoriques sont principalement dus à un problème thermique ou électrique, parmi lesquels [17 ,7] :

- Un grand noyau du stator ou la température d'enroulements est élevé.
- Attachement lâché à la fin de l'enroulement.
- Contamination due à l'huile.
- Surtension, décharges électriques.
- Les fuites dans les systèmes de refroidissement.
- Dégradation des isolants.

Les défauts qui sont les plus récurrents peuvent être définis comme suit :

I.2.1.1. Court-circuit entre spires

Ce défaut entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique.[23] Les courts-circuits entre spires de la même phase apparaissent, soit au niveau des têtes de bobines, soit dans les encoches. [17]

I.2.1.2. Court-circuit entre phases

Il provoque un déséquilibre total des courants statoriques. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut.[17,23]

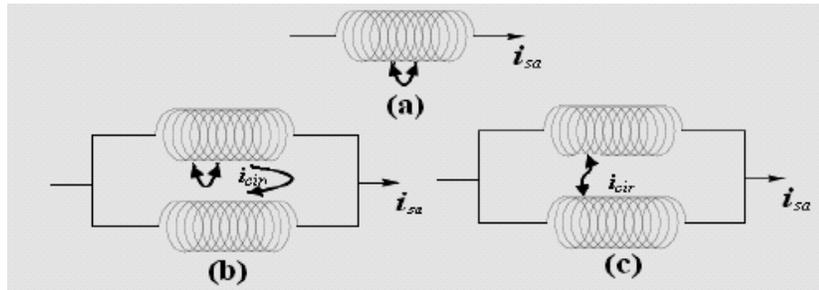


Fig. I.2. (a) court-circuit entre spires, (b) le courant de circulation, (c) court-circuit entre deux faisceaux

I.2.2. Défauts rotoriques

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion d'anneau de court circuit sont nombreuses [25]:

- Effort thermique due à l'échauffement de l'anneau du court-circuit et la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau).
- Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, l'excentricité de l'entrefer), bruits et vibration électromagnétiques.
- Effort dynamique dû au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi que les efforts cycliques.
- Effort environnemental causé par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit [23] :

I.2.2.1. Ruptures de barres

Un des défauts rotoriques les plus fréquents est la cassure ou rupture totale ou partielle d'une (s) barre (s) au niveau de la cage d'écureuil. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine.

I.2.2.2. Ruptures d'anneaux

Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

Suite à l'apparition de ces défauts, la machine continue à fonctionner, il est donc très difficile de détecter ces défaillances si la machine est en régime de défauts. Le courant qui conduit une barre cassée se répartit sur les autres barres, ces dernières seront surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et par la suite la rupture d'un nombre plus important de barres, dans la machine.

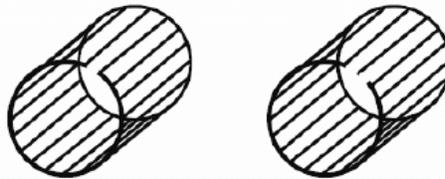


Fig. I.3. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

I.2.2.3. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). C'est le phénomène d'excentricité (statique et dynamique).

I.2.3. Défauts mécaniques

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont [23] :

- L'usure due au vieillissement.
- La température de fonctionnement élevée.
- La perte de lubrification.
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- Le défaut de montage.
- Les courants d'arbres.

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I.2.4. Défauts divers

Autres défauts peuvent se produire et provoquent une dérivation des performances de la machine. Nous pouvons citer les cas suivants [17]:

- Défauts de fixation.
- Engrenage endommagé.
- Excitation hydrodynamique.
- Défauts induits par un desserrage.

Chaque défaut se traduit par son image fréquentiel à travers le courant absorbé par la machine.

I.3. Terminologie

Pour mieux étayer nos propos, nous introduisons quelques définitions utilisées dans le domaine du diagnostic [18,7,20]:

- ◆ **Une anomalie** est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.
- ◆ **Une défaillance** est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique. Les défaillances sont classées selon leur origine en :

- ✦ **Défaillances capteur.** Ecart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.
- ✦ **Défaillances d'actionneur.** Incohérence entre les commandes et la sortie.
- ✦ **Défaillances du processus physique.** Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure ou des paramètres du modèle.
- ✦ **Défaillances du contrôleur.** Ecart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur et sa mesure.

- ◆ **Fonctionnement normal d'un système.** Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales.

- ◆ **Défaut.** C'est un processus anormal ou symptôme. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance donc de panne.

- ◆ **Une panne** est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

◆ **Une perturbation** consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, bon ou mal, représenté par un modèle de référence.

◆ **Un résidu** est un signal, mettant en évidence la présence d'un défaut. En général, en régime de fonctionnement normal, ce signal est statistiquement nul et s'écarte notablement de zéro en présence de défauts.

◆ **Un symptôme** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.

I.4. Critère de performance d'un système de diagnostic

Un système de diagnostic doit vérifier un ensemble de caractéristiques. Il doit permettre [33] :

◆ **La détectabilité**

Pouvoir détecter une défaillance particulière

◆ **La localisation**

C'est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est à dire localiser) plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soit détectables.

◆ **La sensibilité**

Elle caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

◆ **La robustesse**

C'est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du processus et des perturbations extérieures.

◆ **La rapidité de la détection**

Elle se définit d'elle-même ; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel.

I.5. Classification des méthodes de diagnostic [20, 17, 18]

Les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes, selon qu'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. La première classe se compose essentiellement de

deux techniques : méthodes de redondance physique et analytique et méthodes d'estimation paramétrique. La deuxième classe se divise en deux catégories : méthodes utilisant des outils statistiques et méthodes de reconnaissance des formes. Les tests sur les signaux d'acquisition, qui sont établis par les outils statistiques assurent la fonction détection de défaillances. Mais les techniques de surveillance par reconnaissance des formes sont capables de détecter et de diagnostiquer les défaillances.

La figure I.4 présente un panorama des différentes méthodes de diagnostic.

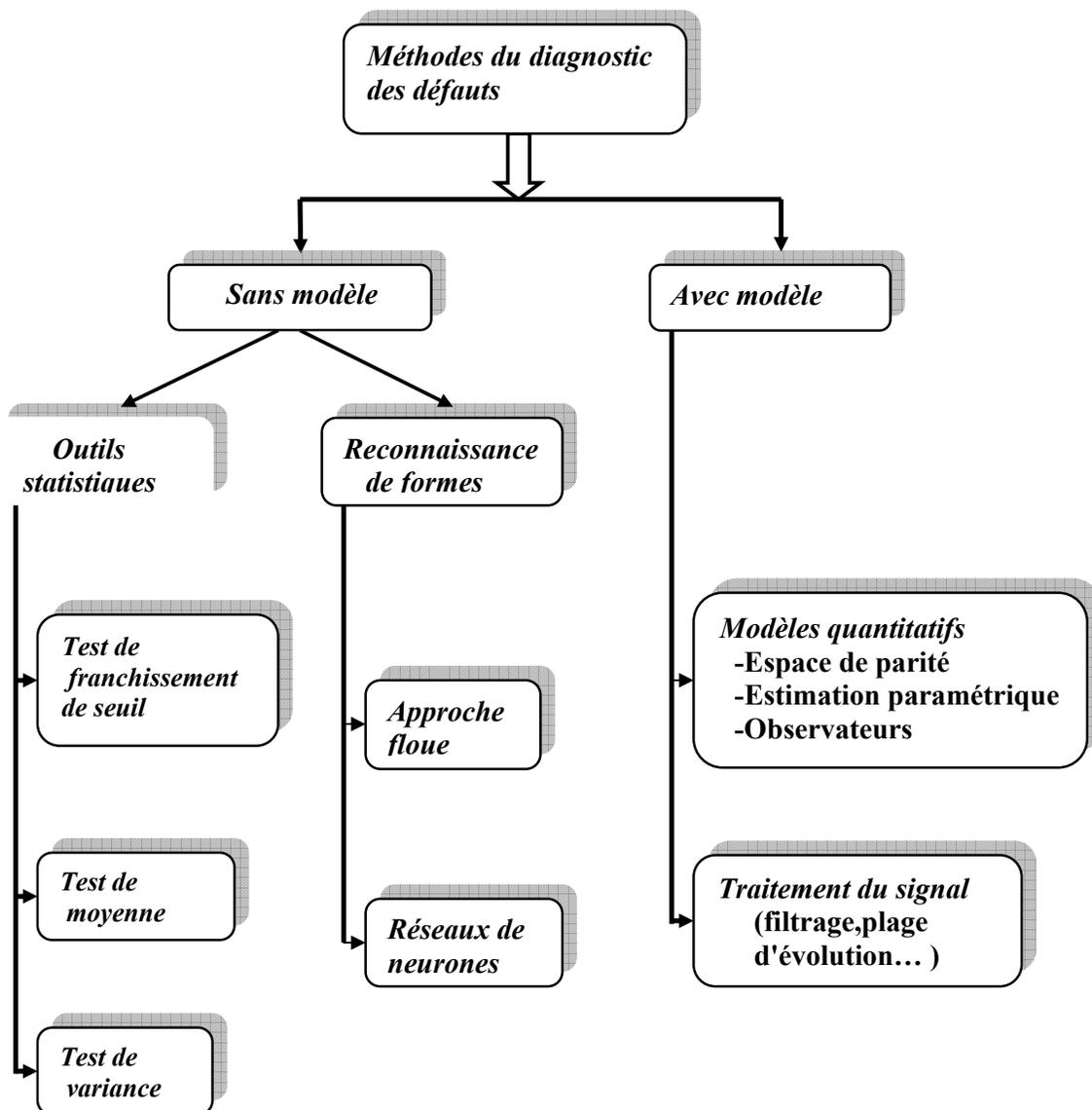


Fig. I.4. Méthodes du diagnostic des défauts.

I.5.1. Méthodes de diagnostic sans modèle

Il est souvent difficile de modéliser la dynamique des processus de manière exacte.[18]. Suite à une complexité ou à de nombreuses reconfigurations intervenants durant le processus de production. Deux types de surveillance opérationnelles sont configurés : surveillance avec des tests statistiques et surveillance par reconnaissance des formes.[36]

I.5.1.1. Surveillance avec outils statistiques

Cette méthode consiste à supposer que les signaux fournis par les capteurs possèdent certaines propriétés statistiques. On effectue alors quelques tests qui permettent de vérifier si ces propriétés sont présentes dans un échantillon des signaux mesurés de taille n . On considère que le signal mesuré est une variable aléatoire. Beaucoup de tests statistiques peuvent être appliquer, on va présenter que trois tests qui sont [36]:

Le traitement statistique du signal consiste à calculer les paramètres statistiques de certaines variables significatives du processus tels que les moments statistiques (moyenne, variance, ...), la somme cumulée, ... Chacune des valeurs statistiques est testée afin de détecter un défaut présent sur le signal.

I.5.1.1.1. Test de franchissement de seuils

C'est le plus simple des tests, il consiste à comparer ponctuellement les signaux avec des seuils préétablis. Une alarme est générée dès qu'un des signaux capteurs dépasse ce seuil. Ce type de méthode est très simple à mettre en oeuvre mais ne permet pas d'établir un diagnostic des défaillances. Cette méthode est aussi très sensible aux fausses alarmes.

I.5.1.1.2. Test de moyenne

Le test de comparaison est effectué sur la moyenne \hat{y} du signal contenu dans une fenêtre de n valeurs :

$$\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i$$

I.5.1.1.3. Test de variance

On peut également calculer la variance d'un signal. Tant que cette variance se situe dans une bande située autour de sa valeur nominale, l'évolution du système est supposée normale. La variance de l'échantillon est définie par :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t (y_i - \hat{y})^2$$

I.5.1.2. Surveillance par reconnaissance des formes

Cette approche permet d'avoir une relation d'un espace caractéristique vers un espace de décision, en associant un ensemble de mesures effectuées sur le système à des états de fonctionnement connus, de façon à minimiser le risque de mauvaise classification

La surveillance par reconnaissance des formes peut être réalisée par l'une des deux techniques : la première est la reconnaissance des formes par la logique floue et la deuxième est la reconnaissance des formes par réseaux de neurones. [36]

I.5.1.2.1. Reconnaissance des formes par une approche floue

En reconnaissance des formes par approche floue, les classes sont représentées par des sous-ensembles flous. Une fonction d'appartenance quantifie le degré d'appartenance $\lambda_i(x)$ de chaque vecteur \mathbf{x} à la classe α_i . La mise en oeuvre d'une méthode de classification floue implique deux étapes : la construction des fonctions d'appartenance et la définition des règles de décision.

I.5.1.2.2. Reconnaissance des formes par réseaux de neurones

Le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. Le réseau s'auto-organise, apprenant à relier les exemples montrés aux diagnostics. Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples

appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.[23]

I.5.2. Méthodes de diagnostic avec modèle [36,20]

Les méthodes de surveillance avec modèle ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle alors la défaillance c'est l'écart entre les deux.

On peut distinguer deux types d'approches suivant que l'on considère les mesures prises isolément les unes des autres ou qu'au contraire on présuppose des relations mathématiques les reliant. La première approche est connue sous le nom d'analyse mono signal, la deuxième est dénommée analyse multi-signaux ou redondance analytique.

I.5.2.1. Les méthodes basées sur l'approche mono-signal

I.5.2.1.1. Redondances physiques

Il s'agit de doubler ou tripler le nombre de capteurs. Si ces capteurs identiques placés dans le même environnement émettent des signaux identiques, on considère qu'ils sont dans un état de fonctionnement nominal et, dans le cas contraire, on considère qu'une défaillance capteur s'est produite dans au moins une des composantes.[11]

La simplicité de sa conception est un avantage mais cette méthode reste coûteuse à être mise en oeuvre et conduit à des installations encombrantes.

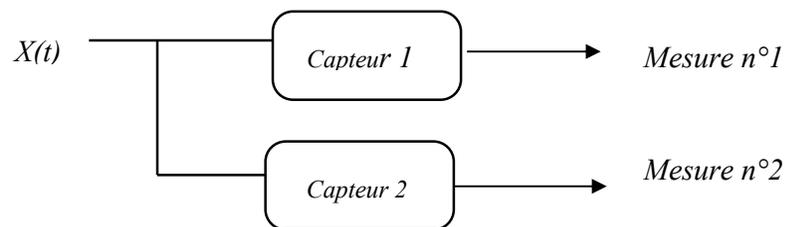


Fig. I.5. Schéma représentant la redondance physique.

1.5.2.1.2. Analyse spectrale

Les signaux sont analysés en état normal de fonctionnement ; les hautes fréquences sont reliées au bruit et les basses fréquences aux évolutions propres de l'état du procédé. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de défaillance.

1.5.2.1.1. L'approche multi-signaux ou redondances analytiques

Elles consistent à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques, appelées relations de redondances analytiques, liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie).[1]

Le but des méthodes de redondance analytique est d'estimer l'état du système afin de le comparer à son état réel. [36]

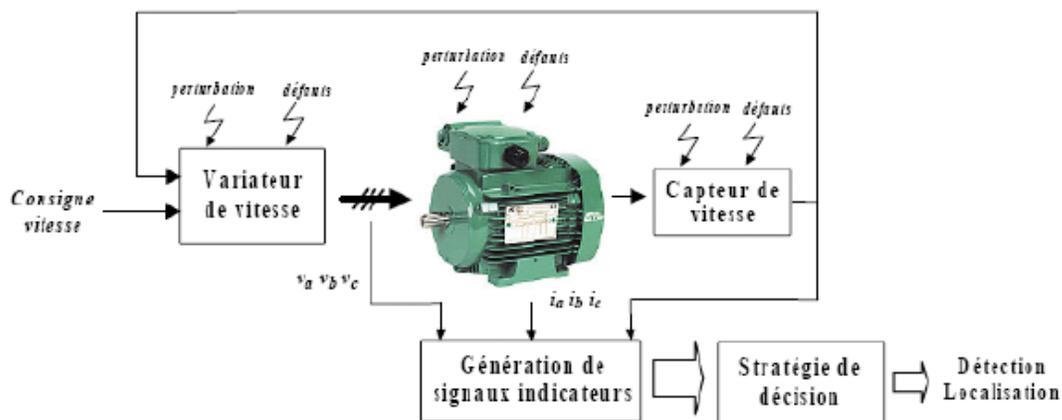


Fig. I.6. Principe général du diagnostic à base de modèles analytiques

1.5.2.1.1.1. Espace de parité

Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondances. Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une

fenêtre d'estimation. L'idée est de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs estimées données par le modèle.[26]

I.5.2.1.2. Observateurs :

Les méthodes à base d'observateurs ont pour principe de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties.

La théorie des observateurs est utilisée pour des systèmes linéaires ou non linéaires, d'ordre plein s'ils estiment l'intégralité du vecteur d'état (le système doit être complètement observable) ou d'ordre réduit dans le cas contraire, dans le domaine fréquentiel (observateurs généralisés) ou temporel (observateurs de Luenberger). Aussi il y a une classe d'observateurs dits observateurs à entrées inconnues dont les sorties du système sont indépendantes des incertitudes structurées auxquelles il est soumis. [26]

I.5.2.1.3. Estimation paramétrique :

L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé.

