

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draia -Adrar
Faculté des sciences et de la technologie



Département des sciences de technologie
Mémoire pour l'obtention du diplôme de

Mastère en électrotechnique

Option : Commande des machines électriques

INTITULE :

**Diagnostic d'une machine asynchrone à
cage
«Partie Rotor»**

Présenté par :

-RAHMOUNI Mohammed

-MEZOUAR Abdelhak

Devant le jury

Mr : BELLALI Badreddine

Encadreur

Mr : MANSOURI Smail

Président

Mr: YAICHI Brahim

Examineur

Année Universitaire 2016 / 2017

Résumé

Les machines asynchrones a fait preuve de son importance, ses avantages. L'avancement enregistré dans le domaine des convertisseurs statiques accélère l'emploi des ces machine dans l'industrie y compris les applications critiques et vitales.

La sûreté de fonctionnement des ces systèmes doit être surveillée par les modules de diagnostic en temps-réel afin de minimiser les pannes pour planifier les séances de maintenance. Dans cette étude, ce module est conçu par l'emploi d'un filtre de Kalman étendu, qui est convenable pour le modèle non linéaire de la machine, Cet estimateur à comme but de surveiller les grandeurs des variables non mesurables de la machine ainsi que les paramètres du rotor à cage d'écurie qui est dans cette étude le sujet de défaillance, une simulation numérique à montré l'utilité de ces choix.

Mots clés : machine asynchrone, surveiller, filtre de Kalman étendu, modèle non linéaire, défaillance, paramètres du rotor

Abstract

The asynchrones machines has shown its importance and its benefits. The advancement in the field of static converters accelerates the use of these machines in the industry including critical and vital applications.

The dependability of these systems must be monitored by real-time diagnostic modules in order to minimize failures and for the purpose of scheduling maintenance sessions. In this study, this module is designed by using an extended Kalman filter, which is suitable for the non linear model of the machine ,This estimator has as a goal the monitoring of magnitudes of the non-measurable variables of the machine as well as the parameters of the squirrel cage rotor which is in this study the subject of failures. A numerical simulation showed the utility of these choices.

ملخص

الالات الكهربائية الامتزازمنة اتبتت اهميتها و ميزاتها. التقدم المسجل في ميدان المحولات الساكنة سرع استخدام هذه الالات في الصناعة بما فيها الاستعمالات الحساسة و الحيوية.

اعتمادية هذه الانظمة يجب ان ترصد بوحدات تشخيص الاعطال في الزمن الفعلي للحد من حالات الفشل و للتخطيط لدورات الصيانة. في هذه الدراسة تم تصميم هذه الوحدة باستخدام مرشح كالمان الموسع، و الذي يعتبر مناسباً للنموذج غير الخطي لالة هذا الملاحظ هدفه مراقبة المقادير غير القابلة للقياس في الالة بالإضافة الى المعلومات في الجزء الدوار من الالة ذا القفص السنجابي و الذي هو في هذه الدراسة موضوع الاعطال. المحاكاة العددية اتبتت صواب الخيارات المتخذة .



REMERCIEMENTS



Avant tout, nous remercions le bon dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage pour terminer ce travail.



Nous tenons à présenter notre grandes reconnaissances à notre encadreur Dr. bellali Bader eddine qui par sa confiance et ces conseils qui nous ont portés une attention constante à notre travail, ainsi que pour toutes les encouragements pendant la durée de ce travail et pour les nombreux discussions fructueuses que nous avons eu. Qu'il trouve dans ce mémoire l'expression de notre profonde gratitude.

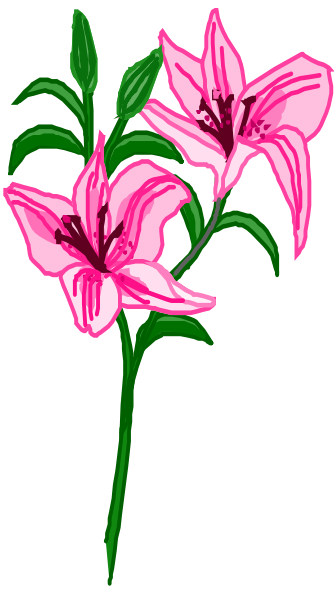
Nous tenons également à exprimer nos plus vifs remerciements aux membres de jury espérant qu'ils jugent très utiles et accepter notre présent mémoire.

*Sans oublier les enseignants qui nous ont soutenus durant les années de notre cursus universitaire au centre universitaire
Nous remercierons aussi Mr.koussa.k, pour ses conseils*

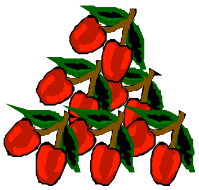
*Enfin, nous adressons nos remerciements à tous ceux que nous avons pu omettre de citer et qui de près
Samir, El Habib, Fatiha, fadila
Ou de loin nous ont soutenus durant ce travail.*

A tous, on dit merci.





DEDICACE



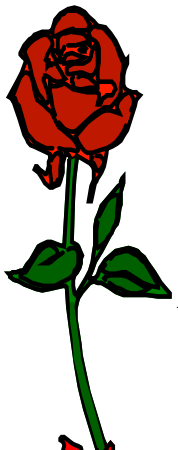
Je dedie ce modeste travail :

A mon père qui à fait de moi le confiance.

A la lumière de ma vie ma chère mère.

Mon frère : saleh

Mon encadreur bader eddine bellali



A toutes les familles

A mon collègue mohammed

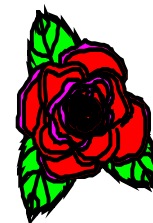
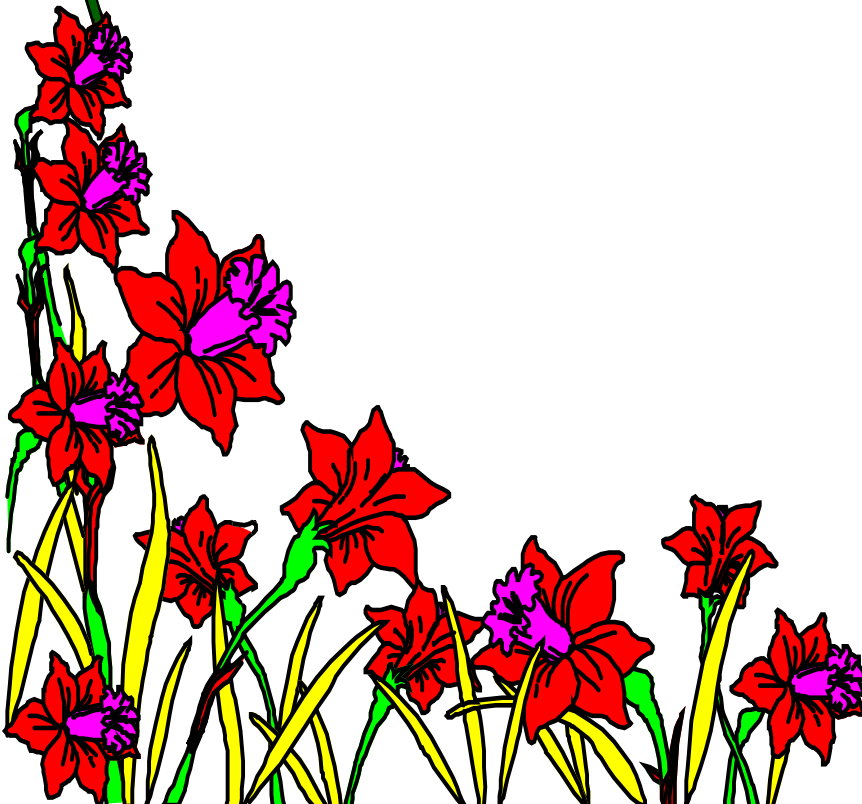
A mes chers amis :khalil,yasser

A tout mes amis dans les appartements

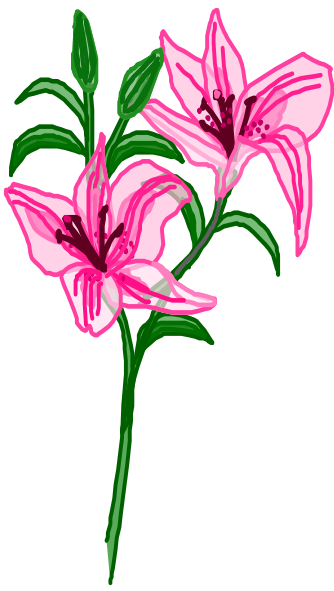
A tout le promotion 5^{ème} A ETT

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin afin que
notre projet .