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose donc des problèmes d'ordre pratique dans le cas de procédés dangereux, coûteux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus.[24]

I.6. Les différentes étapes de diagnostic d'un système

Le diagnostic d'un système industriel nécessite un certain nombre d'étapes résumées à la figure suivante [33] :

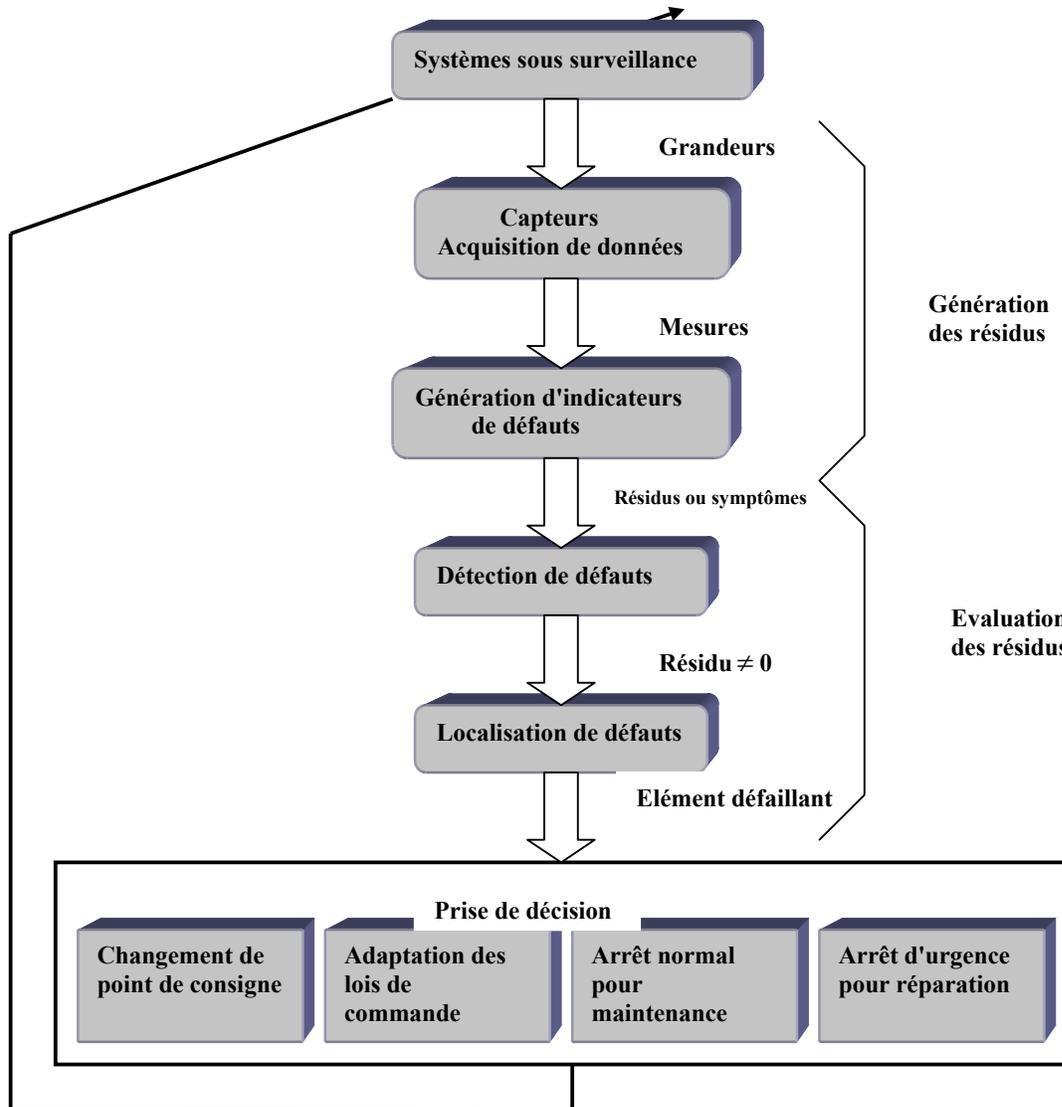


Fig. I.7. Les différentes étapes du diagnostic

I.6.1. Acquisition de données

La procédure de diagnostic nécessite de disposer d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation. Cette étape implique l'utilisation de capteurs permettant de mesurer les différentes variables du processus.

I.6.2. Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts

Elle consiste à comparer le comportement réel du système à un comportement de référence. Cet écart de comportement doit donc être idéalement nul en l'absence de défaut et différent de zéro dans le cas contraire.

I.6.3. Etape de détection

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. Il ne suffit pas de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut. Car en réalité, les grandeurs mesurées étant toujours entachées de bruits et le modèle utilisé étant imparfait. Les résidus sont généralement non nuls même en l'absence de défauts.

Donc :

$$r(t) = G_f(t) + e_r(t)$$

La détection d'un défaut peut toutefois être réalisée en comparant les résidus à un certain seuil de détection T dépendant de $e_r(t)$; tel que $T > \max|e_{ri}(t)|$

La détection de défauts s'opère alors de la façon suivante :

$$|r(t)| \leq T \rightarrow f(t) = 0$$

$$|r(t)| > T \rightarrow f(t) \neq 0$$

I.6.4. Etape de localisation

La localisation permet de déterminer le ou les éléments défectueux. La signature d'un défaut représente l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus. Si l'on dispose de la signature de chacun des défauts à détecter, il est possible de remonter des effets aux causes.

La structuration de résidus consiste à mettre en œuvre plusieurs générateurs de résidus dont chacun est excité par une combinaison judicieusement choisie des entrées et des sorties du système. Chaque résidu est alors destiné à révéler un défaut particulier du système.

On distingue deux cas suivants que l'on souhaite localiser des défauts simultanés ou non.

Si on veut localiser n_f défaut qui pouvant se produire simultanément, on génère n_f résidus, chacun étant sensible à un seul défaut. Cette approche conduit à une table des signatures ayant une structure « 1-dia ». Le résidu r_i est sensible au défaut f_i et insensible à tous les autres. Le principe de générer de tels résidus consiste à considérer les défauts auxquels il faut tester insensibles comme autant d'entrées inconnues à découpler. Cette approche augmente le rang de la matrice d'action des entrées inconnues, ce qui peut conduire à l'impossibilité de générer de tels résidus.

Si on veut localiser n_f défaut qui ne peuvent se produire simultanément, on génère n_f résidus chacun étant sensible à tous les défauts sauf un. Cette approche conduira à une table des signatures ayant une structure « 0-dia ». Le résidu r_i est sensible à tous les défauts sauf au défaut f_i . Ceci peut être réalisé en considérant le défaut auquel il faut être insensible comme une entrée inconnue à découpler. Dans ce cas, le rang de la matrice d'action des entrées inconnues n'est augmenté que de 1 au lieu de $n_f - 1$ dans le cas précédent, ce qui est beaucoup moins contraignant pour la synthèse des générateurs de résidu.

Toujours dans le cas de défauts non simultanés, il est possible de générer un nombre minimum de résidus permettant la localisation de tous les défauts. Cette approche conduit à une table des signatures ayant une structure minimale. D'une manière générale, le nombre maximum de défauts localisables au moyen d'un nombre q de résidus est de $2^q - 1$, alors que pour les autres structures il est nécessaire de générer autant de résidus indépendants que de défauts à localiser.

1.6.5. Etape de prise de décisions

La prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. Ces actions peuvent être : l'adaptation paramétrique de la loi de commande dans le but de conserver l'effet d'un défaut, une procédure normale d'arrêt ou encore un arrêt d'urgence en cas de d'une anomalie sévère mettant en danger les personnes ou le matériel.

I.7. Conclusion

On a présenté les principaux éléments qui constituent une machine asynchrone à cage d'écuréuil. On a cité les défauts les plus fréquents qui peuvent altérer le bon fonctionnement de la machine. En remarquons que les défauts statoriques et rotoriques sont les plus probables. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défauts a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels.

Puis on a donné un aperçu des techniques de diagnostic des systèmes industriels. Le classement des différentes techniques est fonction de l'existence ou non d'un modèle formel de l'équipement à surveiller. Nous avons donc présenté, d'une part, les méthodes qui ne se basent pas sur l'existence de ce modèle, d'autre part, celles qui l'utilisent, à savoir les méthodes d'estimation d'état et d'estimation paramétrique.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone

II.1. Introduction

Actuellement, le diagnostic impose un effort important dans la modélisation en vue d'assurer une bonne sûreté de fonctionnement. L'étude des comportements dynamiques et statiques de la machine asynchrone exige une bonne modélisation mathématique décrivant de façon adéquate son comportement. Aussi, avant de développer les observateurs utilisés, il faut d'une part définir les modèles sur la base desquels ils seront construits, et d'autre part faire un choix judicieux des variables à suivre.

On présente dans ce chapitre le modèle de la machine asynchrone dans la base de Park sous les hypothèses simplificatrices. Le modèle est simulé avec "MATLAB".

II.2. Hypothèses

Afin de simplifier la modélisation de la machine asynchrone on doit poser quelques hypothèses. On néglige[17] :

- La saturation.
- Les pertes ferromagnétiques.
- L'effet d'extrémités des têtes des bobines.
- L'effet d'encochage
- L'effet pelliculaire.

On suppose aussi que la machine est parfaitement symétrique.

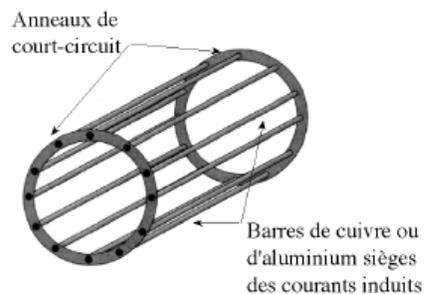


Fig. II.1. Schéma de principe d'une cage d'écureuil

II.3. Equations électriques

II.3.1. Equations statoriques

En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques, nous obtenons :

$$V_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \psi_s \quad (\text{II.1})$$

Où V_s représente le vecteur tension, i_s le vecteur courant, ψ_s le vecteur flux tel que :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; \quad i_s = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; \quad \psi_s = \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} . \quad (\text{II.2})$$

La matrice des résistances R_s , où sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques, se met sous la forme suivante :

$$R_s = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} , \quad (\text{II.3})$$

En régime équilibré on a :

$$r_{as} = r_{cs} = r_{bs} = r_s \quad (\text{II.4})$$

Les trois phases statoriques sont aussi magnétiquement couplées avec les circuits électriques rotoriques donc le flux total ψ_s s'écrit sous la forme suivante :

$$\psi_s = L_s i_s + L_{SR} i_R \quad (\text{II.5})$$

L_s : Matrice des inductances statoriques.

L_{SR} : Matrice des mutuelles stator-rotor.

Ces matrices s'écrivent sous les formes suivantes :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ms} + L_{ls} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ms} + L_{ls} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix}; L_{SR} = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a2} & \dots & L_{an} & 0 \\ L_{b1} & L_{b2} & \dots & L_{bn} & 0 \\ L_{c1} & L_{c2} & \dots & L_{cn} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

II.3.2. Equations rotoriques

Le rotor à cage est muni d'un enroulement constitué par des barres nues court-circuitées par des anneaux moulés sur les extrémités des barres. Le circuit rotorique est composé de n mailles identiques. Chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et les deux portions d'anneaux entre les deux barres.

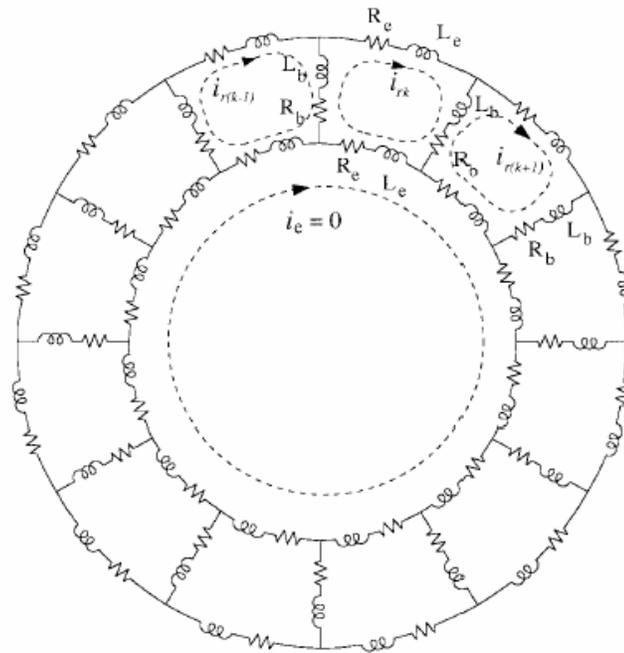


Fig. II.2. Circuit équivalent de la cage rotorique

Chaque barre et chaque portion d'anneau peuvent être remplacées par un circuit inductif (résistance+inductance).

Alors les équations rotoriques peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante:

$$V_R = R_R i_R + \frac{d}{dt} \psi_R = 0 \quad (\text{II.7})$$

Avec :

R_R : Matrice des résistances rotoriques.

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$R_R = \begin{bmatrix} R_0 & -r_b & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -r_b & -r_e \\ -r_b & R_0 & -r_b & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & -r_e \\ 0 & -r_b & R_0 & -r_b & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -r_e \\ \cdot & 0 & -r_b & R_0 & -r_b & 0 & \cdot & \cdot & -r_e \\ \cdot & -r_e \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -r_e & -r_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Le flux rotorique dépend non seulement des courants de boucles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques si bien que :

$$\psi_R = L_R i_R + L_{RS} i_S \quad (\text{II.9})$$

L_{RS} : Matrice des mutuelles rotor-stator.

On a $L_{SR} = L_{RS}^T$ (la machine est supposée symétrique).

L_R : Matrice des inductances rotoriques.

$$L_R = \begin{bmatrix} L_{kk} + L_0 & L_{kj} - l_b & L_{kj} & L_{kj} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{kj} - l_b & -l_e \\ L_{kj} - l_b & L_{kk} + L_0 & L_{kj} - l_b & L_{kj} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{kj} & -l_e \\ L_{kj} & L_{kj} - l_b & L_{kk} + L_0 & L_{kj} - l_b & L_{kj} & \cdot & \cdot & L_{kj} & -l_e \\ L_{kj} & L_{kj} & L_{kj} - l_b & L_{kk} + L_0 & L_{kj} - l_b & \cdot & \cdot & L_{kj} & -l_e \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ L_{kj} - l_b & L_{kj} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{kj} & L_{kj} - l_b & L_{kk} + L_0 & -l_e \\ -l_e & nl_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

II.4. Modèle de Park

II.4.1. Modèle triphasé-triphasé

A fin de simplifier l'étude de la machine, on doit remplacer le rotor à cage par trois bobines court-circuitées et identiques, décalées géométriquement de $2\pi/3$. C'est le modèle triphasé-triphasé dont les phases statoriques et rotoriques sont repérées respectivement par (Sa, Sb, Sc) et (Ra, Rb, Rc) [8] :

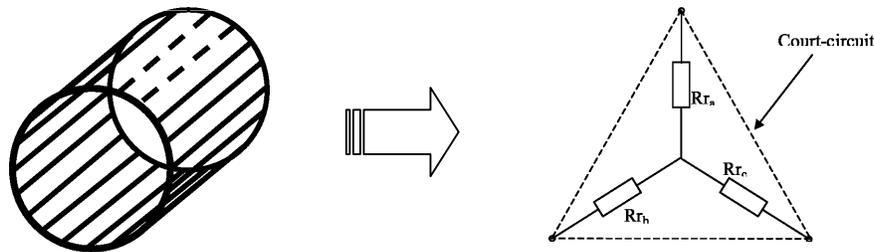


Fig. II.3. Représentation triphasée du rotor

Alors on a ramené le modèle de la machine asynchrone à cage à un modèle triphasé-triphasé présenté dans la figure II.4 :

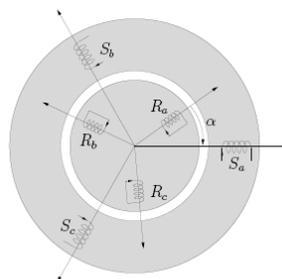


Fig. II.4. Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

Donc on peut écrire :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d}{dt} \psi_r ; \quad (II.11)$$

Avec:

$$V_r = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} ; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} ; \quad \psi_r = \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} .$$

II.4.2. Transformation de Park

La représentation de Park permet de représenter les enroulements de la machine dans un repère orthogonal (d, q) tournant à la vitesse ω , où les enroulements rotoriques sont immobiles par rapport au stator. Comme le montre la figure suivante, les deux repères diphasés $(s\alpha, s\beta)$ et $(r\alpha, r\beta)$ sont ramenés à un seul repère (d, q) commun au stator et au rotor.

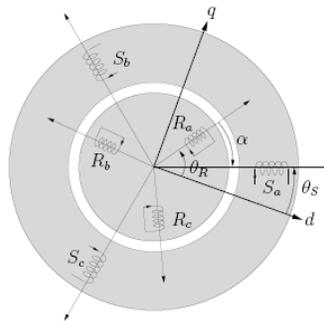


Fig. II.5. Représentation des différents systèmes d'axes

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q .

Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

$$\begin{cases} i_{dqs} = K i_s \\ i_s = K^{-1} i_{dqs} \end{cases} \quad (II.12)$$

Celles des tensions :

$$\begin{cases} V_{dqs} = KV_s \\ V_s = K^{-1}V_{dqs} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

La transformation des flux :

$$\begin{cases} \Psi_{dqs} = K\Psi_s \\ \Psi_s = K^{-1}\Psi_{dqs} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec K la matrice de transformation de Park s'écrit :

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

La transformation inverse est définie par :

$$K^{-1} = K^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$\theta = \theta_s - \theta_r$$

Les vecteurs courant, tension et flux statoriques s'expriment, dans la nouvelle base, sous la forme suivante :

$$i_{dqs} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix}; V_{dqs} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \end{bmatrix}; \psi_{dqs} = \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{os} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Hypothèse : la composante homopolaire de toutes les grandeurs considérées (tensions, courants, flux) est nulle (*i.e* le machine fonctionne en régime triphasé équilibré).[9]

Les variables triphasées sont donc entièrement décrites par deux variables d'indices d et q .

II.4.3. Choix du référentiel

L'utilisation du modèle de Park nécessite l'utilisation d'un référentiel dont le choix se fait en fonction du problème étudié. Trois types de référentiel sont intéressants. [6]

II.4.3.1. Référentiel immobile par rapport au stator

Il est souvent nécessaire lors des études des variations importantes de la vitesse de rotation. Dans ce cas la pulsation ω est nulle.

II.4.3.2. Référentiel immobile par rapport au rotor

Il est intéressant dans les problèmes de régimes transitoires. La vitesse électrique du repère (d,q) est égale à la pulsation mécanique du rotor. Nous avons donc :

$$\omega = \omega_r$$

II.4.3.3. Référentiel tournant à la vitesse ω

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine. Il est utile lorsque la fréquence d'alimentation est constante et à fréquence variable lors des petites perturbations autour d'un régime donné.

Généralement ce repère tournera à la vitesse du champs tournant qui est le champs créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme [3].

Dans ces conditions nous avons :

$$\omega = \omega_s$$

II.4.4. Equations dans la repère (d,q) tournant à la vitesse ω

Le modèle mathématique de la machine peut se définir par le système d'équations différentielles suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega \psi_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega \psi_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

Les relations entre les flux et les courants s'écrivent suivant les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

II.4.5. Equation mécanique

La vitesse est la solution de l'équation suivante:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \Omega_r = C_{em} - C_r ; \quad (\text{II.20})$$

Tel que :

$$\Omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

J : Représente le moment d'inertie.

f_v : Le couple de frottement visqueux.

C_r : Le couple résistant appliqué à la machine.