Abdelhak



III



DEDICACE



Je dedie ce modeste travaile :

A mon père qui à fait de moi le confiance.

A la lumière de ma vie ma chère mère.

Mes frères ahmed et samihe

Mon encadreur bader eddine bellali

A toutes les familles

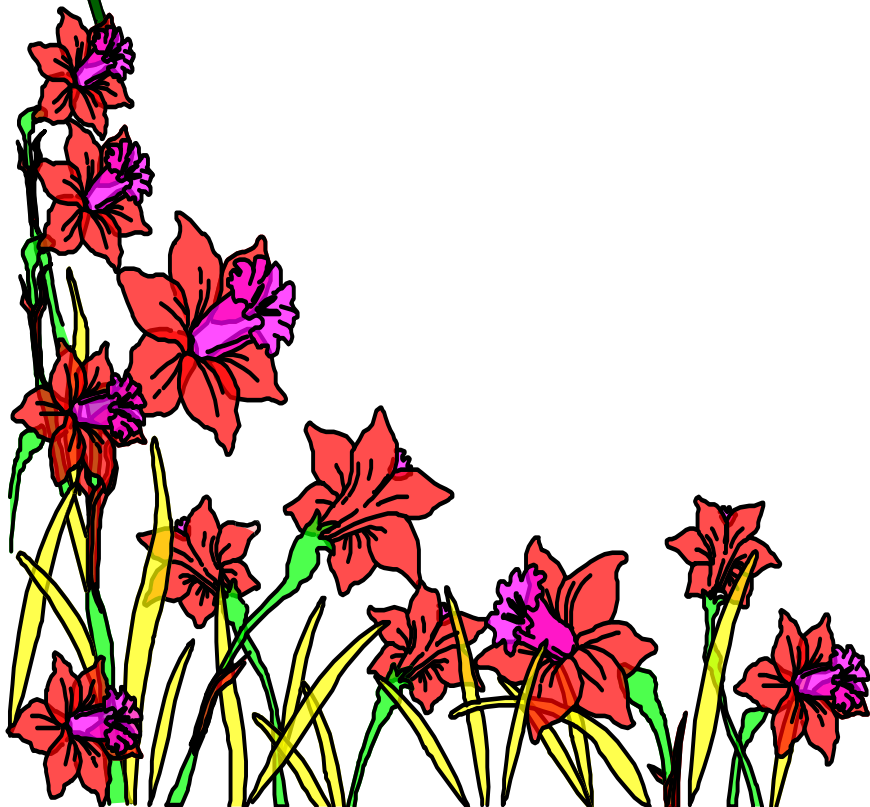
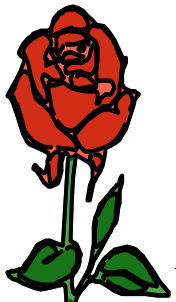
A mon collègue mezouar

A mes chers amis

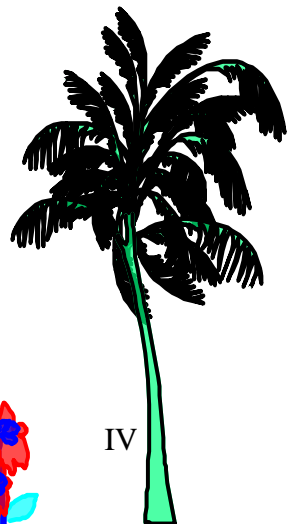
A tout mes amis dans les appartement

A tout le promotion 5^{ème} A ETT

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin afin que
notre projet .



MOHAMMED



IV



Notations

SYMBOLES LIES A MEMOIRE FIN D'ETUDE

$u(t)$: Le vecteur d'entrée
$x(t)$: Le vecteur d'état
$\hat{x}(t)$: Le vecteur d'état estimé
$y(t)$: Le vecteur de sortie
$\hat{y}(t)$: Le vecteur de sortie estimé
A, B et C	: Les matrices du modèle du système
K	: Matrice du gain de l'observateur
$e(t)$: L'erreur d'estimation
P, Q, R	: Les matrices de covariance
f_{exc}	: fréquence d'excentricité
g	: le glissement
f_s	: fréquence d'alimentation
v_{abcs}	: Tensions de phases statoriques
i_{abcs}	: Les courants de phases statoriques
ϕ_{abcs}	: Les flux statoriques
R_s	: Matrice de résistance statorique
L_s	: Matrice d'inductance statorique
$V_{r0,1,..,rcc}$: Tensions de phases rotoriques
$J_{r0,1,..,rcc}$: Les courants de phases rotoriques
$\Phi_{r0,1,..,rcc}$: Les flux rotoriques
R_e	: La résistance de l'anneau de court-circuit
R_{rbk}	: la résistance d'une barre rotorique
L_{bk}	: l'inductance de fuite d'une barre rotorique
i_{rbk}	: le courant circulant dans la barre rotorique
i_{ek}	: Courant du segment de l'anneau de court-circuit
j_m	: Courant de la maille rotorique
j_{acc}	: le courant circulant dans l'anneau de court-circuit intérieur

NOTATIONS

α	: L'angle mécanique entre deux barres rotoriques
L_e	: L'inductance de l'anneau de court-circuit
N_r	: Nombre de barres rotoriques
R_r	: Matrice de résistance rotorique
L_r	: Matrice d'inductance rotorique
M_{sr}	: Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques
$T_{33}(\theta)$: Matrice de Park
C_{33}	: Matrice de Concordia
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$: Les tensions statoriques de Concordia
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$: Les courants statoriques de Concordia
$\phi_{r\alpha}, \phi_{r\beta}$: Les flux rotoriques de Concordia
ω_r	: La vitesse angulaire de la machine
P	: Le nombre de paire de pôles de la machine asynchrone
J	: Le moment d'inertie de la machine
f_e	: Coefficient du frottement
C_{em}	: Le couple électromagnétique
C_{ch}	: Le couple résistant de la machine
L_{sp}, L_{ms}	: L'inductance principale d'une phase statorique
M_s	: L'inductance mutuelle entre phases statoriques.
L_s	: L'inductance totale d'une phase statorique.
M_{rr}	: L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.
L_{rp}	: L'inductance principale d'une maille rotorique

Liste des abréviations :

MAS : machine asynchrone

FKE : filtre de Kalman étendu

Chapiter I

Fig. I.1: stator d'un machine asynchrone.....	4
Fig. I.2 : le rotor acag.....	5
Fig I.3 : Répartition des pannes.....	7
Fig I.4 : les enroulements en cas de défaut	10
.Fig I.5 : Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil.....	11
Fig I.6 : Rupture d'une et de deux portions d'anneaux	11
Fig I.8 : Evolution hypothétique des résistances rotoriques	14
Fig I.9 : L'excentricité statique et dynamique.....	15

ChapiterII

Fig.II.1– Modèle électrique équivalent d'une MAS à cage.....	21
Fig.II.2 :Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques.....	22
Fig.II.3- Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.....	25
Fig.II.4 - Schéma équivalent d'une maille de la cage rotorique.....	25
FigII.5 : Représentation triphasée du rotor.....	31
Fig. II.6 :Représentation spatiale de la transformation triphasée / biphasée.....	33

ChapiterIII

Fig. III.1 : Schéma de principe de : Estimateur ou Observateur.....	37
Fig III.2: Les étapes du filtre de Kalman.....	43
Fig III.3 : Schéma opérationnel du Filtre de Kalman étendue.....	49