L'expression du couple électromagnétique est devenue :

$$C_{em} = p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad \text{Ou} \quad C_{em} = \frac{3}{2}p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{II.22})$$

On peut aussi, en utilisant les flux rotoriques obtenir :

$$C_{em} = p \frac{M}{Lr} (\psi_{dr}i_{qs} - \psi_{qr}i_{ds}) \quad (\text{II.23})$$

Où : p est le nombre de paires de pôles

II.4.6. Mise sous forme d'état

Il existe plusieurs représentations d'état de la machine asynchrone. Elles se différencient entre elles par un choix du vecteur définissant les variables d'état du système et par un choix du référentiel dans lequel la modélisation a été faite. La forme générale de l'équation d'état est uniforme et s'écrit de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Pour notre étude, le vecteur d'état est constitué des composantes du courant statorique et du courant rotorique. Il :

$$x = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qs} \quad \omega_r]^T \quad (\text{II.25})$$

Et comme vecteur de commande :

$$u = [v_{ds} \quad v_{qs}]^T \quad (\text{II.26})$$

Les variables de sortie sont choisit égales aux courants statoriques :

$$y = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} & \omega_r \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.27})$$

Et comme référentiel celui qui est lié au champ tournant.

Les équations des courants, tensions et flux; statoriques et rotoriques, s'écrivent sous la forme différentielle suivante : [9]

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{ds} = - \left(\frac{L_r R_s}{L_f} + \frac{M^2 R_r}{L_f L_r} \right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{M R_r}{L_f L_r} \psi_{dr} + \frac{M}{L_f} \omega_r \psi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\ \dot{i}_{qs} = -\omega_s i_{ds} - \left(\frac{L_r R_s}{L_f} + \frac{M^2 R_r}{L_f L_r} \right) i_{qs} - \frac{M}{L_f} \omega_r \psi_{dr} + \frac{M R_r}{L_f L_r} \psi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} \\ \dot{\psi}_{dr} = \frac{R_r M}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{dr} + \omega \psi_{qr} \\ \dot{\psi}_{qr} = \frac{R_r M}{L_r} i_{qs} + \omega \psi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{qr} \\ \dot{\omega}_r = \frac{M p}{L_r J} (i_{ds} \psi_{qr} - i_{qs} \psi_{dr}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f}{J} \omega_r \end{array} \right. \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\omega = \omega_s - \omega_r$$

$$L_f = L_s L_r - M^2 \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{L_f}{L_s L_r}$$

σ : Coefficient de dispersion magnétique de Blondel.

Aussi :

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

La représentation d'état est définie par le triplet de matrices A, B et C formulé comme suit :

$$A(x) = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \psi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega_r \psi_{qr} \\ -\omega_s i_{ds} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{qs} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega_r \psi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \psi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \psi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} - \frac{1}{T_r} \psi_{qr} \\ \frac{M}{L_r} \frac{p}{J} (i_{ds} \psi_{qr} - i_{qs} \psi_{dr}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f}{J} \omega_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On note que la matrice **A** dépend de la vitesse de référentiel ω_s et de la vitesse électrique du rotor ω_r . On remarque également que la matrice **B** dépend des paramètres inductifs de la machine par contre la matrice de sortie **C** est indépendante de tous les paramètres, et est constituée d'éléments constants.

Si on choisit un référentiel lié au rotor, on constate que la matrice **A** ne dépend que de la vitesse électrique. Si on choisit un référentiel lié au stator, on peut constater encore que la matrice **A** ne dépend que de la vitesse électrique du rotor.

II.4.7. Résultats de simulation

II.4.7.1. Evolution des paramètres en régime sain

Le modèle précédent de la machine est simulé en MATLAB, en régime sain. Les résultats de simulation sont présentés dans les courbes suivantes. Le pas utilisé est de 10^{-4} .

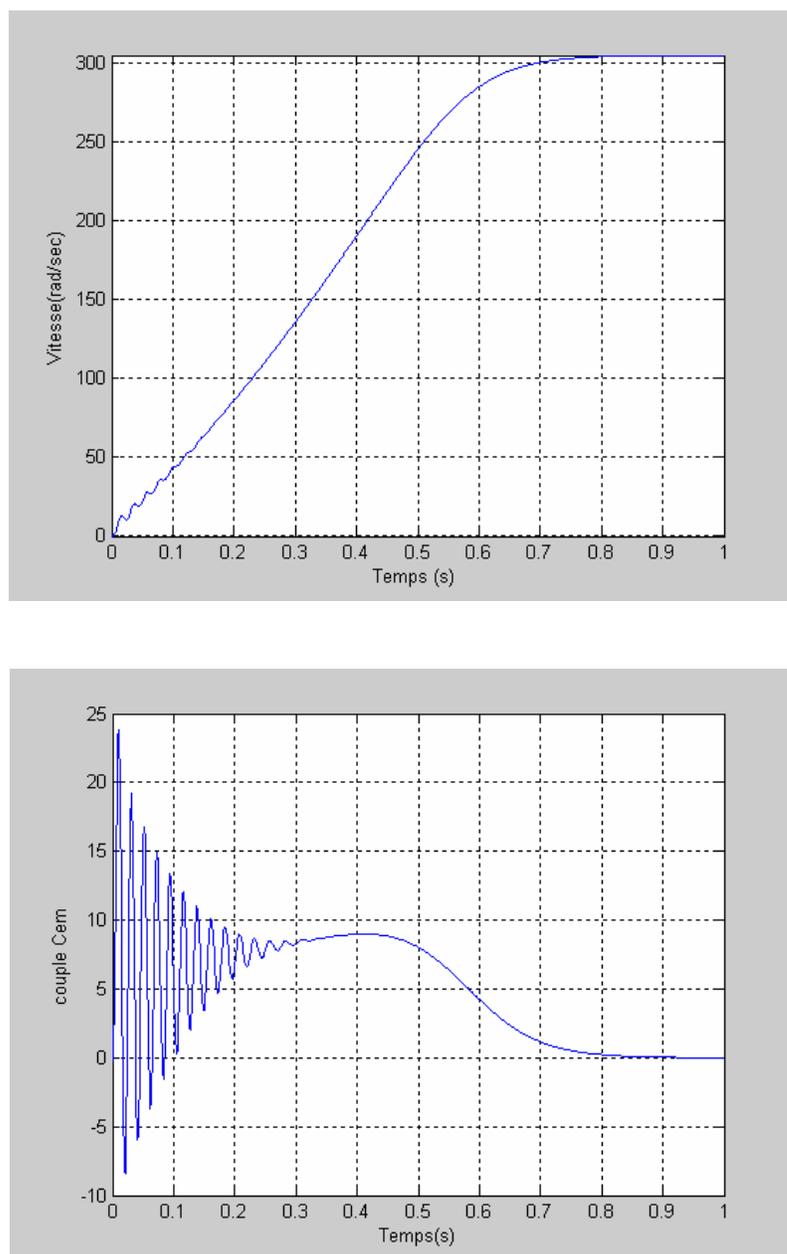


Fig. II.6. Grandeurs mécaniques en régime sain

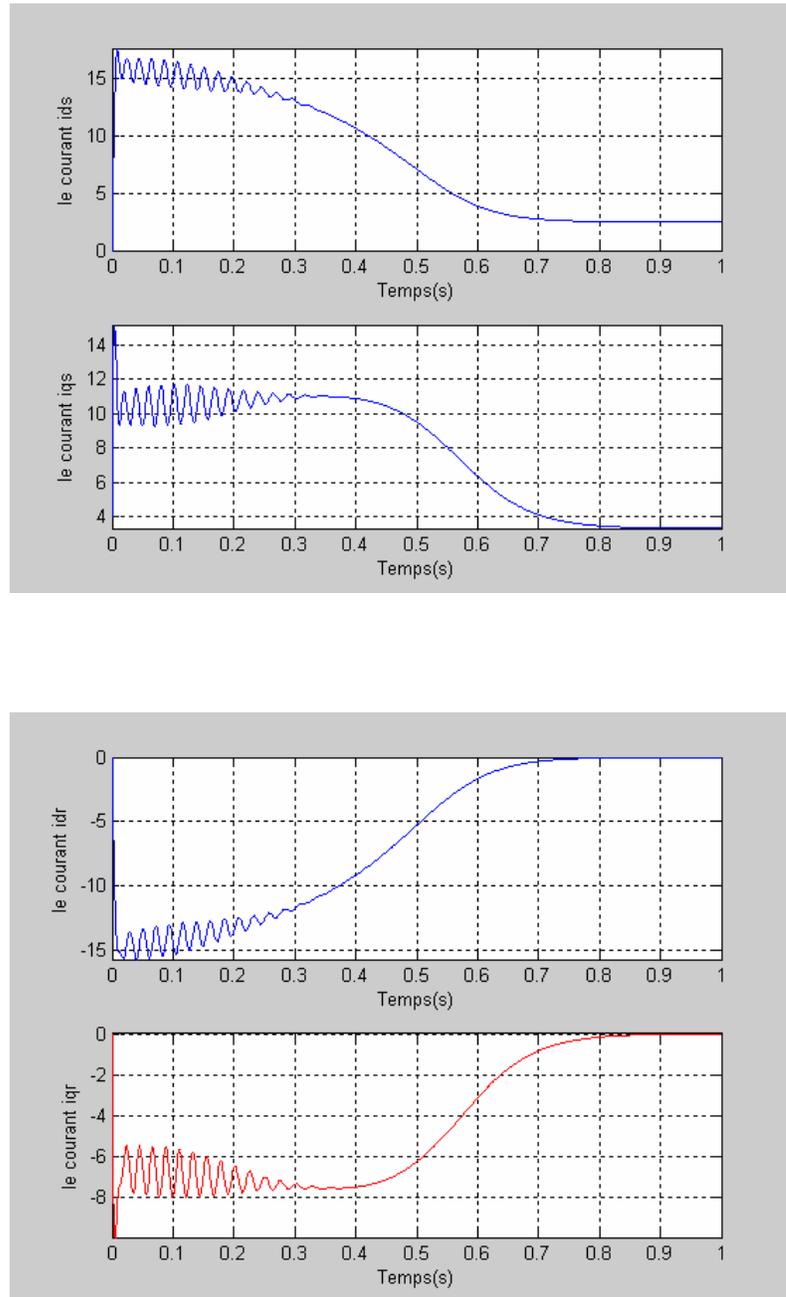


Fig. II.7. Courants de Park en régime sain

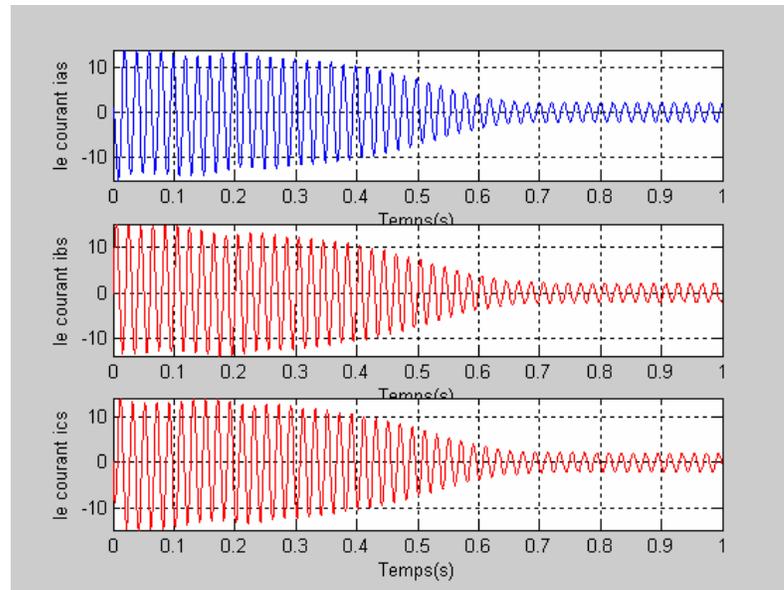


Fig. II.8. Courants statoriques en régime sain

II.4.7.2. Evolution des paramètres en régime de défauts

Le modèle de la machine asynchrone est caractérisé par des paramètres électriques et mécaniques. A partir de l'acquisition des grandeurs électriques sur une machine asynchrone, l'identification de ces paramètres permet de construire un modèle fidèle de la machine réelle. Les paramètres sensibles aux défauts peuvent être identifiés par des algorithmes spécifiques. En présence de défauts, ces paramètres dérivent et le modèle s'écarte alors de la physique du système. Mais l'évolution des paramètres permet de caractériser ces défauts. Les paramètres électriques les plus sensibles aux défauts sont r_r et M . [7]

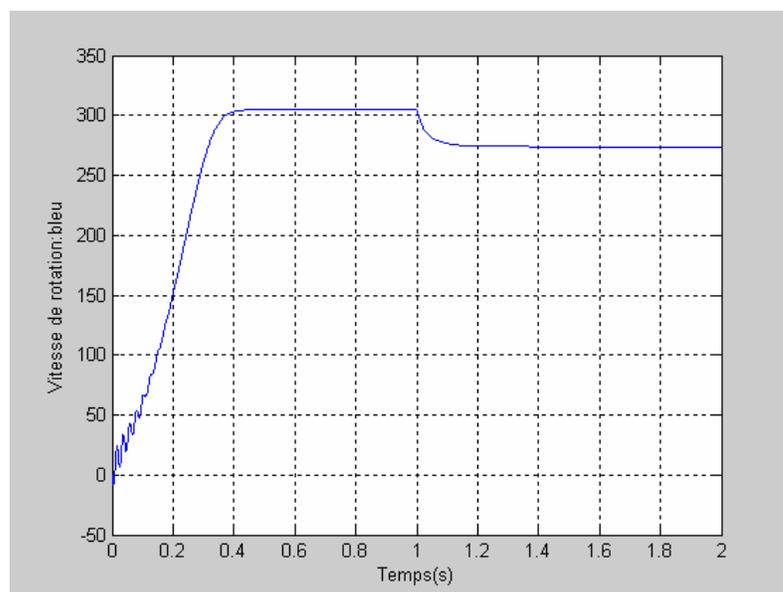
Ces paramètres sont considérés comme indicateurs de défauts, et ne sont plus considérés comme des valeurs de résistances et inductances propres de la machine lors de la présence d'un défaut. Ils fournissent alors des signatures de défauts, caractérisées par :

- Lors d'une rupture de barres au rotor, la résistance rotorique r_r augmente et les autres paramètres diminuent.
- Lors d'un défaut de court-circuit au stator, la résistance statorique r_s augmente et les autres paramètres diminuent.

Paramètres <i>Défauts</i>	r_s	r_r	M
Défauts dans la cage rotorique	→	↗	→
Défaut de CC aux bobinages statoriques	↗	→	→

Dans le but d'analyser l'évolution des paramètres de la machine dans le cas où il y a une dérivation des paramètres par suite d'un défaut, on suppose qu'à $t=1$ sec, une augmentation de 80% de la résistance r_r et une diminution de 20% de M se produisent. Ce cas peut se présenter par suite d'un défaut rotorique.

L'évolution des différentes caractéristiques s'effectue comme indiqué sur les figures ci-dessous :



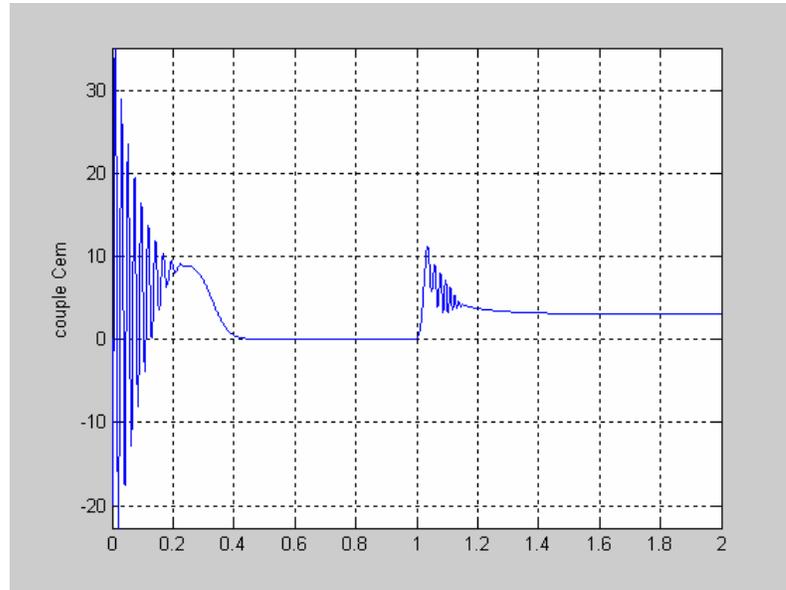
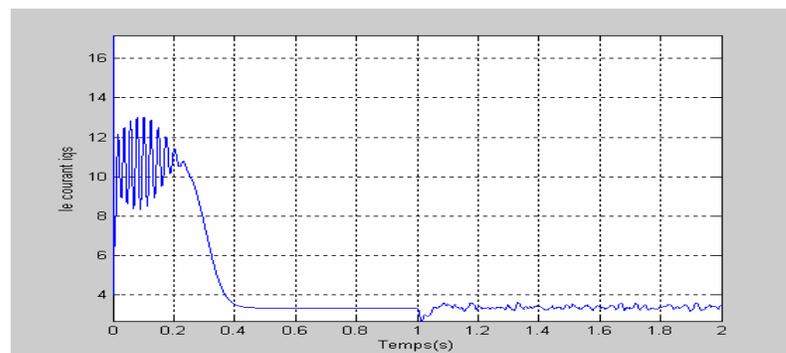
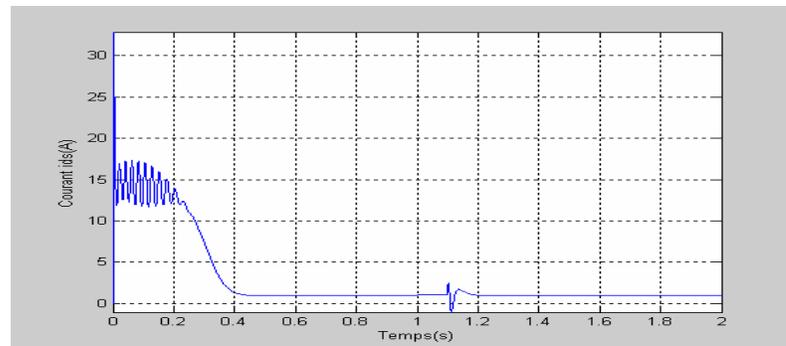