Fig III.4: schéma fonctionnel du filter du Kalman étendu.....	53
chapiterVI	
Fig. IV.1 : vitesse de rotation, couple électromagnétique.....	55
Fig. IV.2 : courant statorique.....	56
Fig. IV.3 : courants dans les barres rotoriques Irb1, Irb2, Irb3.....	57
Fig. IV.4 : vitesse de rotation, couple électromagnétique.....	57
Fig.IV.5 : courant statorique.....	58
Fig. IV.6 : courants dans les barres rotoriqueIrb1, Irb2, Irb3	59
Figure IV.7 vitesse de rotation, couple électromagnétique.....	60
Fig.IV.8 courant statorique.....	60
Fig.IV.9 : courants dans les barres rotoriques Irb1, Irb2, Irb.....	61
FigIV.10 : vitesse de rotation, couple électromagnétique.....	62
Fig IV.11 : courant statorique.....	62
figIV.12 : courants dans les barres rotoriques Irb1, Irb2, Irb3.....	63
Fig. IV.13 : courant statorique $I_{s\alpha}$ mesuré et estimée.....	64
Fig. IV.14 : courant statorique $I_{s\beta}$ mesuré et estimée.....	65
Fig. IV.15: flux rotorique $\phi_{r\alpha}$ mesuré et estimée.....	65
Fig. IV.16: flux rotorique $\phi_{r\beta}$ mesuré et estimée.....	66
Fig. .IV.17 : courant statorique $I_{s\alpha}$ mesuré et estimée.....	66
Fig. IV.18 : courant statorique $I_{s\beta}$ mesuré et estimée.....	67
Fig. IV.19:flux rotorique $\phi_{r\alpha}$ mesuré et estimée.....	67
Fig. IV.20:flux rotorique $\phi_{r\beta}$ mesuré et estimée.....	68
Fig. IV.21:Résistance rotorique réel et estimée.....	69

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau. I.1	Evolution des paramètres présence de défauts	14
Tableau. II.1	Les inductances de stator	23
Tableau. II.2	Les inductances rotoriques	27

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale.....1

Chapitre.1.classification des défauts de la machine asynchrone

I.1.Introduction:.....3

I.2. Principe de fonctionnement :.....3

I.3. Constitution de la machine asynchrone :3

I.3.1 Le stator.....4

I.3.2.Rotor.....4

I.3.3.Les paliers :.....5

I.4. Définitions et concepts le Diagnostic:.....5

I.5. Présentation Des Différents Défauts :.....7

I.5.1. Les causes de défauts:.....7

I.6. Défaillance due au réseau d'alimentation :.....8

I.7. Défaillance d'ordre mécanique :.....8

I.8. Défaillances d'ordre électriques :.....8

I.8.1 Défauts statoriques :.....8

I.8.1.1 Court-circuit dans une phase :9

I.8.1.2 Circuit ouvert sur une phase :.....9

I.8.1.3. Court-circuit entre deux phases :.....9

I.8.2. Défauts rotorique :.....10

I.8.2.1. Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages:.....10

I.8.2.2. Vibration des enroulements à billes :11

I.8.2.3. Excentricité dynamique et statique :.....11

I.8.2.4.La dissymétrie du rotor:.....12

I.9. Signatures en vue de suivi des défauts:.....	12
I.9.1. Signature des paramètres représentatives des défauts :.....	12
I.9.1.1. Défaut de court-circuit:.....	15
I.9.1.2. Défaut d'excentricité :	15
I.9.2. Signatures des grandeurs mesurable:.....	17
I.9.2.1. Analyse du courant:.....	17
I.9.2.3. Analyse du couple électromagnétique :.....	19
I.10. Conclusion :.....	20

Bibliographie

Chapitre II. Modélisation de la machine asynchrone

II.1 introduction :.....	21
II.2. Hypothèses simplificatrices de départ :.....	21
II.3. Structure du stator :.....	22
II.4 Structure du rotor:.....	24
II.5. Equations globales des tensions :.....	29
II.6. Equations mécaniques :.....	30
II.7. Modèle triphasé réduit pour le rotor :.....	31
II.7.1. Les équations des tensions rotoriques triphasé simplifié :.....	31
II.7.2. Les équations des flux rotoriques simplifié :.....	32
II.8. Equations générales du modèle biphasé de la machine asynchrone :.....	32
II.8.1. Modélisation dans le repère de Park :.....	33
II.8.2. Les équations de tension :.....	34
II.8.3. Les équations de flux:.....	34
II.9. Le modèle en représentation d'état de la machine asynchrone :.....	34
II.9.1. Modèle avec entrées en tension :.....	35

II.10.Conclusion :.....36

Bibliographie

Chapitre III :Conception de filtre de Kalman

III.1.Introduction :.....37

III.2.Concepts d'estimateur et d'observateur :..... 37

III.2.1.Estimateurs :.....38

III.2.2.Observateur :.....38

III.3. Classification des observateurs :.....38

III.3.1. Les observateurs déterministes :.....39

III.3.2. Les observateurs stochastiques :.....39

III.3.3. Les observateurs linéaires :.....39

III.3.4.Les observateurs non linéaires :.....39

III.3.5.Observateurs d'ordre complet :.....40

III.3.6.Observateurs d'ordre réduit :.....40

III.4.Notion sur les bruits d'état et de mesure :.....40

III.4.1.Bruit d'état :.....40

III.4.2.Bruit de mesure :.....41

III.5.Filtre de Kalman :.....41

III.5.1.Evolution historique du filtre de Kalman :.....42

III.5.2.Fonctionnement du filtre de Kalman :.....42

III.5.3.Filtre de Kalman étendu :.....44

III.5.4.Algorithme du filtre de Kalman étendu :.....46

III.5.5.Application filtre de Kalman étendue à la machine asynchrone:.....49

III.5.5.1.Modèle de la machine pour le filtre de Kalman étendue :.....49

III.5.5.2.Discrétisation du modèle :.....	50
III.5.5.3.La prédiction vecteur d'état X_k à l' instant $k+1$ est base sur les fonctions suivants:...	51
III.5.5.4rédition de la covariance de l'erreur :.....	51
III.5.6.Les avantages et les inconvénients de filter du Kalman étendu :.....	53
III.6.conclusion:.....	54

Bibliographie

Chapitre IV :simulation et résultats

IV.1.Introduction :.....	55
IV.1.1.Cas d'une machine saine à vide :.....	55
IV.1.2.Cas d'une machine saine en charge :.....	57
IV.1.3.Simulation de défaut rotorique à vide et à la présence d'une charge sur l'arbre Du moteur	59
IV.1.3.2Machine en charge :.....	62
IV.1.4Application du filtre de Kalman Etendu a la machine asynchrone :.....	64
IV.1.4.1Cas d'une machine saine en charge :.....	64
IV.1.4.2.Cas d'une machine en charge avec défaut :.....	66
VI.2. Conclusion :.....	69

Conclusion

Conclusion générale.....	70
--------------------------	----

Annexe

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Il y'a quelques années, l'automatisation avait pour objectif principal d'augmenter la productivité en faisant appel à des techniques d'optimisation .Actuellement, en raison de la modernisation incessante des outils de production, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes et sophistiqués. En raison de ces avantages, le moteur asynchrone remplace la machine à courant continu dans ces systèmes, la fiabilité, la robuste et le coût de maintenance réduit, ces machines sont utilisées même dans les domaines d'utilisation à vitesse variable. Ces machines peuvent être infectées par des défauts (mécaniques, électriques) provenant de leur composant interne. Une défaillance d'une partie d'un processus peut s'aggraver et paralyser ou endommager tout le système de production ce qui peut entraîner des pertes en vies humaines et des dommages sur le plan écologique et économique.

Le diagnostic consiste à détecter, localiser, et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui infecte le système et qui peuvent altérer son fonctionnement. Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision. Il permet d'améliorer la qualité et de réduire le coût en intervenant au cours de certaines phases du cycle de vie d'un système de production.

On peut classer la détection des défauts en deux catégories principales :

- Méthodes numériques dites méthodes quantitatives à base de modèle mathématique.
- Méthodes symboliques ou méthodes qualitatives à base de connaissance.

Ce sont les méthodes de détection et d'isolation de défauts à base de modèles qui retiendront notre attention, elles sont les plus familières aux ingénieur. Parmi les méthodes à base de modèles mathématiques, on peut citer les méthodes des équations de parités, l'estimation paramétrique, et les méthodes à base d'observateur qui feront l'objet de notre travail.

Pour détecter la présence d'un défaut, le comportement d'un système est comparé à celui du modèle mathématique et tout écart significatif dénote une modification de comportement éventuellement explicable par la présence d'un défaut. La différence entre le comportement du système et celui du modèle est exprimée sous forme d'un résidu.

Introduction générale

Nous avons utilisé le filtre de kalman étendu pour une meilleure détection de défaut rotorique (cassure de barre).

Il est approprié pour le traitement des mesures bruitées et discrètes, pour obtenir des estimations précises des variables d'état et des paramètres du modèle.

Le travail présenté dans ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre: présente les différents défauts pouvant altérer le fonctionnement des machines asynchrones. Nous exposons leurs natures, effets, répartitions sur les parties de la machine (stator, rotor), ainsi que leurs signatures.

Le deuxième chapitre : a pour objectif de modéliser la machine dans le repère de Concordia, la modélisation sera détaillée depuis les équations du modèle triphasé jusqu'à l'obtention des équations sous forme d'état.

Le troisième chapitre : présente au début des notions sur l'observateur et l'estimateur et par la suite l'algorithme de filtre de Kalman étendu pour l'appliquer sur la machine asynchrone à cage.

Le quatrième chapitre : nous exposerons les différentes simulations concernant les grandeurs de la machine en régime sain et en régime défectueux cloront le chapitre deux et trois.

Une conclusion générale comportera une synthèse du travail effectué.

Chapitre I :
Classification des défauts de machine
asynchrone

I.1.Introduction:

Le moteur asynchrone est une machine qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, son fonctionnement est basé sur la production d'un champ tournant. Elle est la machine la plus utilisée en vie quotidienne à cause de sa fiabilité, sa robustesse.

L'avancement enregistré dans le domaine des convertisseurs statiques rend l'utilisation de cette machine de plus en plus avantageuse, cette machine tend effectivement à remplacer la machine à courant continu dans la plupart des entraînements à vitesse variable. Toutes ces qualités expliquent l'intérêt de l'industrie vis à vis ce type de machine. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que les machines asynchrones présentent quelques anomalies qui peuvent provenir d'un vieillissement prématuré ou autres causes.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux constitutions de la machine et aussi aux différents défauts qui peuvent altérer le fonctionnement normal de la machine asynchrone, sans être exhaustif, nous présenterons les principales pannes et dysfonctionnements ainsi que leurs causes. En effet, les défauts de la machine asynchrone peuvent avoir des plusieurs causes, ils peuvent être dus au vieillissement des différents constituants ou bien aux conditions d'utilisation ou encore tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service. Nous aborderons par la suite les signatures des différents défauts sur les grandeurs et les paramètres de la machine asynchrone.

I.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de cette machine est très simple à expliquer, l'alimentation de l'enroulement statoriques par des courants triphasés de pulsation w produit un champ magnétique tournant. Variation des flux au sein du cage d'écureuil rotoriques produit des courants. L'interaction entre le champ tournant et le champ créé par les courants rotoriques donne naissance à une force électromotrice qui tend à accélérer le rotor afin d'annuler leur cause de création.

I.3. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est une machine à induction souvent utilisée comme moteur. Elle comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor. La différence de vitesse entre le champ statorique et rotorique est appelée glissement [1],[2].

.La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator, partie fixe de la machine est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

I.3.1 Le stator

Le stator consiste en un empilage de tôles d'acier. Il a la forme d'un cylindre vide (fig. I.1) Les tôles comportent à leur périphérie intérieure des encoches dans les quelles sont placés, à 120° l'un par rapport à l'autre, les enroulements d'un bobinage triphasé. Ces enroulements peuvent se raccorder en étoile ou en triangle.



Fig: I.1: stator d'un machine asynchrone

I.3.2.Rotor

Le rotor est constitué d'une pile de tôles formant un cylindre plein, ces tôles comportant a leur périphérie extérieure des encoche destinées a recevoir les conducteurs. Un mince entrefer sépare le rotor du stator. [1]

Selon que les enrôlements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on a un rotor bobiné" à bagues "ou un rotor à "cage d'écureuil".

Dans un rotor bobiné, l'enroulement triphasé, relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire de balais et permettent soit

d'insérer des résistances dans le circuit du rotor lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement, soit de le court-circuiter, comme c'est le cas en machine normale.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches renferment des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux. Les moteurs de faible et de moyenne puissance ont en général des cages en aluminium coulé sous pression. Le coulage permet d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes servant à la ventilation. (fig. I.2).



Fig. I.2 : le rotor à cage.

I.3.3. Les paliers :

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons sous des tiges des serrages. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil, [3].

I.4. Définitions et concepts le Diagnostic:

a) Système physique :

Un système physique est un ensemble d'éléments (composants, constituants) interconnectés ou en interaction organisés pour réaliser une fonction déterminée [4].

b) Modèle :

Un modèle d'un système physique est une description de sa structure et une représentation comportementale ou fonctionnelle de chacun de ses composants. Une représentation

comportementale est constituée de relations entre diverses variables du système, appelées classiquement relations de causes à effets. Une représentation fonctionnelle est plus abstraite puisqu'elle ne s'adresse qu'aux objectifs présumés que le système physique doit remplir.[4]

c) Défaillance :

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique [4], c'est-à-dire elle caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui ont assignées. Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnose.

d) Défaut :

C'est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence, lorsque celui-ci est en dehors des spécifications [4]. est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. 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. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En effet, 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. [5].

e) Panne :

La panne est l'incapacité d'un dispositif à accomplir la fonction vitale. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une Défaillance [4].[5].

f) Perturbation :

C'est l'entrée du système physique qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée [4]. Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, bon ou mal, représenté par un modèle de référence [5].

g) Diagnostic :

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants les états des relations de description du comportement [5].

I.5. Présentation Des Différents Défauts :

I.5.1. Les causes de défauts:

Les causes principales des défauts affectant le bobinage statorique sont généralement dues à un problème thermique (surcharge, échauffement permanent), électrique (alimentation perturbée, instabilité de la tension ou de la fréquence), mécanique (bobinage), ou environnemental (agression, humidité). Quand aux défauts rotoriques, les causes sont essentiellement dues à des problèmes : électromagnétique, résiduel (déformation), thermique, dynamique (arbre de transmission), mécanique (roulement, rupture de fixations), ou environnemental [6],[7].

Les principaux défauts qui peuvent altérer le bon fonctionnement de la machine asynchrone sont ceux qui se produisent dans la machine, et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur de la machine.

Les défauts électriques ou mécaniques des machines asynchrone peuvent être classés selon les statistiques suivantes :

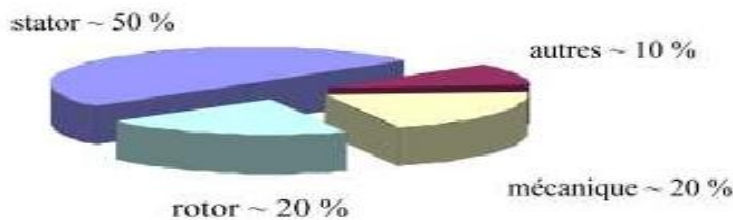


Fig I.3 : Répartition des pannes[5].

I.6. Défaillance due au réseau d'alimentation :

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, d'ont les plus fréquents sont [5]:

- ✓ Court-circuit entre les phases
- ✓ Coupure de phase d'alimentation
- ✓ Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature

- Climatique (pluie, foudre ...)
- D'environnement (branches d'arbres, plombs de chasses,...)
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

I.7. Défaillance d'ordre mécanique :

La durée de fonctionnement importante de la machine augmente le degré d'amortissement de partie mécanique avec le temps. Ceci rend ces défauts les plus rencontrés des machines asynchrone.

I.8. Défaillances d'ordre électriques :

Ces défaillances peuvent être classées en deux catégories bien distinctes (défauts rotoriques et défauts statoriques) . C'est celui qui a provoqué certains cas d'arrêter la machine. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur.

I.8.1 Défauts statoriques :

Le bobinages de la machine est la principale source de défauts dans un moteur électrique. Les effets d'usure comme le vieillissement ou les frottements des matériaux ont un effet sur l'intégrité des fils conducteurs et de leur isolant. Si cet isolant est trop endommagé, ces bobinages peuvent alors se mettre en court-circuit ou alors, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert. Il peut y avoir différents types de défauts dont leurs conséquences sur la machine sont différentes.

Ces différents défauts sont données sur la Fig I.4.[5]

I.8.1.1 Court-circuit dans une phase :

Un des problèmes intolérables est le court-circuit dans une phase, Dans ce cas, la phase concerné est considérée comme perdue. Sur un machine triphasée alimenté par un onduleur , cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important pouvant propager la faute. L'importance des courants de faute dépend directement du nombre de spires en court-circuit.

Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement suite à la panne de la machine.[5]

I.8.1.2 Circuit ouvert sur une phase :

Un circuit ouvert dans une phase ou manque phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. Le manque d'une des phases ne fait pas circuler de courant de défaut et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur , la seule manière de pouvoir assurer un minimum de fonctionnement, est de piloter les deux phases restantes, c'est-à dire avec un fonctionnement équivalent à une machine biphasée. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle) [5].

I.8.1.3. Court-circuit entre deux phases :

Le défaut le plus grav qui peut avoir des conséquences sur une machine c'est le court-circuit entre deux phases. La première conséquence est la perte de ces deux phases pour la production du couple. Dans une machine triphasée, cela implique l'arrêt de la machine. La seconde conséquence est qu'un court-circuit entraîne des courants de défaut provoquant des échauffements pouvant engendrer des détériorations supplémentaires. De même que pour le cas du court-circuit dans une phase, ces

spires en court-circuit engendrent un couple résistant en s'opposant aux variations du flux d'excitation. [5]

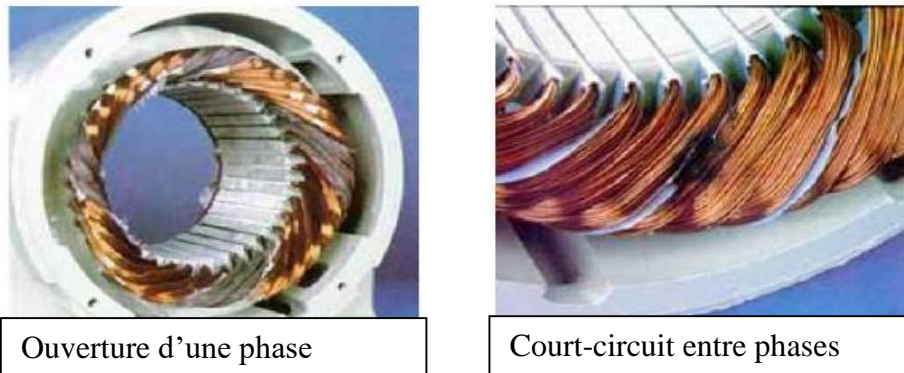


Fig I.4 : les enroulements en cas de défaut [8].

I.8.2. Défauts rotorique :

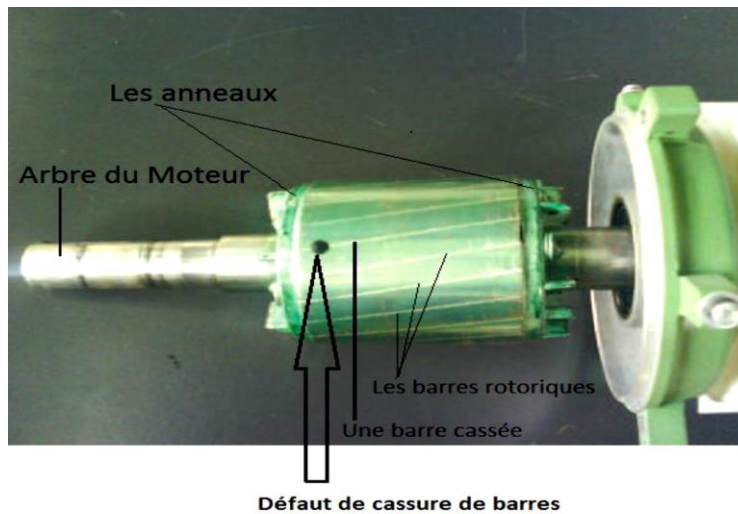
I.8.2.1. Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages:

Ces défauts apparaissent au niveau du bobinage rotorique. Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil, ou par des ruptures d'une portion d'anneau. Ils se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. Ces pannes rotoriques engendrent malheureusement des ondulations dans le couple électromagnétique qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine [10].

Suite à l'apparition de ce type de 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 que 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. Les cassures de portions d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux.

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions

de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc de courant peuvent entraîner leur cassure [10]



.Fig I.5 : Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil [9]

La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres.

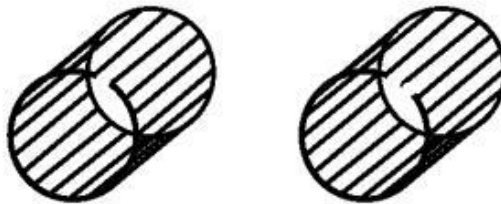


Fig I.6 : Rupture d'une et de deux portions d'anneaux [10]

I.8.2.2. Vibration des enroulements à billes :

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur.

I.8.2.3. Excentricité dynamique et statique :

On peut distinguer l'excentricité statique qui se manifeste par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator, et l'excentricité dynamique qui fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator. et L'excentricité mixte associant les deux cas, statique et dynamique.

On peut présenter les deux cas d'excentricité sur la Fig suivante :

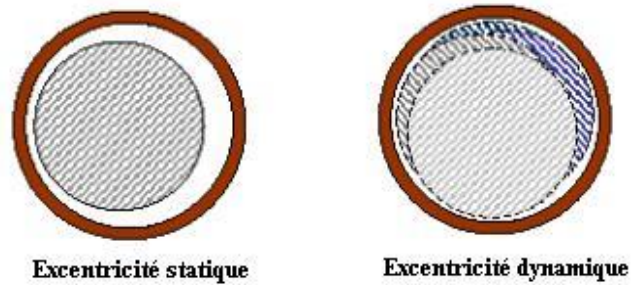


Fig I.7 :L'excentricité dynamique et statique [14]

I.8.2.4.La dissymétrie du rotor:

Ce sont des défauts d'alignement. Ils sont dus à une irrégularité de l'entrefer qui induit des frottements et par conséquent, une dissymétrie qui va générer des défauts mécaniques (vibrations). Ce type de défauts provoque une répartition non homogène des courants dans le rotor ainsi qu'un déséquilibre des courants statoriques[10].

I.9.Signatures en vue de suivi des défauts:

Le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone à base de modèle mathématique repose sur l'estimation de plusieurs grandeurs et paramètres, ainsi que la connaissance de l'évolution de ces derniers. En effet, un défaut peut se manifester sous forme de variation paramétrique, donc les paramètres choisis doivent être représentatifs des défauts considérés et par conséquent un choix judicieux des variables à suivre est indispensable.

Dans cette partie, nous allons développer **les différentes signatures associées à chaque défaut** de la machine asynchrone.

I.9.1.Signature des paramètres représentatives des défauts :

Les paramètres de la machine asynchrone on peut considère très bons indicateurs de défauts. Nous présentons dans ce qui suit, à partir des informations recueillies dans la littérature, ceux qui sont représentatifs des défauts et rencontrés au niveau de la machine.

Dans son étude, [11] utilise l'identification paramétriques basé sur une modèle biphasé de Park pour détecter l'apparition d'un défaut, suivi d'une analyse fréquentielle qui permettra de connaître

les défauts du stator et les défauts du rotor. Enfin l'estimation des paramètres à partir du modèle triphasé de la machine qui permet de reconnaître le défaut statorique. Ces études portent sur les barres cassées et les courts-circuits dans les enroulements statoriques[15].

En terme de signature des défauts, [11] note pour Un défaut au stator se manifeste par l'augmentation de la résistance statorique R_s et la diminution de la résistance rotorique R_r , quant au défaut dans au rotor entraîne l'effet inverse d'un défaut statorique. En d'autre termes, la diminution de la résistance statorique R_s et l'augmentation de la résistance rotorique R_r . Les résultats sont confirmés par l'analyse spectrale de la comparaison entre les paramètres réels et estimés :

- L'apparition d'une raie à $f = n.f_s$ est causée par un défaut au stator .
- L'apparition d'une raie à $f \leq f_s$ est causée par un défaut au rotor .

Sachant que les fréquences fondamentales des courants statoriques f_s et rotoriques $g.f_s$ (où g est le glissement). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle permet seulement la détection une seul défaut soit un défaut rotorique ou bien statorique sans plus de détails sur l'ampleur de ce défaut. Pour détecter par exemple une réduction du nombre de spires dans l'une des phase de la machine (jusqu'à 0,7% du nombre de spires total), Schaeffer dans sa publication [13] propose une approche qui met en relief le fait qu'un court-circuit se traduit non seulement par la création d'une bobine fictive supplémentaire mais aussi par la diminution du nombre de spires dans la phase concernée[15].