Fig. II.9. Grandeurs mécaniques lors d'une variation de r_r et M



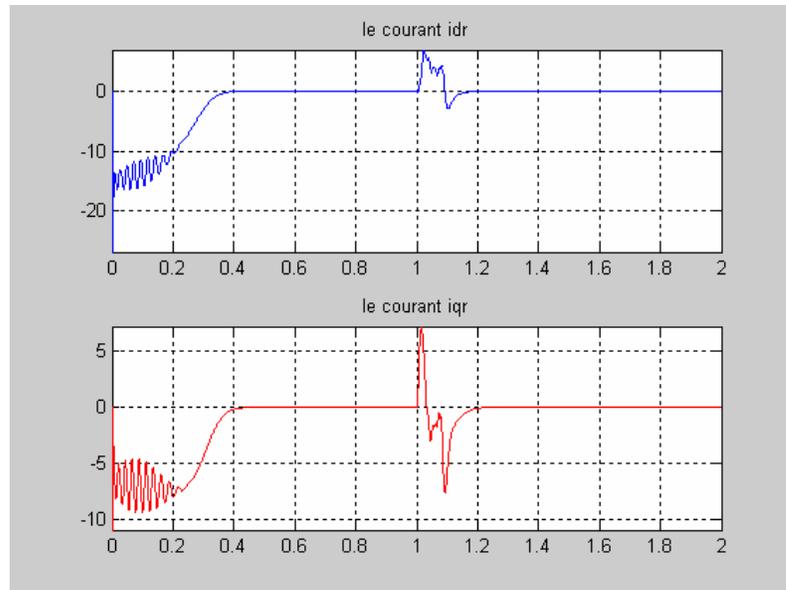


Fig. II.10. Courants de Park lors d'une variation de r_r et M

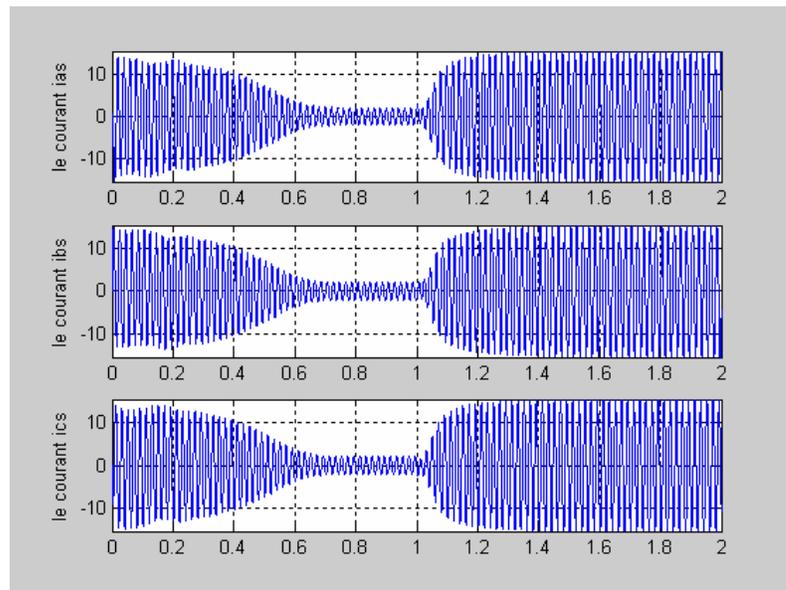


Fig. II.11. Courants statoriques lors d'une variation de r_r et M

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de Park lié au champ tournant. Cette modélisation a été introduite comme approche pour l'analyse des machines asynchrones.

Le modèle de Park lié au champ tournant, est simple, ce qui facilite la synthèse des observateurs. La représentation sur deux axes masque néanmoins des informations qui peuvent être nécessaire au diagnostic et n'est plus valable lors de la dissymétrie de l'alimentation ou de la machine.

Les différentes caractéristiques de la machine en régime sain sont données. Un défaut rotorique peut être traduit par une variation des paramètres de la machine, lors de l'apparition de ce type de défauts les caractéristiques sont aussi données.

Chapitre III

Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par les méthodes à base d'observateurs

III.1. Introduction

Le choix de l'observateur dépend de la structure des modèles : linéaire ou non. On distingue deux approches : soit applique les méthodes développées pour le cas linéaire après linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement. Dans ce cas les erreurs de linéarisation peuvent produire des fausses alarmes. Soit on utilise des observateurs non linéaires. Mais ce si nécessite une connaissance exacte du modèle.

Dans ce chapitre, on va d'abord présenter quelques observateurs dédiés au diagnostic des défauts des systèmes. On passe après à la génération des résidus à l'aide d'un observateur de défauts, associé à un observateur d'état par modes glissants puis un observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.

III.2. Observateurs dédiés au diagnostic des défauts

L'idée principale du diagnostic à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. r est alors généré en formant la différence (éventuellement filtrée) entre les sorties estimées et les sorties réelles.

III.2.1. Observateur proportionnel

C'est l'approche la plus simple pour estimer le vecteur d'état d'un système défini par le modèle suivant :

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

L'observateur est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

L'utilisation de cet observateur dans une procédure de diagnostic obéit au schéma fonctionnel de la figure III.1.

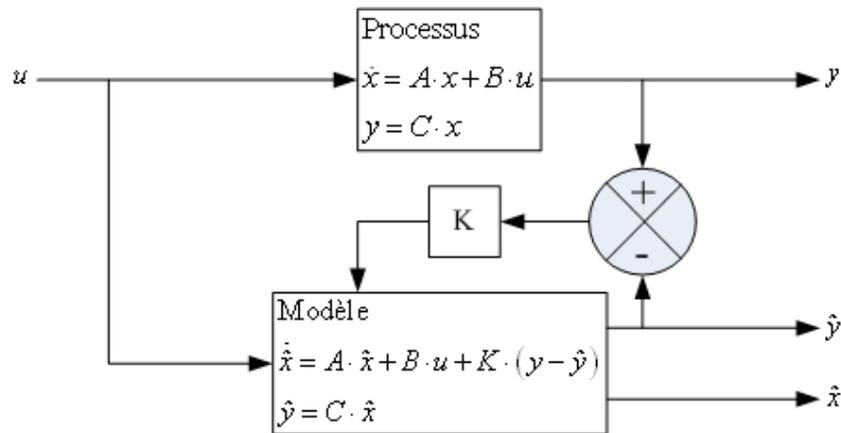


Fig III.1 : Principe d'un observateur d'états

L'erreur de reconstruction d'état est définie par : $e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$. Et l'équation d'évolution de e_x est : $\dot{e}_x = (A - LC)e_x$ pour garantir la convergence asymptotiquement vers zéro de l'erreur de reconstruction, on doit choisir L stabilisant la matrice $(A - LC)$, ie ; les valeurs propres de la matrice $A - LC$ doivent être toutes à partie réelle strictement négative.

L'erreur de reconstruction de sortie est définie par $e_y = y(t) - \hat{y}(t)$

Considérons le système à surveiller, supposé correctement décrit par :[33]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Tel que : D_x représente la matrice d'action des perturbations $d(t)$, $F_x(t)$ et $F_y(t)$ sont les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

Le reconstituteur d'état, utilisé en tant que générateur de résidus est le suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ r(t) = e_y(t) = y - \hat{y} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

La matrice L (gain de l'observateur) est calculée de façon que l'estimation tende vers l'état $x(t)$ du système quand t tend vers l'infini, quels que soient les états initiaux $x(0)$ et $\hat{x}(t)$. La dynamique de l'erreur d'estimation sur l'état s'écrit :

$$\dot{e}_x(t) = (A - LC)e_x(t) + (F_x - LF_y)f(t) + D_x d(t) \quad (\text{III.5})$$

En l'absence de défaut ($f(t)=0$) et en négligeant l'effet des entrées inconnues ($d(t)=0$), l'erreur d'estimation devient $\dot{e}_x = (A - LC)e_x$. Il faut choisir L telle que les valeurs propres de la matrice $A - LC$ soient toutes à partie réelle strictement négative.

La transformation de Laplace de l'expression III.5 permet d'écrire :

$$e_x(s) = [sI - (A - LC)]^{-1}(F_x - LF_y)f(s) + [sI - (A - LC)]^{-1}D_x d(s) \quad (\text{III.6})$$

$$\text{L'erreur d'estimation en sortie s'écrit : } e(s) = y(s) - \hat{y}(s) = Ce_x(s) + F_y(s)f(s)$$

De III.3 et III.4 on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} e(s) = G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s) \\ G_f(s) = C[sI - (A - LC)]^{-1}(F_x - LF_y) + F_y \\ G_d(s) = C[sI - (A - LC)]^{-1}D_x \end{array} \right. \quad (\text{III.7})$$

Soit la matrice stable et propre $Q(s)$, on génère un vecteur de résidus tel que :

$r(s) = Q(s)e(s)$, soit aussi :

$$r(s) = Q(s)G_f(s)f(s) + Q(s)G_d(s)d(s) \quad (\text{III.8})$$

Dans ces conditions, si l'on peut trouver une matrice de paramétrisation $Q(s)$ telle que les deux relations suivantes soient vérifiées :

$$Q(s)G_f(s) \neq 0 \quad \text{et} \quad Q(s)G_d(s) = 0 \quad (\text{III.9})$$

On obtiendra un vecteur des résidus $r(s)$ insensibles aux perturbations $d(s)$ et sensibles aux défauts $f(s)$. Dans le cas où l'influence des perturbations est négligeable sur l'évolution des résidus, la matrice $Q(s)$ peut être entièrement utilisée pour faciliter la localisation des défauts.

➤ **Synthèse de l'observateur a l'aide d'un placement de structure propre**

Soit une matrice de paramétrisation $Q(s) = Q_f(s)Q_d$, ou Q_f est une matrice de transfert stable et propre destinée a la structuration des résidus et Q_d une matrice algébrique destinée au découplage des entrées inconnues. D'après les relations III.7 et III.8 le vecteur des résidus s'écrit :

$$r(s) = Q_f(s)Q_d(s)G_f(s)f(s) + Q_f(s)Q_d(s)G_d(s)d(s) \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$\begin{cases} G_f(s) = C[sI - (A - LC)]^{-1}(F_x - LF_y) + F_y \\ G_d(s) = C[sI - (A - LC)]^{-1}D_x \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

On doit déterminer Q_d telle que $Q_d G_d(s) = 0$, soit :

$$Q_d C[sI - (A - LC)]^{-1}D_x = 0 \quad (\text{III.12})$$

La procédure de placement de structures propres peut être résumée comme suit :

- On calcule la matrice Q_d telle que $Q_d C D_x = 0$.
- On détermine la structure propre de l'observateur. Les q lignes de $W_q = Q_d C$ doivent être q vecteurs propres à gauche associés à q valeurs propres de $A_c = A - LC$, les $n-q$ vecteurs propres restants peuvent être fixés arbitrairement.
- On calcule la matrice de gain L de manière à imposer à l'observateur la structure propre désirée.

Le nombre d'entrées découplées diminue d'autant le nombre de résidus indépendants qu'il est possible de générer. De façon plus précise, pour une matrice D_x donnée, le découplage des perturbations peut être réalisé si et seulement si la condition suivante est satisfaite :

$$\text{Rang}(D_x) \leq n - q$$

III.2.2. Observateur de Walcott et Žak[1]

Le principe de cet observateur est d'estimer l'état du système décrit par III.10, de sorte que l'erreur tende vers zéro d'une façon exponentielle malgré la présence des incertitudes considérées.

On suppose que : $f(x, u, t) = R\xi(x, t)$

Ou : $\xi : R^n \times R_+ \rightarrow R^q$ est une fonction bornée et inconnue, telle que :

$$\|\xi(x(t), t)\| \leq \rho, \forall x(t) \in R^n, t \geq 0$$

On considère qu'il existe une matrice $G \in R^{n \times p}$ telle que la matrice $A_0 = (A - GC)$ a des valeurs propres stables, une paire de matrices de Lyapunov (P, Q) symétriques et définies positives et une matrice F respectant la contrainte structurelle suivante :

$$\begin{cases} (A - GC)^T P + (A - GC) = -Q \\ C^T F^T = PR \end{cases} \quad (III.13)$$

L'observateur proposé est de la forme :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t) + v(t)) \quad (III.14)$$

$$v(t) = \begin{cases} -\rho \frac{P^{-1}C^T F^T F C e(t)}{\|F C e(t)\|} & \text{si } F C e(t) \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.15)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état engendrée par cet observateur est régie par l'équation suivante :

$$\dot{e}(t) = \dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t) = (A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t) \quad (III.16)$$

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(e(t)) = e^T(t) P e(t)$$

Sa dérivée le long de la trajectoire de l'erreur d'estimation s'écrit :

$$\dot{V}(e(t)) = \dot{e}^T(t) P e(t) + e^T(t) P \dot{e}(t) = -e^T(t) Q e(t) + 2e^T(t) P v(t) - 2e^T(t) C^T F^T \xi(x, t) \quad (III.17)$$

Lorsque $F C e(t) \neq 0$, $\dot{V}(e(t)) = -e^T(t) Q e(t) - 2\rho \|F C e(t)\| - 2e^T(t) C^T F^T \xi(x, t)$

En utilisant le fait que la fonction inconnue $\xi(x,t)$ est bornée par un scalaire positif ρ , la dérivée de la fonction de Lyapunov peut être majorée de la façon suivante :

$$\dot{V}(e(t)) \leq -e^T Q e(t) < 0$$

Lorsque $FCe(t) = 0$: $\dot{V}(e(t)) = -e^T Q e(t) < 0$

Donc, dans les deux cas, la dérive de la fonction de Lyapunov est négative ce qui montre que l'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro.

Pour garantir la convergence asymptotique de l'observateur, on doit vérifier que :

- La paire (A, C) est observable,
- Il existe une paire de matrices de Lyapunov (P, Q) et une matrice F respectant les contraintes III.9.

III.3. Synthèse d'observateurs et application sur la MAS

On s'intéresse à deux observateurs : observateur par modes glissants qui est non linéaire, et l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire qui sont appliqués pour le diagnostic de la MAS.

III.3.1. Observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants

L'approche consiste à synthétiser des observateurs par modes glissants, robustes vis-à-vis, non seulement des entrées inconnues, mais aussi des défauts, en utilisant les états estimés pour la génération de résidus robustes.

Le principe est illustré dans la figure suivante :

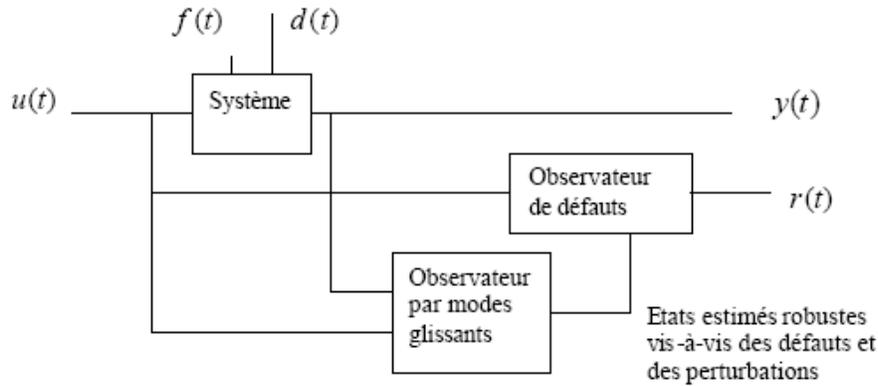


Figure III.2 Principe de la méthode à base d'observateur par modes glissants.

Soit le système défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Le générateur de résidus est défini par :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T \hat{x} - NTA(\hat{x}, u) \\ \hat{r} = z + NT \hat{x} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Tel que :

z : variable d'état définissant le générateur de résidu.

\hat{x} : l'état estimé par un observateur par modes glissants, robuste vis-à-vis des défauts et des perturbations.

\hat{r} : Vecteur des résidus.

La matrice N est une matrice définie positive, déterminée de façon à avoir la dynamique de l'observateur plus rapide que celle du système.

Si on trouve une matrice constante T , telle que la condition :

$$TE_d(x) = 0 \quad (\text{III.20})$$

soit vérifiée, les résidus définis par III.2. seront sensibles aux défauts et insensibles aux perturbations.

Dans le cas de la machine asynchrone, il suffit de prendre la dernière colonne de la matrice T nulle pour que la condition III.3. soit vérifiée. Il est alors possible d'exploiter les autres colonnes de la matrice afin d'assurer la distinction entre les défauts statoriques et rotoriques.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode, il est nécessaire de disposer d'une très bonne estimation des flux rotoriques. L'utilisation d'observateurs par modes glissants robustes vis-à-vis des défauts et des perturbations, constitue une solution appropriée pour la résolution de ce problème. Il est question donc de synthétiser un observateur par modes glissants robuste vis-à-vis des variations des différents paramètres et permettant l'estimation des flux rotoriques.

Synthèse d'un observateur par modes glissants avec capteur de vitesse pour la MAS

L'observateur par modes glissants proposé pour l'estimation des flux de la MAS [18] est défini par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}_1 = -\gamma x_1 + a \hat{x}_3 + Kp \hat{x}_4 x_5 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\gamma x_2 + a \hat{x}_4 - Kp \hat{x}_3 x_5 + eV_{21} + \lambda_2^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_3 = bx_1 - c \hat{x}_3 - p \hat{x}_4 x_5 + \lambda_3^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_4 = bx_2 - c \hat{x}_4 + p \hat{x}_3 x_5 + \lambda_4^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_5 = d(\hat{x}_3 x_2 - x_1 \hat{x}_4) - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j} x_5 + q_1(x_5 - \hat{x}_5) + \lambda_5^T I_s \end{array} \right. \quad (III.21)$$

$$\text{Avec : } I_s = [\text{sign}(S_1) \quad \text{sign}(S_2)]^T \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} S_1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ S_2 = x_2 - \hat{x}_2 \end{array} \right. \quad (III.22)$$

Tel que :

S_1 et S_2 : 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.