Une autre approche est proposée par Boumegoura sur la survenance d'un défaut rotorique [15]. En effet, sur un modèle triphasé, un déséquilibre électrique implique systématiquement une variation des valeurs des résistances représentatives qui ne seront plus égales entre elles. Dans sa publication, [10] considère que cette différence permet de diagnostiquer un défaut au rotor d'une part, mais aussi d'évaluer la gravité de ce défaut d'autre part. La Fig 10 suivante montre comment varient les résistances en présence de défauts :

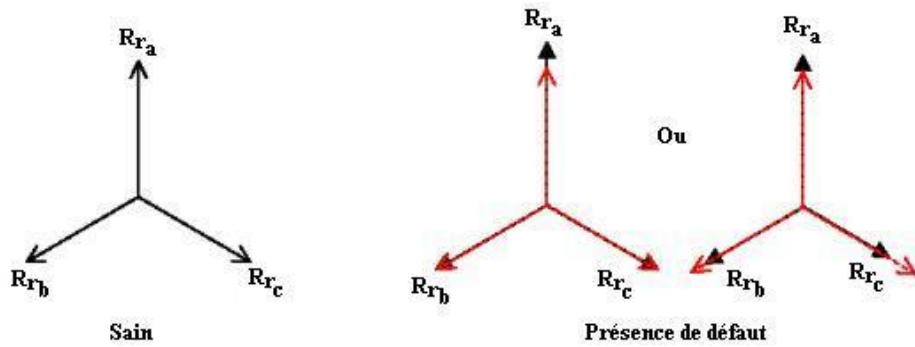


Fig I.8 : Evolution hypothétique des résistances rotoriques [10]

Cette Fig montre deux possibilités pour la variation hypothétique des résistances rotoriques lors de la présence d'un défaut au rotor. Le premier cas montre $R_{rb} = R_{rc}$ et R_{ra} différent des deux autres. Le deuxième cas, montre $R_{rb} \neq R_{rc} \neq R_{ra}$. L'inconvénient majeur est la modèle est très complexe à cause de volume de calcul important

Les conditions nécessaires si quand à la représentation biphasée du modèle de Park on considérons les alimentations sont équilibrées et la machine est saine est équilibrée. Lors de l'apparition d'un défaut, un déséquilibre s'instaure dans la machine asynchrone[15]. Nous citons comme exemples:

- Une rupture de barres au rotor provoque une augmentation de la résistance rotorique , les autres paramètres, c'est à dire la résistance statorique et les inductances de fuites statoriques et rotoriques diminuent.
- Lors d'un court-circuit entre spires du bobinage statorique, la résistance statorique augmente et les autres paramètres diminuent.

	R_s	R_r	L_r	L_f
Défaut dans la cage rotorique	↘	↗	↘	↘
Défaut de court circuit au bobinage statorique	↗	↘	↘	↘

Tableau I.1 : Evolution des paramètres en présences de défauts [10]

Nous constatons que le suivi d'une paire de paramètres (une variable résistive et l'autre inductive) est indispensable pour diagnostiquer la présence d'un défaut [15].

La résistance rotorique et l'inductance de magnétisation sont considérées comme des paramètres indicateurs de résidus et ne sont plus considérés comme les valeurs de résistances et inductances propre à la machine lors de la présence de défauts. Les paramètres fournissent une signature du défaut [12].

Nous allons compléter cette partie par l'énumération des différentes signatures fréquentielles associées à chaque défaut, nous présenterons la manière avec laquelle évoluent les différents paramètres.

I.9.1.1. Défaut de court-circuit:

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences $f = n.f_s$ avec $n = \{1, 2, 3, \dots\}$ et f_s : la fréquence d'alimentation.

La variation des paramètres se fait comme suit :

- La résistance statorique augmente .
- La résistance rotorique diminue.
- L'inductance rotorique diminue.
- L'inductance de magnétisation diminue.

I.9.1.2. Défaut d'excentricité :

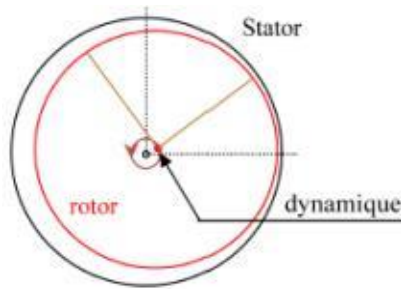


Fig I.9 : L'excentricité statique et dynamique

Les fréquences proches du fondamental sont données par la relation [12] :

$$f_{exc} = \left\{ 1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right\} f_s \quad (I.1)$$

Où :

- f_{exc} = fréquence d'excentricité
- $n = 1,2,3, \dots, n \in \mathbb{N}$
- g le glissement
- p = le nombre de paire de pôles
- f_s = fréquence d'alimentation

On peut observer une possible augmentation de la résistance rotorique car le défaut se situe au niveau du rotor.

I.9.1.3.Rupture de barres ou de portions d'anneaux :

L'évolution des paramètres issus du modèle de Park permet de détecter un défaut de rupture de barres ou de portions d'anneaux si :

- La résistance statorique R_s diminue.
- La résistance rotorique R_r augmente.
- L'inductance rotorique L_r diminue.
- L'inductance statorique L_s diminue.

Dans cette partie, nous avons vu comment réagissent les différents paramètres de la machine asynchrone aux différents défauts susceptibles de se produire. Ces résultats sont en réalité les signatures fréquentielles et "paramétriques" qui seraient caractéristiques des défauts étudiés.

Cette approche, nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine asynchrone. Toutefois nous avons remarqué que les modèles ne permettaient pas d'étudier tous les défauts de la machine [15].

I.9.2. Signatures des grandeurs mesurable:

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs mesurables ou estimables (à l'aide d'observateur) telles que les courants, les flux ou bien encore le couple électromagnétique [15]. Nous exposerons les principales caractéristiques Fréquentielles des grandeurs mesurables (ou estimables) en régime de défaut.

I.9.2.1. Analyse du courant:

a) Cassures de barres :

La cassure de barre le plus fréquente défaut au niveau de rotor [10]. La simulation du courant permet d'identifier les signatures de ce défaut et leur affection sur la machine.

Les courants des phases statoriques sont toujours déphasés d'un angle de 120° , cependant, la cassure de barres peut influencé sur les amplitudes des courants statoriques par des ondulations. L'amplitude de cette oscillation est proportionnelle au nombre de barres cassées [15].

Notons aussi que lorsqu'une barre est cassée, il est bien connu qu'un traitement approprié des signaux du courant fait apparaître des composantes dans leurs spectres aux fréquences est [14] :

$$f = f_s(1 \pm 2g) \quad (I.2)$$

En effet, lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques du flux correspondant sont produits et induisent des harmoniques du courant dans l'enroulement statorique. De plus, les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailantes.

Il est à signaler qu'une cassure de barres provoquerait une répartition non homogène des courants dans les portions d'anneaux. Ce qui cause une usure accélérée de ces éléments et induit une rupture des portions d'anneaux.

Il faut noter que la machine asynchrone devient fortement altérée à partir de la rupture de quatre barres consécutives au rotor. Ce défaut connaît un effet cumulatif, les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément[15].

a) Cassure d'anneaux :

Ce défaut apparaît autant de fois que la cassure de barres, la détection d'une cassure de portion d'anneaux est généralement délicate car ce défaut comporte des similitudes avec la cassure de barres. Dans beaucoup de situations ces deux défauts sont confondus[15].

En ce qui concerne les courants d'alimentation, la rupture d'anneaux a un effet identique à la cassure de barres. En effet, la cassure de portions d'anneaux fait apparaître des modulations d'amplitude : plus le nombre de portions d'anneaux augmente plus la modulation d'amplitude se manifeste de manière plus accentuée.

Les signatures associées à ce défaut peuvent être confondues avec les signatures associées à la cassure de barres, il sera donc difficile de distinguer cassure d'anneaux et cassure de barres sur les courants statoriques par cette seule analyse [15].

b) Défaits sur les enroulements du stator et du rotor :

Ce défaut est l'un des plus répandus, une partie ou la totalité de spires constituant les bobinages statoriques et rotoriques sont court – circuitées. Nous pouvons citer plusieurs cas possibles selon l'interconnexion des différents bobinages et la partie où ils se situent au niveau de la machine asynchrone.

Court circuit dans une phase :

- *Court circuit spire neutre :*

L'effet de ce défaut sur la machine asynchrone est que l'amplitude du courant dans la phase statorique détériorée est supérieure par rapport aux deux autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas du moteur sain. Plus le nombre de spires augmente, plus l'amplitude du courant augmente [15].

- *Court circuit au milieu de la phase :*

De la même manière que le court-circuit entre phases et neutre, le court-circuit entre spires augmente les courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude apparaît pour les autres phases.

Nous terminerons cette partie qui a été consacrée aux défauts des enroulements, en remarquant que ce type de défauts engendre une augmentation des amplitudes des courants dans les phases affectées [15].

I.9.2.2. Analyse du flux électromagnétique :

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator [15]. Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

I.9.2.3. Analyse du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut être reconstruit à partir de deux des trois courants statoriques et par ajout de spires de flux dans ces deux phases [14]. Sa dépendance vis à vis de la présence de défauts sera présenté dans ce qui suit [15].

a) Cassures de barres :

Les cassures de barres réduisent sensiblement la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentent l'amplitude des oscillations [15]. Ces dernières augmentent avec le nombre de barres cassées induisant un effet d'avalanche de la défaillance.

b) Cassure de portion d'anneaux :

Le comportement du couple est analogue à celui qui apparaît dans le cas de cassure de barres. Cependant, le taux d'oscillation et la valeur moyenne du couple baisse de manière plus importante que dans le cas précédent [15].

c) Défaut de court-circuit :

Lors de l'apparition d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique a une valeur moyenne sensiblement égale au couple développé par la machine lorsqu'elle est saine. Seulement, celui-ci est d'autant plus bruité que le court-circuit est important [15].

I.10.Conclusion :

Le diagnostic des machines électriques a été un thème de recherche très important depuis plusieurs décennies. Nous avons commencé ce chapitre par un rappel de la constitution de la machine asynchrone, nous avons présenté par la suite une classification des différents défauts de la machine puis nous avons cité les causes des défaillances d'ordre mécanique et électriques de ce machine.

Nous avons aussi par la suite consacré une partie pour élaborer les signatures des différents défauts présentés au préalable.

Bibliographie

- [1] J.Fanton, «Génie électrique Electrotechnique (machine et réseaux)», Ellipses édition marketing S.A.2002 ISBN : 9782729811136.
- [2] R.bouchard, Guy Olivier, « *électrotechnique* », Editions de l'école polytechnique de Montréal, imprimé au Canada ISBN-10: 2553007205 1999 .
- [3] S.Merabet, H.DJAAFAR « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes » mémoire Ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique-ENP El-Harrach, Alger le 2006/2007
- [4] S.Meradi « Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone vue de diagnostic des défauts rotoriques » Mémoire de Magister, Université mohamed khider de Biskra le 27/06/2007
- [5] S.Belhamdi « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra le 08/05/2014.
- [6] A.Medoued «surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones » Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, le : 08 / 03 / 2012
- [7] A.Bouguerne, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones » Mémoire de Magister, Université mentouri - Constantine 2009
- [8] A.Belbeche « Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase » Mémoire de Magister, Université de Batna le 9/11/2013.
- [9] H.Achour « Etude comparative des indicateurs des défauts rotoriques dans les MAS à cage Présenté » Mémoire Master, Université Mohamed Khider -Biskra le 05/06/2014.
- [10] T.Boumegoura, « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 26 Mars 2001.
- [11] Moreau S., Trigeassou J. C., Champenois G., Gaubert J. P., "Diagnosis of Induction Machines: A procedure for electrical fault detection and localization", article IEEE International SDEMPED'99, Gijon, Spain, pp. 225-230, September 1999.
- [12] H. Razik et G. Didier, « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », Université Henry Poincaré, Nancy I, 7 Janvier 2003.

[13] E. Scheffer, « Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts », *Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1999.*

[14] J. Stein, E.D. Endicott, « Noninvasive detection of broken bars in operating induction motors », *IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, NO. 4, December 1988.*

[15] M.HAIDOUR et N.HAZIANE, «Diagnostic de la asynchrone (Approche multi modèle) », mémoire Ingéniorat d'état , école nationale polytechnique de Harache,le juin 2005.

Chapitre II :

Modélisation de la machine asynchrone

II.1 introduction :

La modélisation de la machine asynchrone on fait l'objet de plusieurs travaux. On peut prédire le comportement de la machine lorsqu'on le soumet à une entrée connue.

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine (courants, vitesse, couple, ...), afin d'étudier les phénomènes mis en jeu.

Le problème de modélisation se pose lorsque l'ingénieur doit prendre une décision au sujet d'un phénomène dont il ne connaît le comportement qu'à partir des données expérimentales. Dans certains cas, la connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle mathématique bien précis.

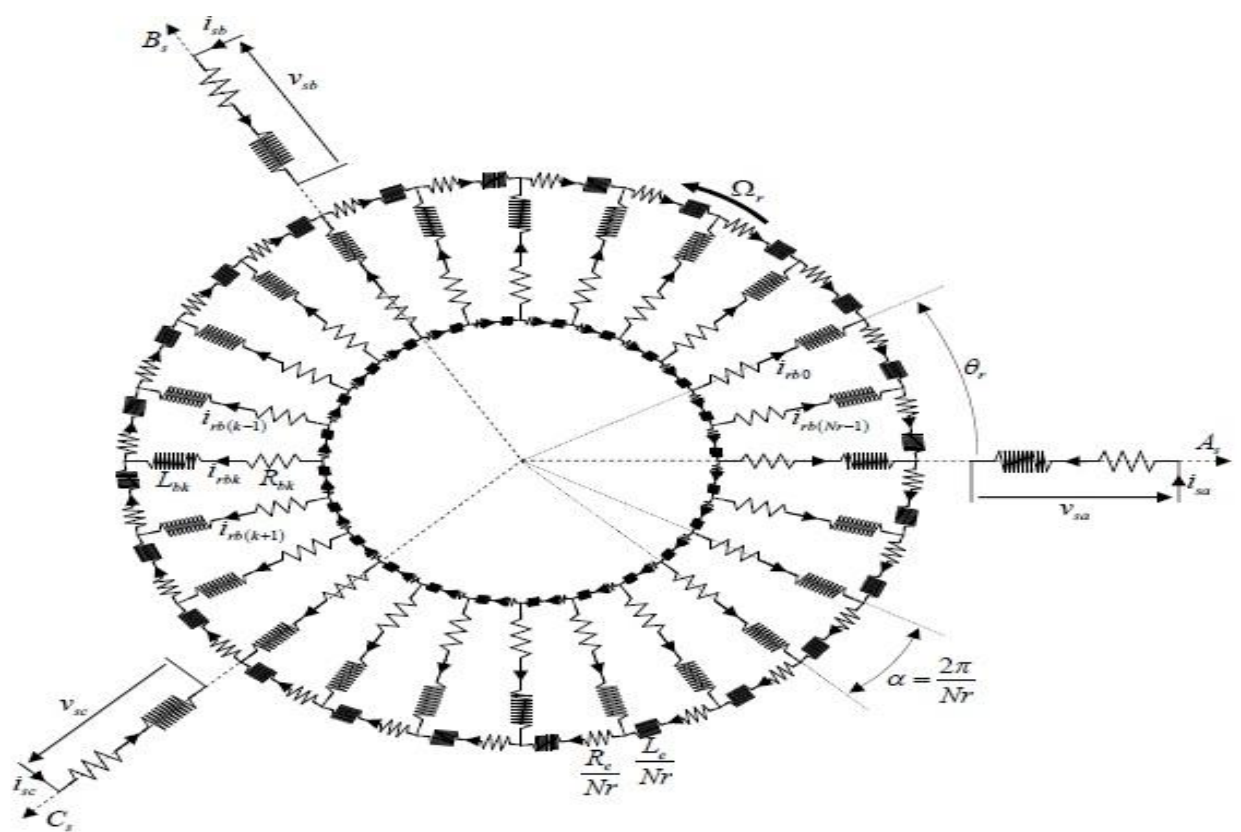


Fig.II.1– Modèle électrique équivalent d'une MAS à cage

II.2.Hypothèses simplificatrices de départ :

Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone (courants, vitesse, couple,...). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine [5].

Vue de la surveillance et du diagnostic, il faut imposer un minimum d'hypothèses si nous voulons que le vecteur de sortie (grandeurs temporelles) soit le plus exploitable possible.