Ils sont données par :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1^T \\ \lambda_1^T \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{(a^2 + (Kpx_5)^2)} \begin{bmatrix} a & -Kpx_5 \\ Kpx_5 & a \end{bmatrix}$$

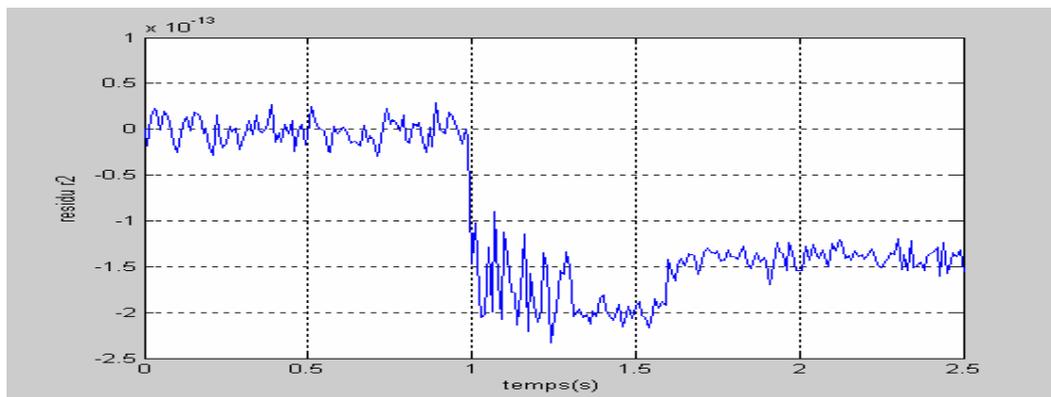
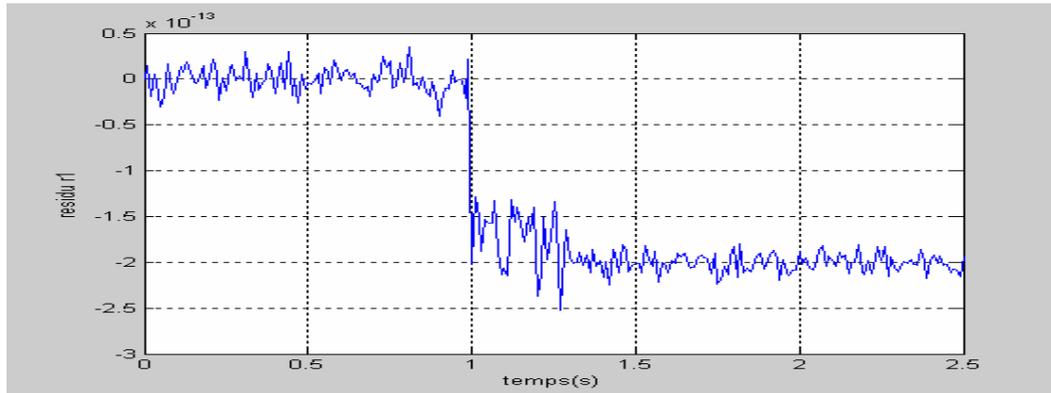
$$\begin{bmatrix} \lambda_3^T \\ \lambda_4^T \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} -c & -px_5 \\ px_5 & -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

$$\lambda_5 = [\lambda_{51} \quad \lambda_{52}] \quad , \quad \begin{bmatrix} \lambda_{51} \\ \delta_1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \lambda_{52} \\ \delta_2 \end{bmatrix} = d[x_2 \quad -x_1]$$

Tels que :

$$\delta_1 \geq \|e_3\|_{\max} \quad , \quad \delta_2 \geq \|e_4\|_{\max} \quad , \quad q_1 > 0 \quad , \quad q_3 > 0 \quad , \quad q_4 > 0$$

Les défauts considérés sont des biais de 50% des va leurs nominales des résistances. Les simulations sur Matlab nous donnent les résultats suivants :



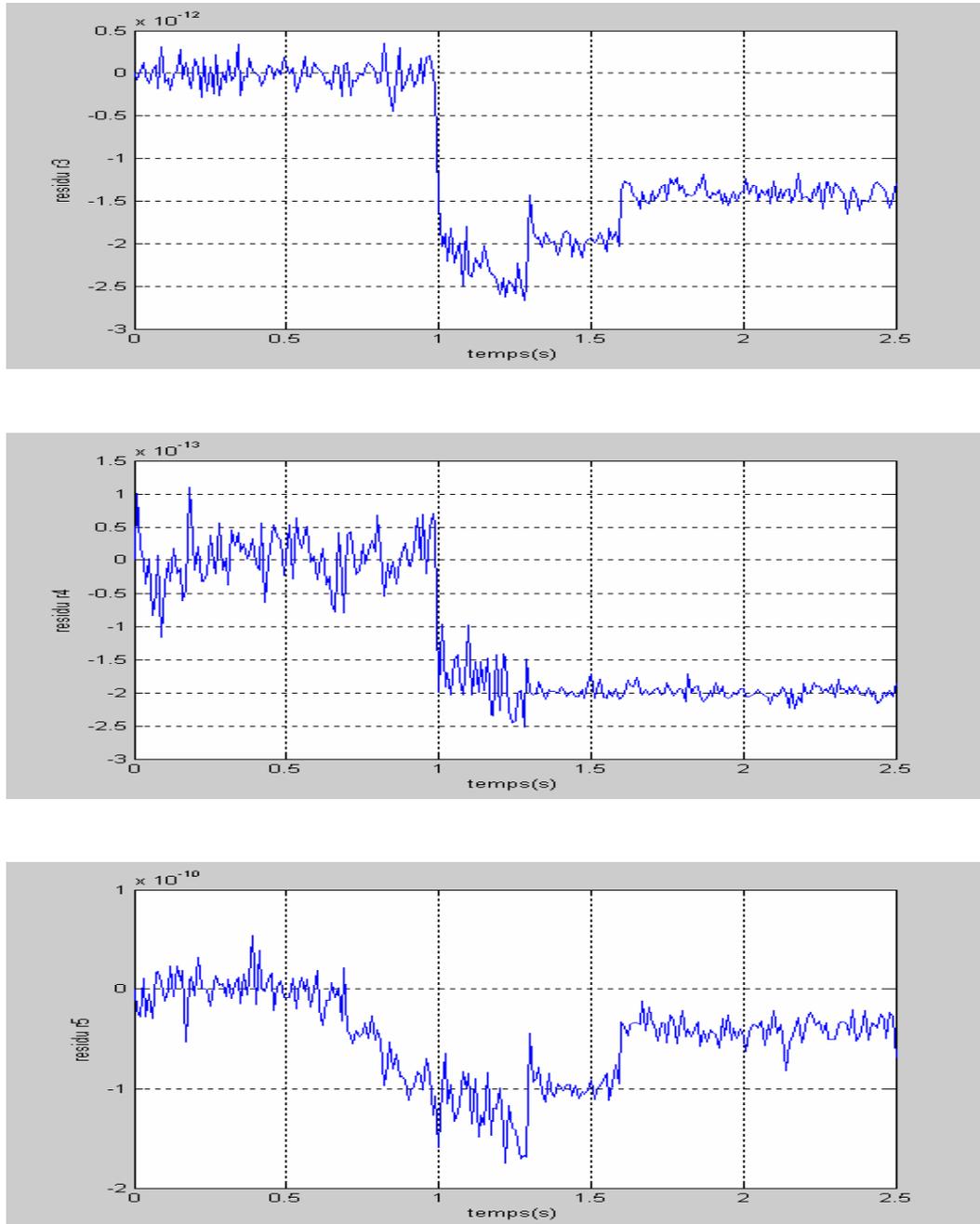
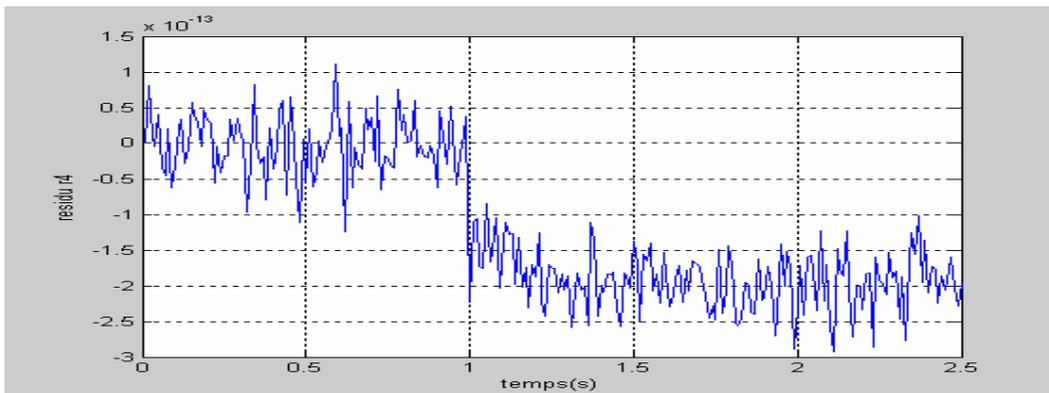
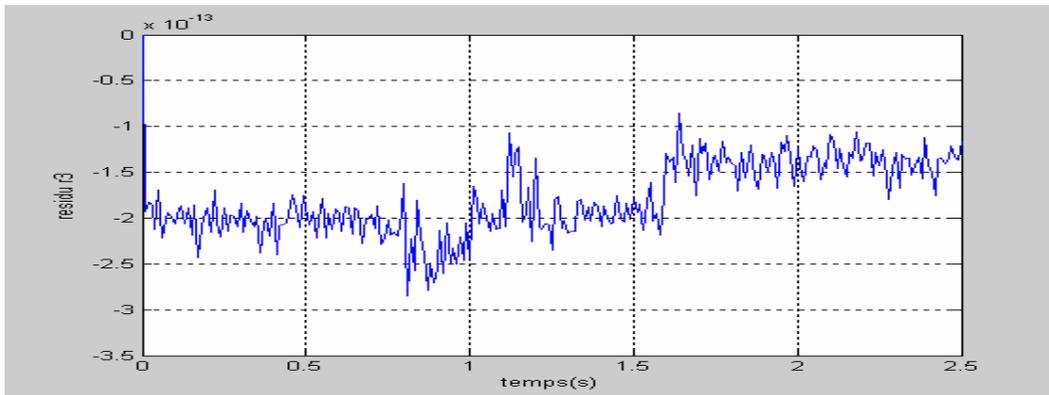
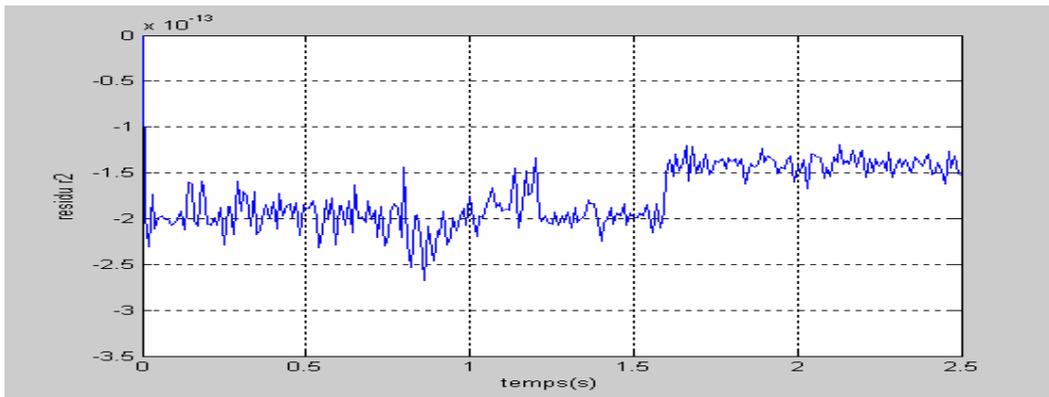
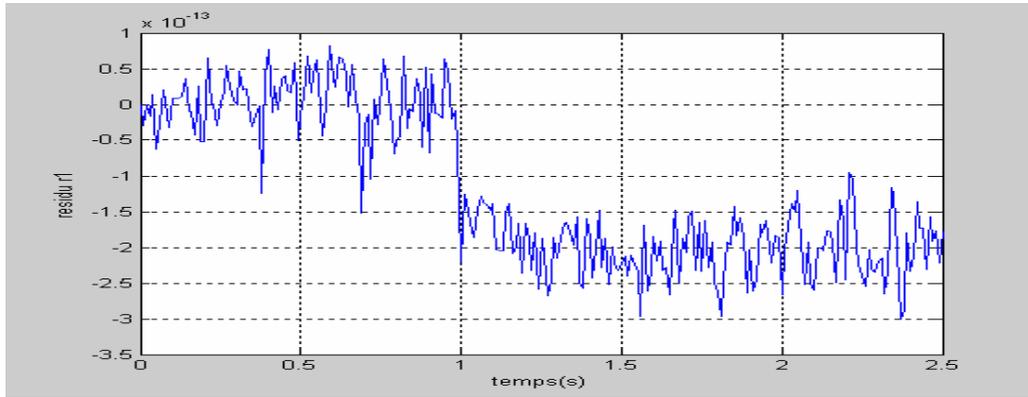


Figure III.3: Résidus en absence de défauts et de perturbations



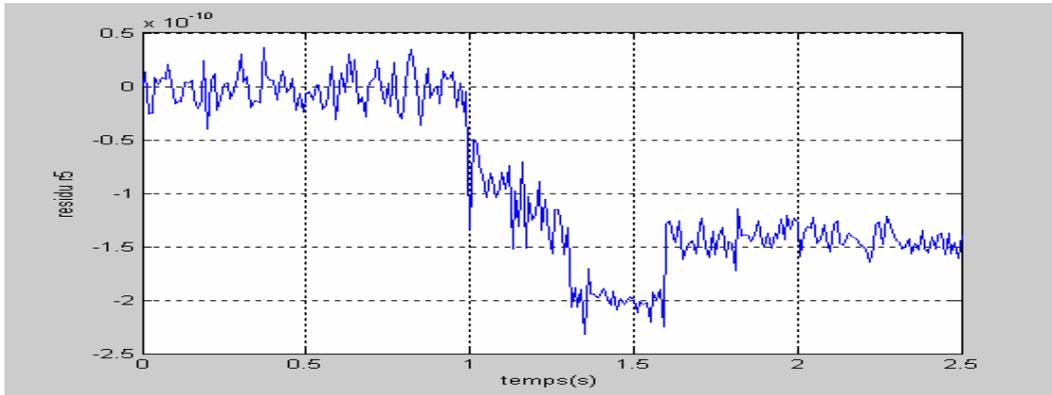
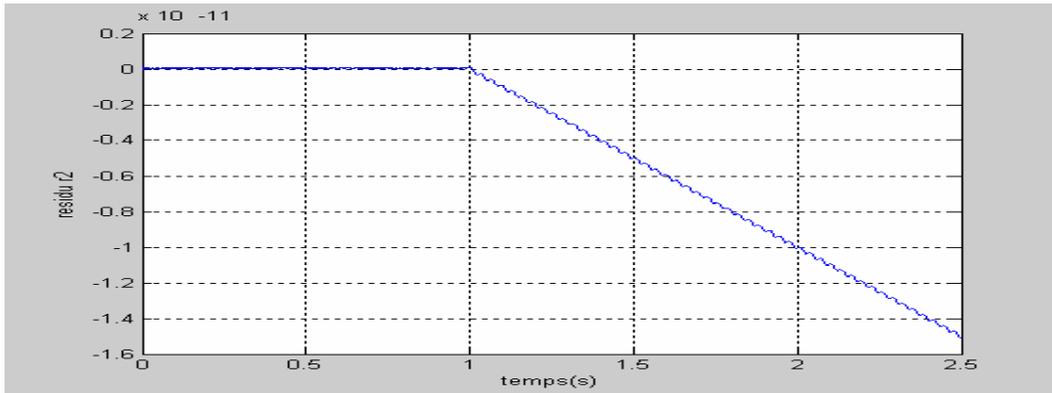
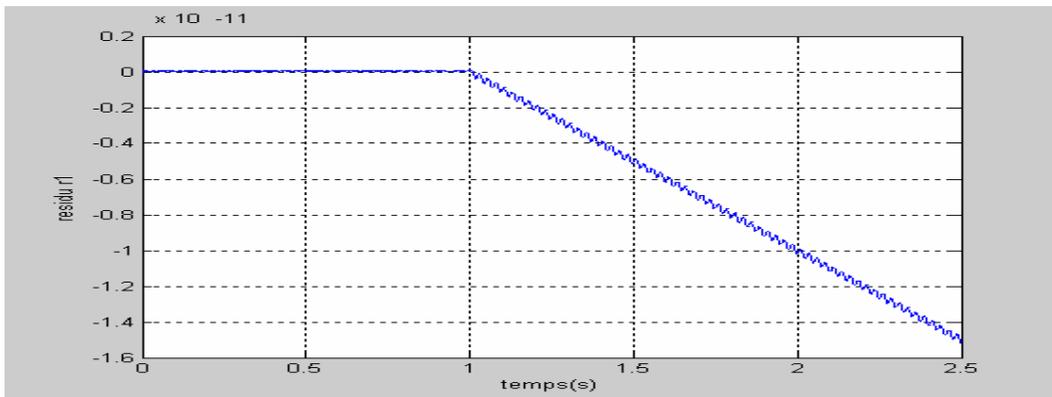


Figure III.4 Résidus en présence d'une perturbation apparaît à $t = 1$ sec.



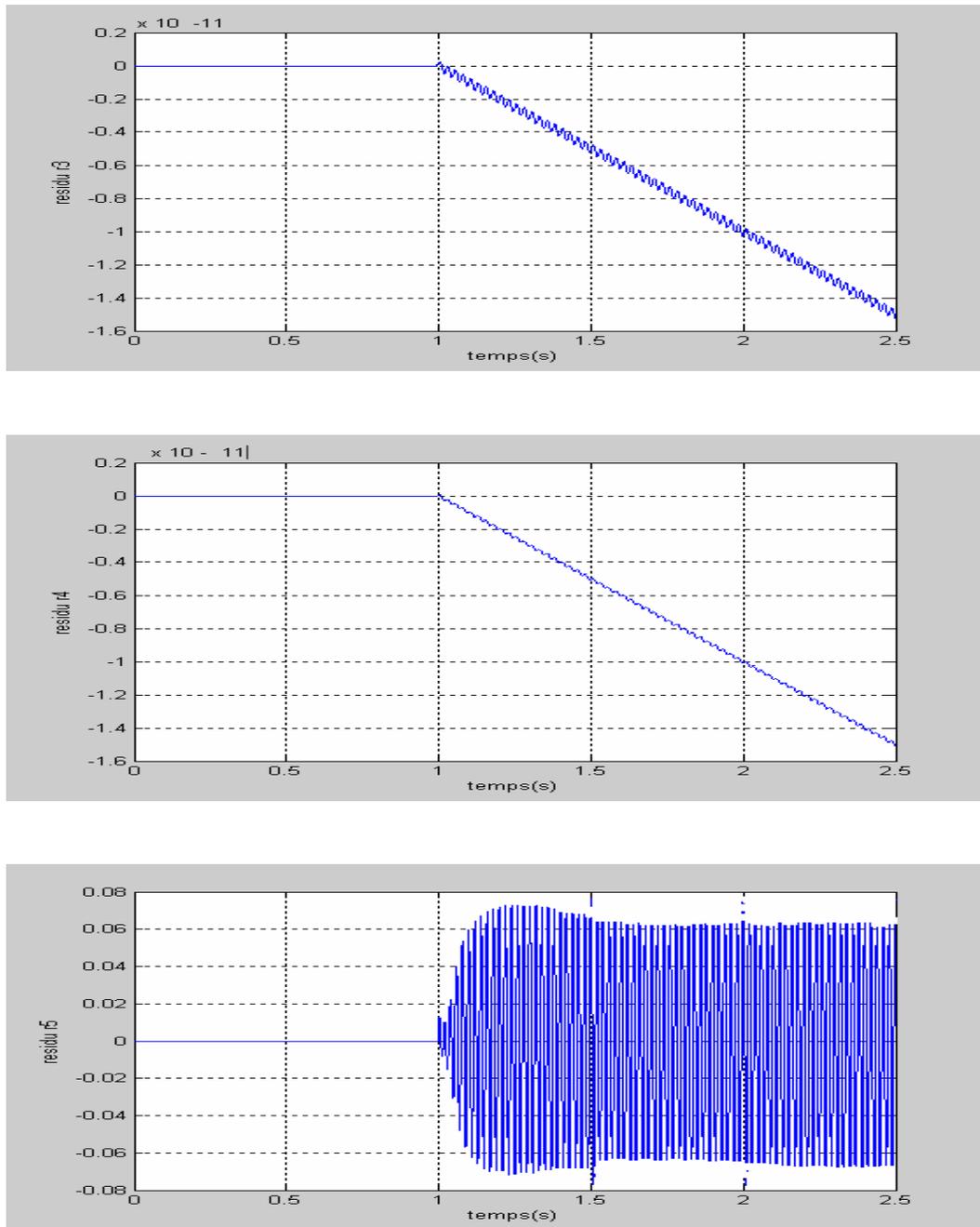
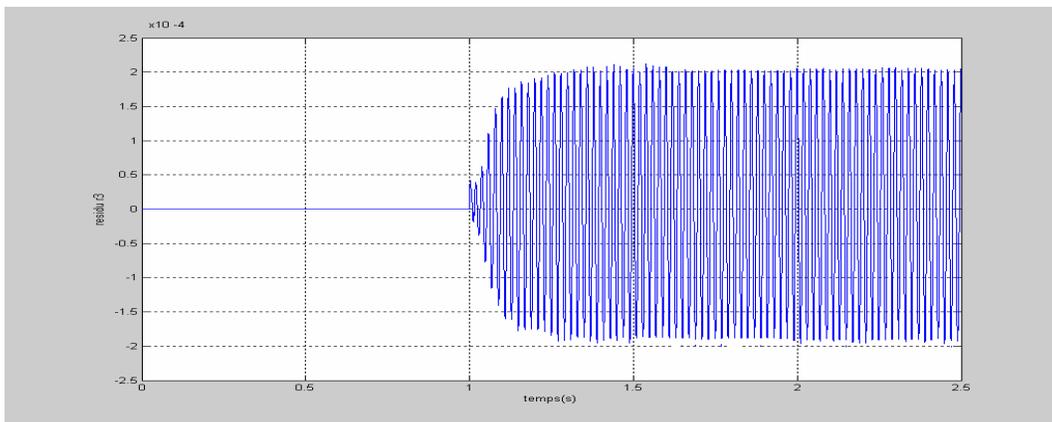
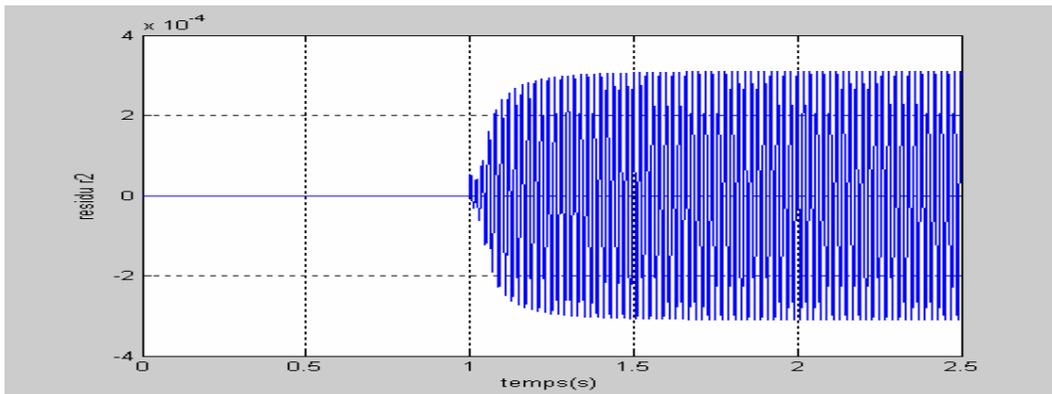
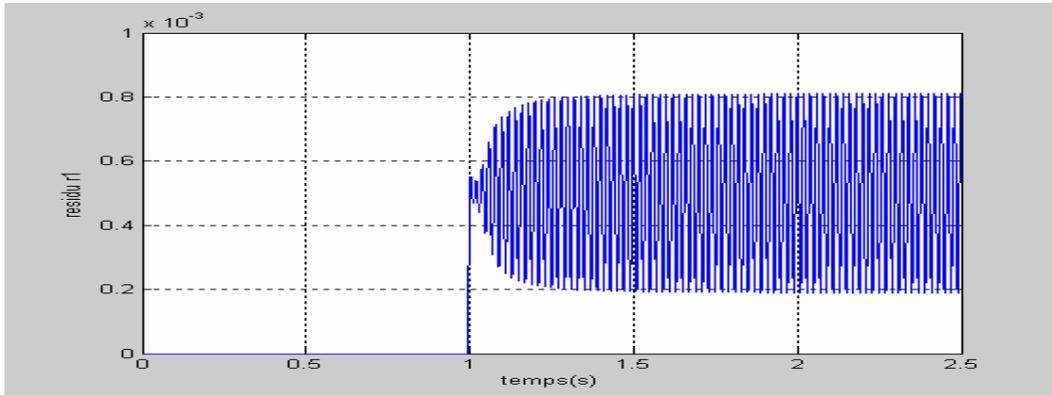


Figure III.5. Résidus en présence d'un défaut statorique à t = 1 sec.



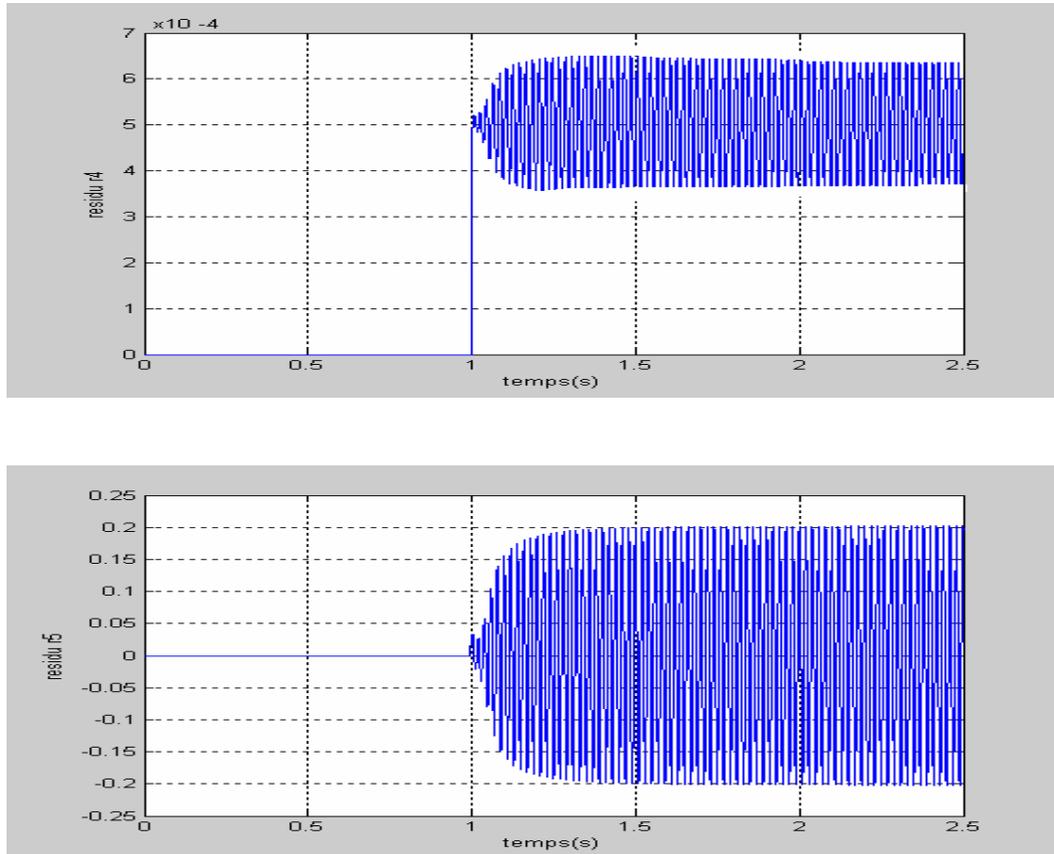


Figure III.6. Résidus en présence d'un défaut rotorique à $t = 1$ sec

✚ Les figures III.3, montrent que les résidus sont nuls en absence de défauts et de perturbations. La propriété de robustesse des résidus est vérifiée en appliquant une perturbation, on remarque d'après les figures III.4 que les résidus restent toujours nuls en absence de défauts.

✚ Les figures III.5 représentent le comportement des résidus lorsqu'un défaut statorique apparaît à $t=1$ sec. On constate que tous les résidus restent sensiblement nuls sauf le cinquième qui est sensible à ce défaut.

✚ Les figures III.6 illustrent le comportement des résidus suite à l'apparition d'un défaut engendrant des variations des grandeurs rotoriques à l'instant $t=1$ sec. Nous remarquons que tous les résidus s'écartent notablement de zéro.

Ainsi, nous concluons que le choix de la matrice de découplage T , permet non seulement la génération de résidus robustes vis-à-vis des perturbations mais aussi la structuration des résidus. Ceci apparaît clairement dans la table de signatures suivante :

	Variation des grandeurs statoriques	Variation des grandeurs rotoriques	Perturbations
Résidu $r1$	0	1	0
Résidu $r2$	0	1	0
Résidu $r3$	0	1	0
Résidu $r4$	0	1	0
Résidu $r5$	1	1	0

“1” désigne la sensibilité et “0” l’insensibilité du résidu vis-à-vis de la variation considérée.

Table de signatures en utilisant l’observateur de défauts, associé à l’observateur par modes glissants.

III.3.2. Observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire

Le système non linéaire considéré a la structure suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x(t), u(t), \theta_d, \theta_f) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

$\theta_f \in R^q$ est le vecteur de paramètres dont les variations autour de ses valeurs nominales θ_{f0} représente les effets des défauts composants / actionneurs. En fonctionnement normal, il vient $\theta_f = \theta_{f0}$

Le développement de III.24 en série de Taylor autour des valeurs nominales donne

$$A(x, u, \theta_d, \theta_f) \approx A(x, u, \theta_{d0}, \theta_{f0}) + \frac{\delta A(x, u, \theta_d, \theta_f)}{\delta \theta_d} \Big|_{\theta_{d0}, \theta_{f0}} \Delta \theta_d + \frac{\delta A(x, u, \theta_d, \theta_f)}{\delta \theta_f} \Big|_{\theta_{d0}, \theta_{f0}} \Delta \theta_f$$

Où :

$$\Delta\theta_d = \theta_d - \theta_{d0} \quad \text{et} \quad \Delta\theta_f = \theta_f - \theta_{f0}$$

Posons :

$$d = \Delta\theta_d \quad , \quad f = \Delta\theta_f \quad , \quad E_d(x,u) = \left. \frac{\delta A(x,u,\theta_d,\theta_f)}{\delta\theta_d} \right|_{\theta_{d0},\theta_{f0}} \quad , \quad E_f(x,u) = \left. \frac{\delta A(x,u,\theta_d,\theta_f)}{\delta\theta_f} \right|_{\theta_{d0},\theta_{f0}}$$

On aura :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x,u) + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

➤ Génération de l'état découplé

Une transformation non linéaire de l'état $T(x)$, est employée pour générer l'état découplé.

La dynamique de l'état découplé est donnée par :

$$\dot{z} = \frac{\delta T(x)}{\delta x} (A(x,u) + E_d(x)d(t) + E_f(x)f(t)) \quad (\text{III.26})$$

$T(x)$ doit satisfaire la condition suivante (condition de découplage) :

$$\frac{\delta T(x)}{\delta x} E(x) = 0 \quad (\text{III.27})$$

Sous certaines conditions, il existe $n \sim q$ solutions indépendantes du système III.27 tel que $\text{rang}(E_d(x)) = q$, $\forall x \in R^n$. Afin d'obtenir un modèle représentatif du procédé, il est nécessaire d'augmenter l'état découplé z par les sorties y^* vérifiant la relation :

$$x = \psi_0(z, y^*) \quad (\text{III.28})$$

Où $y^* = \Phi^*(y)$ représente une transformation linéaire ou non du vecteur de sortie. Ainsi, le modèle d'état du système peut être réécrit, en considérant l'état découplé z , comme suit :

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{\delta T(x)}{\delta x} (A(x, u) + E_f(x)f) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \\ y = h(x) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Le principe de découplage non linéaire présenté ici consiste finalement à projeter dans un espace l'état x du système à l'aide d'une transformation non linéaire $T(x)$, tel que la dynamique du nouvel état z ainsi projeté soit découplé des entrées inconnues.

➤ Synthèse de l'observateur

Le principe d'observation est illustré dans la figure suivante :

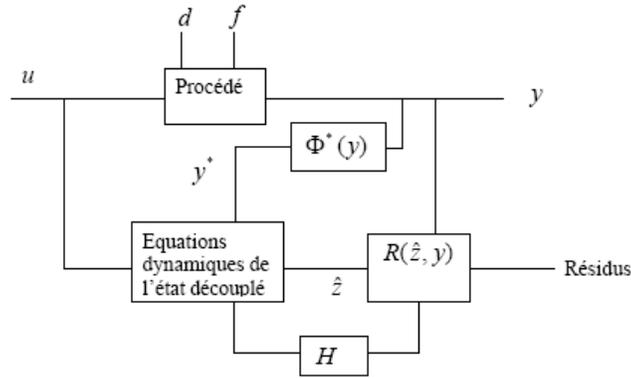


Fig III.7. Structure de l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.

Cet observateur est défini par le système d'équations suivant

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \frac{\delta T(\hat{x})}{\delta \hat{x}} A(\hat{x}, u) + H R(\hat{z}, y) \Big|_{\hat{x}=\Psi_0(\hat{z}, \hat{y}^*)} \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \Big|_{\hat{x}=\Psi_0(\hat{z}, \hat{y}^*)} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Où \hat{x} et \hat{z} représente respectivement les estimations de x et de z .

Le vecteur de résidus r est donné par $r = R(\hat{z}, y)$. H est le gain de l'observateur.

Il suffit donc de choisir H tel que $\dot{e} = F(t)e$ soit asymptotiquement stable pour assurer la stabilité locale de l'observateur.

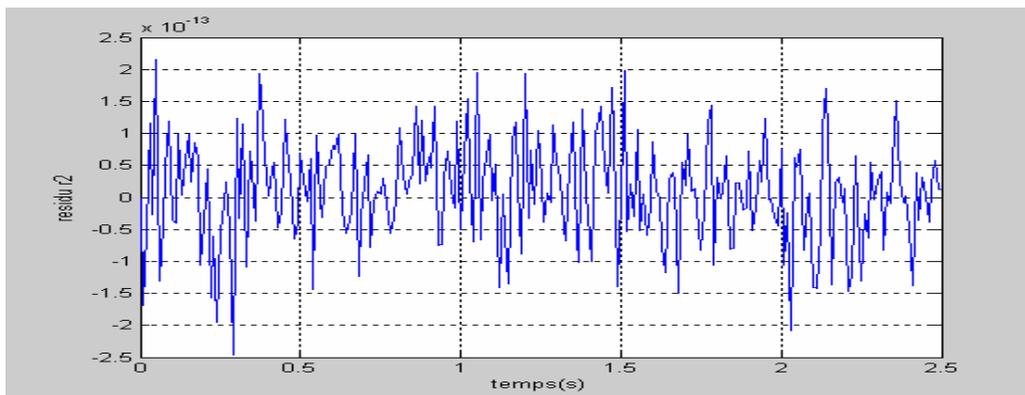
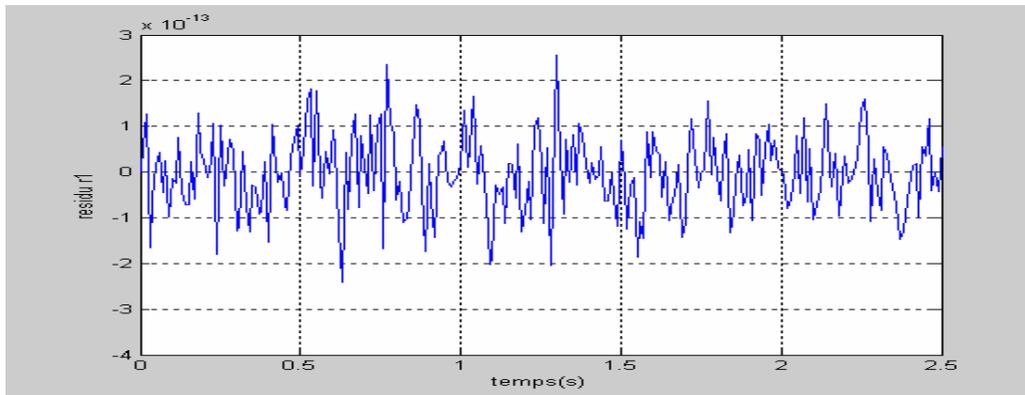
➤ **Application sur la MAS**

On suppose que le moment d'inertie J , le coefficient de frottement visqueux f_v et le couple de charge C_r des valeurs incertaines.

Donc le vecteur relatif aux incertitudes paramétriques et le vecteur relatif aux défauts son donnés par :

$$\theta_d = [C_r \quad f_v \quad J]^T \text{ et } \theta_f = [R_s \quad L_s \quad R_r \quad L_r]^T$$

Les défauts sont produits, en augmentant les valeurs nominales des résistances statoriques et/ou rotoriques. Le comportement des résidus est illustré dans les figures suivantes :



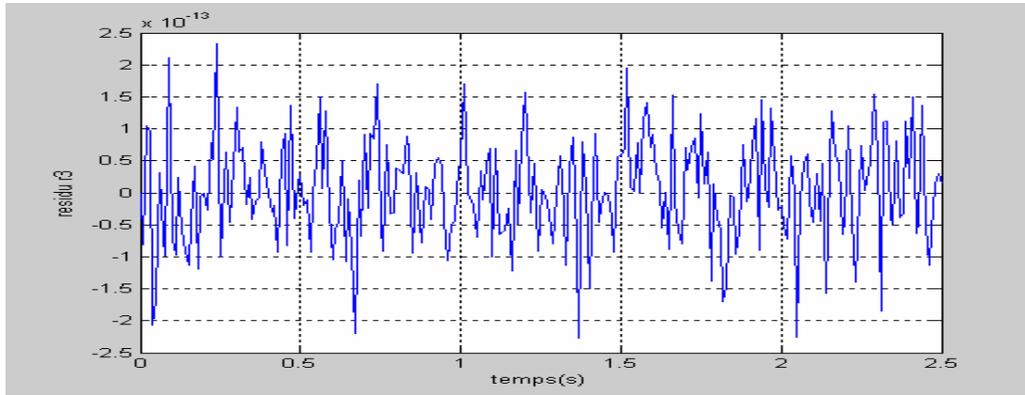
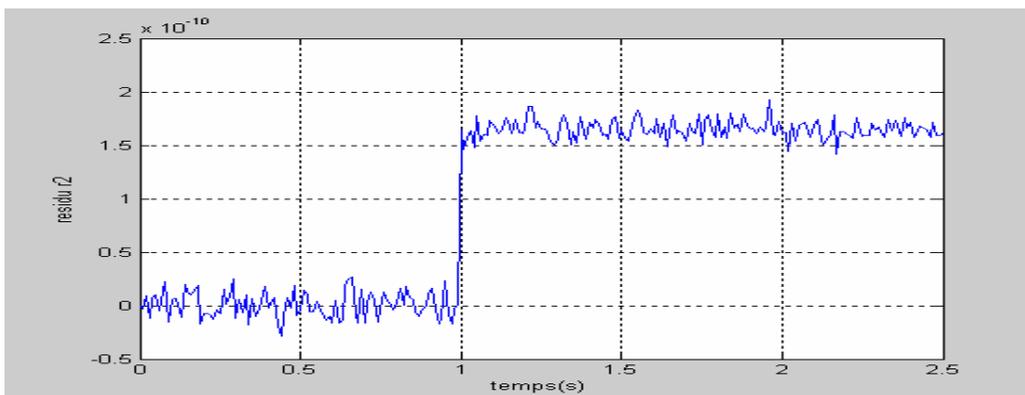
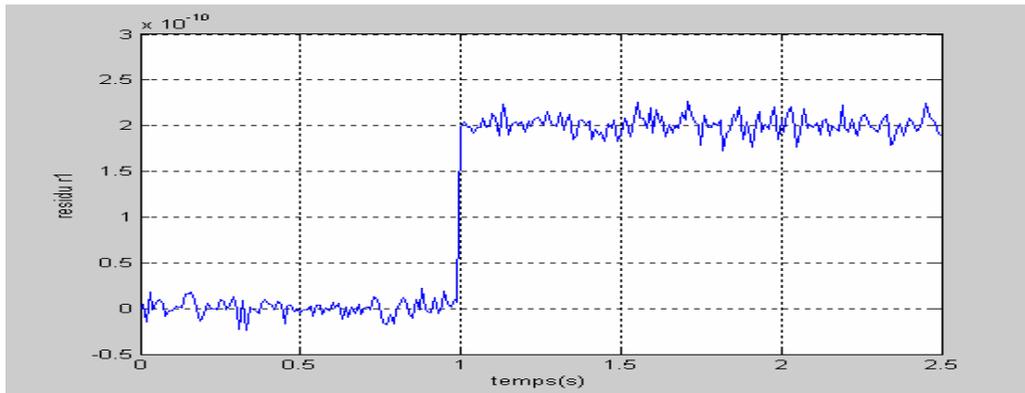


Fig III.8: En absence de défauts.



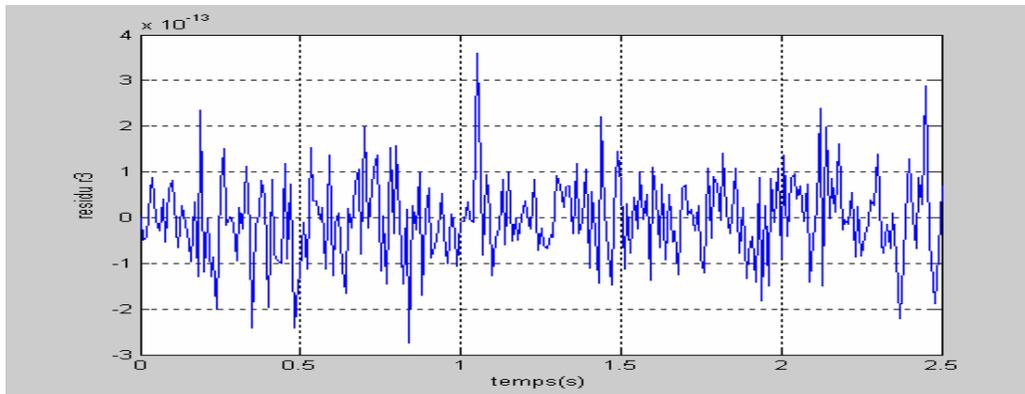
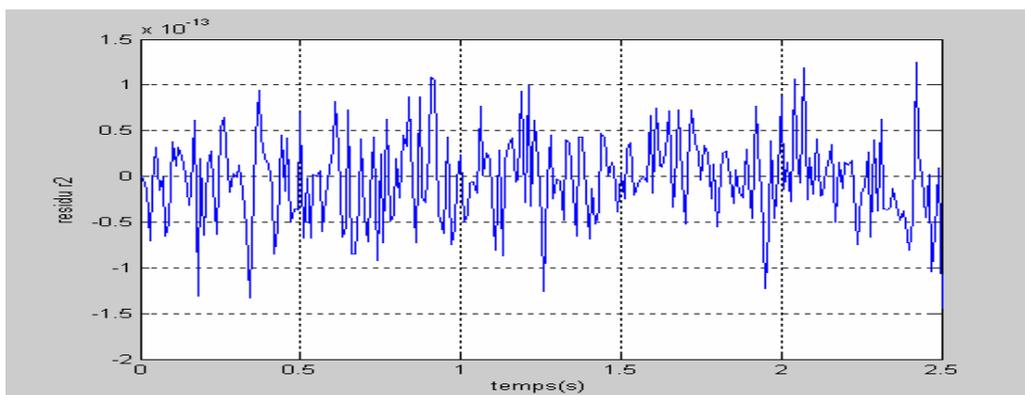
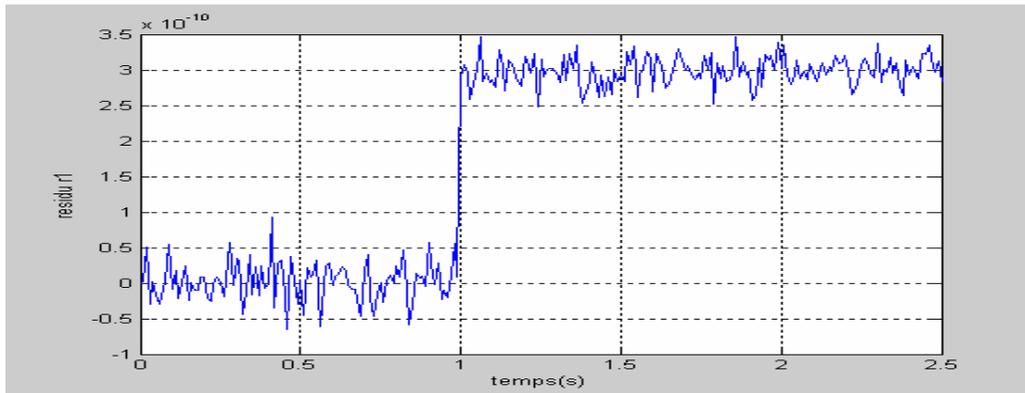


Fig. III.9 En présence d'un défaut statorique.



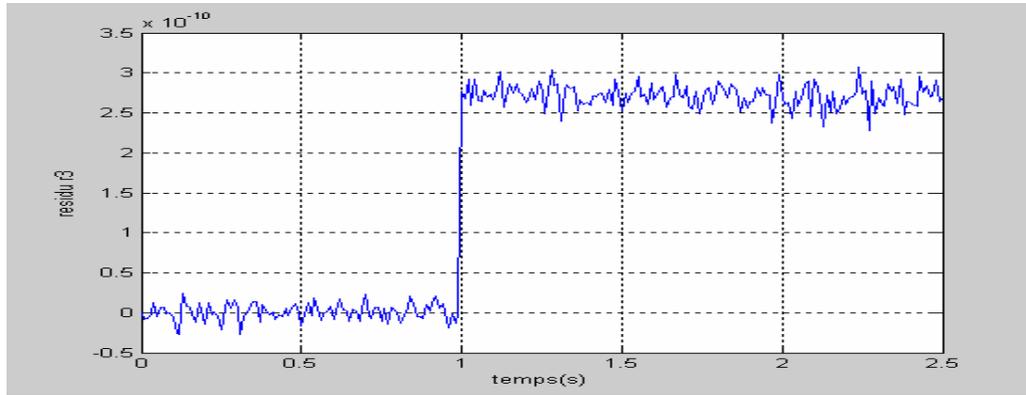


Fig. III.10. En présence d'un défaut rotorique.

✚ La figure III.8 illustre le comportement des trois résidus $r1$, $r2$ et $r3$ en régime permanent (après le transitoire des observateurs), dans le cas d'une machine saine. On observe alors que les trois résidus obtenus ont une valeur moyenne sensiblement nulle.

✚ La figure III.9 illustre le comportement des trois résidus $r1$, $r2$ et $r3$ en présence d'un défaut statorique. Le troisième résidu n'est pas sensible à ce type de défaut.

✚ La figure III.10 illustre le comportement des trois résidus $r1$, $r2$ et $r3$ en présence d'un défaut rotorique. Le troisième résidu n'est pas sensible à ce type de défaut. Le troisième résidu reste alors de valeur moyenne sensiblement nulle.

Le premier résidu est un indicateur fiable de l'état de la machine asynchrone, puisque celui-ci est rendu uniquement sensible aux défaillances.

Par contre, les deux autres résidus, dont le rôle est de fournir une information sur l'organe défectueux (stator ou rotor), sont sensibles aux paramètres incertains Cr , f_v et J .

On a construit un banc de trois observateurs tels que :

	R_s / L_s	R_r / L_r	Cr	f_v	J
Résidu $r1$	1	1	0	0	0
Résidu $r2$	1	0	1	1	1
Résidu $r3$	0	1	1	1	1

Table des signatures en utilisant l'observateur Observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire

L'analyse de comportement des résidus n'est pas suffisante pour conclure sur la présence et la nature de la défaillance. A la procédure de génération des résidus, nous avons fait suivre une stratégie de décision.

Les résultats obtenus avec une simple logique à seuil sur les résidus ont révélé un taux de fausses décisions important.

III.3.3. Comparaison entre les deux approches

Deux approches différentes sont utilisées pour la détection et la localisation des défauts de la machine asynchrone. La première, consiste à estimer les états à l'aide d'un observateur par modes glissants, robuste vis-à-vis des défauts et des perturbations et de sorte que le régime de glissement soit maintenu en leur présence.

Cette approche ne nécessite pas une linéarisation du modèle, elle s'applique directement sur le modèle non linéaire. La matrice de découplage a permis de découpler les résidus des entrées inconnues et de distinguer entre les deux variations.

La deuxième approche résulte du compromis isolation - robustesse. Elle présente certaines limitations. En effet, le résidu associé au premier observateur est un indicateur fiable de l'état de la machine asynchrone, puisque celui-ci est rendu uniquement sensible aux défaillances. Par contre, les résidus associés aux deuxième et troisième observateurs, dont le rôle est de fournir une information sur l'organe défectueux (stator ou rotor), ne sont pas insensibles aux paramètres incertains.

La première approche s'avère plus efficace pour la génération des résidus car elle s'applique pour les systèmes linéaires et non linéaires et ne nécessite pas de conditions de synthèse restrictives.

Elle peut éventuellement permettre l'estimation des défauts, ce qui peut être utilisé pour compenser l'effet de ces derniers.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a proposé, dans le cadre de détection et localisation de défauts quelques observateurs utilisés dans ce domaine. On a présenté l'observateur proportionnel et l'observateur par mode glissant de Zak et Walkat. Puis on a appliqué sur la machine asynchrone l'observateur de défauts associé à un observateur robuste et l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire à la machine asynchrone.

Les deux observateurs ont répondu au problème de détection et localisation de défaut. Le deuxième observateur ne peut être systématiquement appliquée à tout processus non linéaire. En effet, il existe des conditions d'existence et de rang particulièrement restrictives à satisfaire.

Aussi, la matrice de découplage (dans les deux cas) a non seulement permis de découpler les résidus des entrées inconnues mais aussi de distinguer entre les deux variations. Les objectifs de découplage et d'isolation sont ainsi réalisés.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'intérêt croissant des industriels pour le diagnostic des entraînements électriques, justifie l'accent mis par la recherche sur la surveillance des défauts des machines électriques, notamment, les machines asynchrones. L'élaboration des techniques de modélisation des défauts est devenue indispensable, en vue de l'étude de l'impact des défauts et la recherche des signatures significatives.

Notre travail a porté sur le diagnostic de la machine asynchrone à base d'observateurs. Nous avons commencé par aborder les différents défauts qui peuvent altérer le bon fonctionnement de la machine, leurs natures, effets, répartitions sur les parties de la machine ainsi que leurs signatures. Dans le même chapitre nous avons donné une classification des méthodes de diagnostic. Ces méthodes se répartissent en deux grandes classes selon que l'on dispose ou non d'un modèle mathématique du processus à surveiller. Le système de diagnostic doit être en mesure de réaliser les trois étapes essentielles suivantes : la détection d'un défaut, la localisation du défaut et la prise de décision pour un retour à la normale. Ces étapes sont aussi représentées dans le premier chapitre.

La modélisation de la machine asynchrone n'est pas à négliger pour un bon diagnostic. Donc elle a fait l'objet du second chapitre. Les différentes caractéristiques de la machine asynchrone sont obtenues à l'aide de la transformation de Park, en régime sain puis en présence de défauts.

Le dernier volet de cette étude concerne la détection de défauts à base d'observateurs. Nous avons présenté en premier lieu des observateurs utilisés dans le domaine de diagnostic. Ensuite nous avons utilisé deux observateurs pour générer les résidus. Le premier est un observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants, qui est bien un observateur robuste vis-à-vis des perturbations et des défauts. Le deuxième est un observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire qui est réalisé en deux étapes : la génération de l'état découplé, puis la synthèse de l'observateur.

Nous avons présenté une stratégie possible de détection et de localisation des défaillances, basée sur l'utilisation d'un banc de trois observateurs.

Par la suite, une comparaison est établit entre les résultats obtenus avec les deux observateurs.

Nous avons constaté que les deux méthodes sont efficaces pour la génération de résidus robustes, permettant une détection et une localisation des défauts engendrant des variations des grandeurs statoriques et rotoriques. Néanmoins, elles présentent des limitations dues au fait qu'il n'est pas possible de distinguer entre les variations normales des résistances et celles engendrées par l'apparition d'un défaut. L'utilisation de test de décision s'avère donc nécessaire.

ANNEXE

I. Paramètre de la machine asynchrone :

Les paramètres de la machine utilisés dans les simulations sont :

Puissance nominale : $P = 4\text{kW}$

Tension nominale : $U = 230/400\text{ V}$

Fréquence nominale : $f = 50\text{ Hz}$

Vitesse nominale : $N = 2840\text{ tr/min}$

Résistance statorique : $R_s = 1.595\ \Omega$

Résistance rotorique : $R_r = 1.3053\ \Omega$

Inductance cyclique du stator : $L_s = 0.0040\text{ H}$

Inductance cyclique du rotor : $L_r = 0.0033\text{ H}$

Inductance mutuelle cyclique : $M = 0.3036\text{ H}$

Nombre de paires de pôles : $p = 2$

Moment d'inertie : $J = 0.045\text{ Kg.m}^2$

Couple résistant : $C_r = 13.4497$

Coefficient de frottement : $f = 0.0038\text{ Kg.m}^2/\text{s}$

II. Modélisation de l'effet des défauts

En définissant les vecteurs défauts et perturbations respectivement par:

$$f = \begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_s \\ \Delta R_r \\ \Delta L_r \end{bmatrix}, \text{ tel que : } \begin{bmatrix} \Delta R_s = R_s - R_{s0} \\ \Delta L_s = L_s - L_{s0} \\ \Delta R_r = R_r - R_{r0} \\ \Delta L_r = L_r - L_{r0} \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} \Delta C_r \\ \Delta K_f \\ \Delta j \end{bmatrix}, \text{ tel que } \begin{cases} \Delta C_r = C_r - C_{r0} \\ \Delta K_f = K_f - K_{f0} \\ \Delta j = j - j_0 \end{cases}$$

Les distributions $E_d(x)$ et $E_f(x)$ sont déterminées en effectuant un développement de Taylor autour des valeurs nominales. On obtient alors :

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

$$E_{f1}(x) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial R_s} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} x_1 \\ -\frac{1}{\sigma L_s} x_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

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

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

Où :

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

$$\gamma_3 = \frac{2L_m R_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2} + \frac{2L_m R_r}{L_r (L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^3 L_r R_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, K_1 = -\frac{L_m L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, K_2 = K_1$$

$$K_3 = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^2}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, a_1 = \frac{L_m R_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, a_2 = -\frac{L_m R_r}{L_r^2 (L_s L_r - L_m^2)} - \frac{L_m R_r L_s}{L_r (L_s L_r - L_m^2)^2}$$

$$a_3 = \frac{R_r}{L_r (L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^2 R_r}{L_r (L_s L_r - L_m^2)^2}, e_1 = -\frac{L_r^2}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, e_2 = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)} - \frac{L_r L_s}{(L_s L_r - L_m^2)^2}$$

$$e_3 = \frac{2L_m L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}$$

$E_f =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_r} & p\Omega^* + \omega_r^* & \frac{L_m R_r}{L_f L_r} & \frac{pL_m \Omega^*}{L_f} & pi_{sq}^* + p \frac{L_m}{L_f} \Phi_{rq}^* \\ -p\Omega^* - \omega_r^* & -\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_f} & -\frac{pL_m \Omega^*}{L_f} & \frac{L_m R_r}{L_f L_r} & pi_{sq}^* + p \frac{L_m}{L_f} \Phi_{rq}^* \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & \omega_r^* & 0 \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -\omega_r^* & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ -\frac{pL_m}{jL_r} \phi_{rq}^* & \frac{pL_m}{jL_r} \phi_{rd}^* & -\frac{pL_m}{jL_r} i_{sd}^* & \frac{pL_m}{jL_r} i_{sq}^* & -\frac{K_f}{j} \end{bmatrix}$$

$$E_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j_0} & -\frac{\Omega^*}{j_0} & -\frac{1}{j_0^2} \left(\frac{pL_m}{L_r} i_{sq} \phi_{rd}^* - \frac{pL_m}{L_r} i_{sd}^* \phi_{rq}^* - K_{f0} \Omega^* - C_{r0} \right) \end{bmatrix}$$

III. Synthèse d'un observateur par modes glissants avec capteur de vitesse pour la Machine asynchrone

Les mesures dont nous disposons sont la vitesse et les courants statoriques. 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'observation sur les autres variables. Ainsi, il est possible de supprimer l'observation de la variable mécanique.

Soit l'observateur par modes glissants de la machine asynchrone, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\gamma \hat{x}_1 + a \hat{x}_3 + Kp \hat{x}_4 x_5 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\gamma \hat{x}_2 + a \hat{x}_4 - Kp \hat{x}_3 x_5 + eV_2 + \lambda_2^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_3 = b x_1 - c \hat{x}_3 - p \hat{x}_4 x_5 + \lambda_3^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_4 = b x_2 - c \hat{x}_4 + p \hat{x}_3 x_5 + \lambda_4^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_5 = d(\hat{x}_3 x_2 - x_1 \hat{x}_4) - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j} x_5 + q_1(x_5 - \hat{x}_5) + \lambda_5^T I_s \end{cases}$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \gamma = \frac{R_s L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}, T_r = \frac{L_r}{R_r}, K = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}, a = \frac{K}{T_r}, b = \frac{L_m}{T_r}, e = \frac{1}{\sigma L_s}, c = \frac{1}{T_r}, d = \frac{p L_m}{j L_r}$$

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

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

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

Soit la fonction de Lyapunov définie positive suivante :

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

On doit vérifier les deux conditions :

$$S = 0 \Rightarrow e_1 = e_2 = 0$$

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

En posant :

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

Alors :

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

Les gains δ_1 et δ_2 sont déterminés de manière à assurer la convergence de l'erreur d'estimation vers zéro. Par conséquent :

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

Sur la surface de glissement on a :

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

Pour avoir la dynamique réduite suivante on doit choisir :

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda_{s1}}{\delta_1} & \frac{\lambda_{s2}}{\delta_2} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} x_2 & -x_1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \lambda_{s1} & \lambda_{s2} \\ \lambda_{s1} & \lambda_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & -px_5 \\ px_5 & -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix}$$

La stabilité de l'observateur est assurée par les deux conditions suivantes :

$$\begin{cases} \delta_1 \geq \|e_3\|_{\max} \\ \delta_2 \geq \|e_4\|_{\max} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} q_1 > 0 \\ q_3 > 0 \\ q_4 > 0 \end{cases}$$

VI. Observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire

Les fonctions vectorielles de distribution des entrées inconnues et des défauts sont alors déterminées à l'aide de l'approximation (5):

$$E(x)d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{J_0} & \frac{-\Omega}{J_0} & \frac{-1}{J_0^2} (pMi_{qs}i_{dr} - pMi_{ds}i_{qr} - fv_0\Omega - C_{r0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C_r \\ \Delta fv \\ \Delta J \end{bmatrix}$$

$$E_f(x)f = \begin{bmatrix} -\xi_0 L_r i_{ds} & \frac{\delta A_1}{\delta L_s} - \xi_0^2 L_r^2 v_{ds} & \xi_0 Mi_{dr} & \frac{\delta A_1}{\delta L_r} + (\xi_0 - \xi_0^2 L_r L_s) v_{ds} \\ -\xi_0 L_r i_{qs} & \frac{\delta A_2}{\delta L_s} - \xi_0^2 L_r^2 v_{sq} & \xi_0 Mi_{rq} & \frac{\delta A_2}{\delta L_r} + (\xi_0 - \xi_0^2 L_r L_s) v_{sq} \\ \xi_0 Mi_{ds} & \frac{\delta A_3}{\delta L_s} + \xi_0^2 L_r M v_{ds} & -\xi_0 L_s i_{dr} & \frac{\delta A_3}{\delta L_r} + \xi_0^2 L_s M v_{ds} \\ \xi_0 Mi_{qs} & \frac{\delta A_4}{\delta L_s} + \xi_0^2 L_r M v_{sq} & -\xi_0 L_s i_{qr} & \frac{\delta A_4}{\delta L_r} + \xi_0^2 L_s M v_{sq} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_s \\ \Delta R_r \\ \Delta L_r \end{bmatrix}$$

On peut être réécrit de la façon suivante :

$$E_{f(x)} = \begin{bmatrix} -\xi_0 L_r i_{ds} & \frac{\delta A_1}{\delta L_s} & -\xi_0^2 L_r^2 v_{ds} & 0 & \xi_0 Mi_{dr} & \frac{\delta A_1}{\delta L_r} & \xi_0 - \xi_0^2 L_r L_s & 0 \\ -\xi_0 L_r i_{qs} & \frac{\delta A_2}{\delta L_s} & 0 & -\xi_0^2 L_r^2 & \xi_0 Mi_{rq} & \frac{\delta A_2}{\delta L_r} & 0 & \xi_0 - \xi_0^2 L_r L_s \\ \xi_0 Mi_{ds} & \frac{\delta A_3}{\delta L_s} & \xi_0^2 L_r M & 0 & -\xi_0 L_s i_{dr} & \frac{\delta A_3}{\delta L_r} & \xi_0^2 M L_s & 0 \\ \xi_0 Mi_{qs} & \frac{\delta A_4}{\delta L_s} & 0 & \xi_0^2 L_r M & -\xi_0 L_s i_{rq} & \frac{\delta A_4}{\delta L_r} & 0 & \xi_0^2 M L_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f = [\Delta R_s \quad \Delta L_s \quad \Delta L_s v_{ds} \quad \Delta L_s v_{qs} \quad \Delta R_r \quad \Delta L_r \quad \Delta L_r v_{ds} \quad \Delta L_r v_{qs}]^T$$

Où $E_f(x)$ ne dépend plus de la commande u .

On va construire un banc de trois observateurs tels que:

	R_s / L_s	R_r / L_r	Cr	f_v	J
Résidu $r1$	1	1	0	0	0
Résidu $r2$	1	0	1	1	1
Résidu $r3$	0	1	1	1	1

Trois fonctions vectorielles de distribution des entrées inconnues $E_i(x), i = 1, 2, 3$ correspondant aux trois observateurs sont construites :

$$E_1(x) = E(x) \quad ; \quad E_2(x) = [e_5 \quad e_6 \quad e_7 \quad e_8] \quad ; \quad E_3(x) = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4]$$

Où e_i représente la i^{eme} colonne de $E_f(x)$

La première étape de synthèse consiste à trouver une transformation non linéaire de l'état $T_1(x)$ afin de construire un état $zI = T_1(x)$ telle que zI soit solution de l'équation

$$\frac{\delta T_1(x)}{\delta x} E_1(x) = 0$$

On choisit : $z_1 = T_1(x) = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{ds} + i_{dr} \quad i_{qs} + i_{qr}]^T$

L'état découplé est augmenté de la sortie $y^*_1 = y_3$ afin de déterminer la fonction inverse $\psi_{01}(z_1, y^*_1)$ telle que

$$\psi_0(z_1, y^*_1) = [z_{11} \quad z_{12} \quad z_{13} - z_{11} \quad z_{14} - z_{12} \quad y_3]^T$$

L'observateur n^o1 est donc défini par le système d'équations

$$\dot{z}_1 = \frac{\delta T_1(x)}{\delta x} \left(A(\hat{x}) + Bu \right) \Big|_{\theta_0, \theta_{f0}} + H_1(\hat{x}) R_1(\hat{z}_1, y) \Big|_{\psi_{01}(z_1, y^*_1)}$$

$$\hat{y} = C \hat{x} \Big|_{\hat{x} = \psi_{01}(z_1, y^*_1)}$$

et le résidu associé est donné par :

$$r_1(t) = W_1 R_1 = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} \hat{z}_{11} - y_1 \\ \hat{z}_{12} - y_2 \end{pmatrix}^T$$

Le gain $H_1(\hat{x})$ est alors déterminé de façon à assurer la stabilité locale de l'observateur au point d'équilibre $e_1 = 0$, en absence de défauts. H_1 est donné par

$$H_1(\hat{x}) = \begin{pmatrix} \lambda 1_1 + \xi_0 (L_{r0} R_{s0} + M R_{r0}) & p \xi_0 M y_3 (L_{r0} - M) \\ - p \xi_0 M y_3 (L_{r0} - M) & \lambda 1_2 + \xi_0 (L_{r0} R_{s0} - M R_{r0}) \\ \xi_0 (R_{s0} (L_{r0} - M) + R_{r0} (M - L_{s0})) & - p \xi_0 y_3 (L_{s0} - M) (L_{r0} - M) \\ p \xi_0 y_3 (L_{s0} - M) (L_{r0} - M) & \xi_0 (R_{s0} (L_{r0} - M) + R_{r0} (M - L_{s0})) \end{pmatrix}$$

On choisit :

$$\lambda_1 = -0.2 ; \quad \lambda_2 = -0.1 \text{ pour assurer la convergence de l'observateur.}$$

L'observateur n°2.

De même que le premier observateur $z_2 = [L_{s0} i_{ds} + M i_{dr} \quad L_{s0} i_{qs} + M i_{qr} \quad \Omega]^T$

Qui est complété par $y_2^* = (y_1 \quad y_2)^T$ nous permet de construire la fonction inverse

$$\Psi_{0_2(z_2, y_2^*)} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \frac{z_{2_1} - L_{s0}y_1}{M} & \frac{z_{2_2} - L_{s0}y_2}{M} & z_{2_3} \end{bmatrix}^T$$

L'observateur $n^\circ 2$ est alors défini par les équations dynamiques suivantes :

$$\dot{z}_2 = \frac{\delta T_2(x)}{\delta x} \left(A(\hat{x}) + Bu \right) \Big|_{\hat{x}=\theta_{f_0}} + H_2(\hat{x})R_2(\hat{z}_2, y) \Big|_{\Psi_{0_2}(x_2, y_2^*)}$$

$$\hat{y} = C \hat{x} \Big|_{\hat{x}=\Psi_{0_2}(x_2, y_2^*)}$$

et le résidu $r_2(t)$ est donné par $r_2(t) = R_2(\dot{z}_2, y) = \dot{z}_{2_3} - y_3$

Le gain H_2 permettant d'assurer la stabilité locale de l'observateur au point d'équilibre $e_2 = 0$ est alors déterminé à l'aide des relations :

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \lambda_2 + \frac{fv_0}{J_0} \end{bmatrix}^T ; \lambda_2 = -100$$

L'observateur $n^\circ 3$

$$z_3 = [Mi_{ds} + L_{r0}i_{dr} \quad Mi_{qs} + L_{r0}i_{qr} \quad \Omega]^T$$

qui complété par $y_3^* = [y_1 \quad y_2]^T$ permet de construire la fonction inverse

$$\Psi_{0_3}(z_3, y_3^*) = (y_1 \quad y_2 \quad \frac{z_{3_1} - My_1}{L_{r0}} \quad \frac{z_{3_2} - My_2}{L_{r0}} \quad z_{3_3})^T$$

L'observateur $n^\circ 3$ est alors défini par les équations dynamiques suivantes

$$\dot{z}_3 = \frac{\delta T_3(x)}{\delta x} \left(A(\hat{x}) + Bu \right) \Big|_{\hat{x}=\theta_{f_0}} + H_3(\hat{x})R_3(\hat{z}_3, y) \Big|_{\Psi_{0_3}(x_3, y_3^*)}$$

$$\hat{y} = C \hat{x} \Big|_{\hat{x}=\Psi_{0_3}(x_3, y_3^*)}$$

et le résidu associé est donné par $r_3(t) = R_3(\dot{z}_3, y) = \dot{z}_{3_3} - y_3$

Finalement le gain H_3 de l'observateur qui stabilise localement celui-ci, est synthétisé tel que

$$H_3 = \begin{bmatrix} pL_{r0}i_{qr} + pMi_{qs} & -pL_{r0}i_{dr} - pMi_{ds} & \lambda_3 + \frac{fv_0}{J_0} \end{bmatrix}^T ; \lambda_3 = -220$$

Références Bibliographiques

- [1] Abdelkader AKHENAK. ‘‘ Conception d’observateurs non linéaires par approche multi-modèle’’. Thèse de doctorat. Ecole doctorale IAEM Lorraine. 2004.
- [2] Smail BACHIR. ‘‘Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique’’. Thèse de doctorat. Ecole supérieure d’ingénieurs de Poitiers. 2002.
- [3] L. BAGHLI. ‘‘Modélisation et commande de la machine asynchrone’’. Notes de cours. IUFM de Lorraine. 2005.
- [4] Abderazik BIROUCHE. ‘‘ Contribution sur la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides’’. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. 2006.
- [5] Scott BORTOFF. Alan LYNCH. ‘‘synthesis of optimal nonlinear observers’’. IEEE. 1995.
- [6] Malek BOUHARKAT. ‘‘Etude de l’évolution des courants rotoriques d’une machine asynchrone a cage en régime dynamique’’. Thèse de doctorat. Université de Batna .2006.
- [7] Tarek BOUMEGOURA. ‘‘Recherche de signature électrique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d’observateurs en vue du diagnostic ‘’. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lyon. 2001
- [8] Sylvain CANAT. ‘‘Contribution `a la modélisation dynamique d’ordre non entier de la machine asynchrone `a cage’’. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse .2005.
- [9] Carlos CANUDAS de Wit. ‘‘Commande des moteurs asynchrones’’. Hermes. Paris. 2000.

- [10] Ronald CASIMIR. "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes". Thèse de doctorat. Ecole doctorale de Lyon. 2003.
- [11] Gaëtan DIDIER. "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances". Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré – Nancy. 2004.
- [12] Gaëtan DIDIER. Hubert RAZIK. Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone". Dispositif : 02 A01 20717. Module 3810. Université Henri Poincaré – Nancy. 2003.
- [13] Gaëtan DIDIER. Hubert RAZIK. "Sur le détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones". IEEE Numéro 27. Décembre 2001.
- [14] M. DJEMAI. J. BARBOT. O. BETHOUX. "On the problem of fault detection and residual generation". IEEE. December 2000.
- [15] Wassim EL OSTA. "Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles bond graph couplés". Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille. 2005.
- [16] Malek GHANES. "Observation et commande de la machine asynchrone sans capteur mécanique". Thèse de doctorat. Université de Nantes. 2005.
- [17] D. KOUCHIH. "Détection et localisation de défauts de la machine asynchrone : approche par observateurs". Thèse de magister. Centre universitaire de Médéa. 2006.
- [18] Taous Meriem LALEG. "Contribution aux méthodes de diagnostic à base d'observateurs et à la commande tolérante aux défauts". Ecole nationale polytechnique. 2004
- [19] Didier MAQUIN. "Surveillance des processus". UNIVERSITE HENRI POINCARE - NANCY. novembre 2003.
- [20] Didier MAQUIN. José RAGOT. "Diagnostic des systèmes linéaires". Hermes science. Paris. 2000.

- [21] Franck MORAND. ‘‘ Techniques d’observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones’’. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2005.
- [22] Luc MUTREL. ‘‘Le moteur asynchrone : régime statique et dynamique’’. Ellipses. Paris. 1999.
- [23] Olivier ONDEL. ‘‘ Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur-machine asynchrone’’. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lyon. 2006.
- [24] Antonio ORANTES MOLINA. ‘‘Méthodologie pour le placement des capteurs a base de méthodes de classification en vue du diagnostic’’. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2005.
- [25] Michel POLOUJADOFF. ‘‘Machines asynchrones’’. Techniques de l’ingénieur. D 3 485. 1999.
- [26] Patrick RIPOLL. ‘‘ Conception d’un système de diagnostic flou appliqué au moteur automobile’’. Thèse de doctorat. Université de SAVOIE. 1999.
- [30] Frédéric ROTELLA. ‘‘ Observation’’. Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tarbes. 2001
- [31] SCHAEFFER Emmanuel. ‘‘ Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts’’. Thèse de doctorat. École Centrale de Nantes. 1999
- [32] William THOMSON. Mark FENGER. ‘‘industrial application of current signature analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel induction motors’’. IEEE. 2000.

- [33] Rosario TOSCANO. “Commande et diagnostic des systèmes dynamiques”. Ellipses. Paris. 2005.
- [34] Aiping XU. “ Observateurs adaptatifs non-linéaires et diagnostic de pannes”. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1. 2002.
- [35] ZAIDI Saida. “Commande non linéaire du moteur a induction”. Thèse de magister. Université de Batna. 2005.
- [36] Mohamed Ryad ZEMOURI. “ Contribution à la surveillance des systèmes de production à l’aide des réseaux de neurones dynamiques”. Université de Franche-Comté. 2003

التلخيص

التدوير الكهربائي يستعمل أكثر فأكثر الآلات اللامتزامنة الثلاثية الأطوار فمن الضروري كشف الاعطاب التي يمكن أن تظهر فيها و عليه كان ضروريا تطوير طرق المراقبة. لقد اهتمنا في هذا البحث بتشخيص الآلة اللامتزامنة و سلطنا الضوء علي المراقب ذي نظام الانزلاق وكذلك علي المراقب ذي المداخل اللامعروفة مع التفريق اللاخطي.

المفاتيح: التشكيل - الآلة اللامتزامنة - التشخيص - المراقب ذو نظام الانزلاق - المراقب ذو المداخل اللامعروفة.

Résumé

Les entraînements électriques utilisent en plus en plus les machines asynchrones. Il est important de détecter les défauts qui peuvent apparaître dans ces machines et donc de développer des méthodes de surveillance de fonctionnement. Nous nous intéressons dans cette recherche au diagnostic de la machine asynchrone à base d'observateurs. Nous mettrons l'accent sur l'observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants, ainsi que l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.

Mots clés : modélisation, machine asynchrone, diagnostic, observateur par modes glissants, observateur à entrées inconnues.

Abstract

Electrical tractions use more and more the asynchronous machines. It is important to early detect the faults likely to appear in those motors and therefore to implement a preventive maintenance. This research is concerned by the observer- fault detection and isolation in induction machines. We are interested by a fault observer associated with a sliding mode state observer, also, unknown inputs observer with non-linear decoupling.

Key words: modeling, asynchronous machine, diagnosis, sliding mode observer, unknown inputs observer.