Dans l'approche proposée, nous avons supposé la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande devant 1). Cette hypothèse nous a permis d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobines statoriques et rotoriques. L'effet de peau, dans cette approche, a été négligé [5]. Nous avons supposé que les barres rotoriques étaient isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-bars et leurs effets au sein même de la cage rotorique. De plus, les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques ont été négligés dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le modèle exposé prend en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique Les plus importants ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques. Les harmoniques de temps créés par un réseau d'alimentation triphasé ou par un convertisseur statique ont été incorporés dans la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone.[1].

II.3. Structure du stator :

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de m encoches statoriques. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. ces bobines statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La figure (2.2) donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et du type de cuivre utilisé [2].

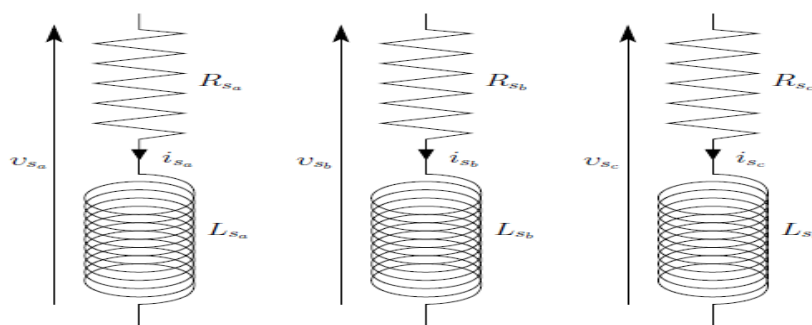


Fig.II.2 : Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques [3]

<i>inductances</i>	<i>expressions</i>
<i>L'inductance principale d'une phase statorique</i>	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 Rl}{e\pi p^2}$
<i>L'inductance mutuelle entre phases statoriques.</i>	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
<i>L'inductance totale d'une phase statorique.</i>	$L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$

Tableau II.1 : les inductances de stator.

L'équation de la tension statorique se met sous la forme :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.1})$$

Où $[V_s]$ représente la vectrice tension, $[I_s]$ le vecteur courant, $[\Phi_s]$ le vecteur flux tel -que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

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

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants de boucles rotoriques notés ici $[J_r]$ interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation ci dessous :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \quad (\text{II.4})$$

La matrice inductance $[L_s]$ se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} L_{sb} & M_{ss} \\ M_{ss} M_{ss} & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

La matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ entre les trois phases statoriques et les $(Nr+1)$ boucles rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & L_{sr} \cos(p\theta_{rm} + k\rho) & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & L_{sr} \cos\left(p\theta_{rm} + k\rho - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & L_{sr} \cos\left(p\theta_{rm} + k\rho - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \vdots & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{cases} p\theta_{rm} = \theta_r \\ p\Omega_{rm} = \omega_r \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec $k=0,1,\dots,N_r - 1$

Remarque :

Les inductances mutuelles entre le stator et l'anneau du court-circuit sont négligées, ce qui est représenté par un zéro dans la dernière colonne de la matrice.

II.4. Structure du rotor:

La cage d'écureuil de la machine se compose de N_r encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se décomposer en $(N_r + 1)$ circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle (maille) rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. L'un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire ce qui porte le nombre de boucle totale à $(N_r + 1)$. Nous associons à chacune de ces boucles un courant, ce qui nous amène à calculer $(N_r + 1)$ courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance [5]. Tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit [3]. La (Figure II.3) nous donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil.

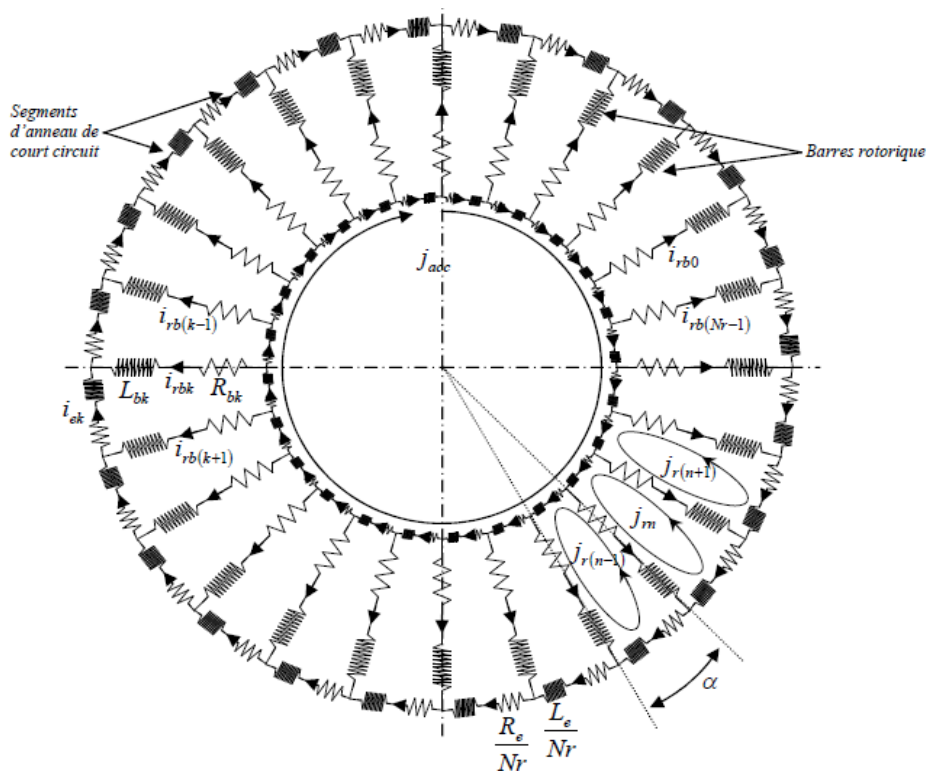


Fig.II.3- Circuit équivalent du rotor à cage d'écuriel

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, les équations Différentielles des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme Matricielle. Nous relierons les tensions de chacune des mailles rotoriques avec les Courants et les flux (Figure II.3) grâce aux équations (II.8) ; (II.12) ; (II.13) [3][5] L'équation de tension pour une maille (k) (Figure II.4) de la cage rotorique est Donnée par

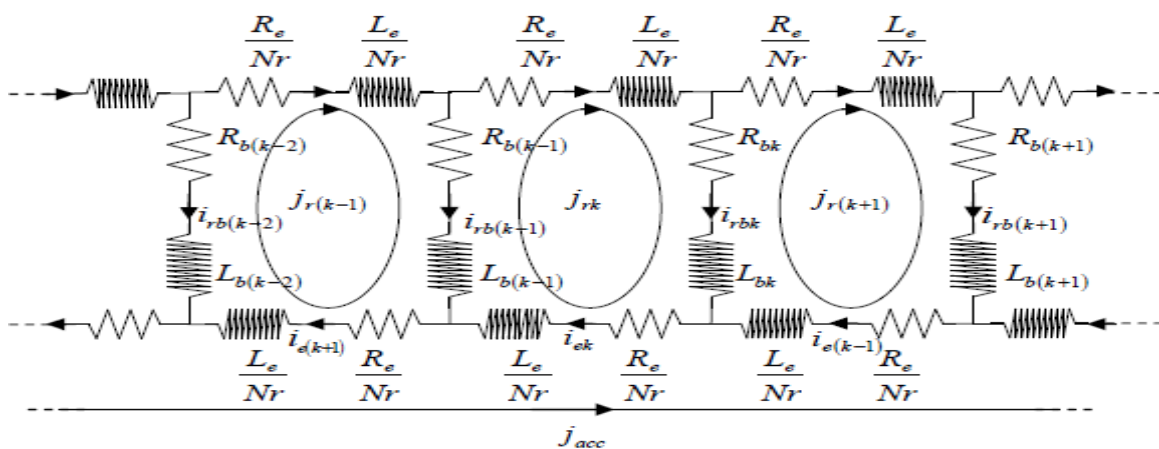


Fig.II.4 - Schéma équivalent d'une maille de la cage rotorique

$$-R_{bk} \cdot j_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) \cdot j_{rk} - R_{bk} \cdot j_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} \cdot j_{acc} + \frac{d\phi_{rk}}{dt} = 0 \quad (II.8)$$

Où :

$$\phi_{rk} = \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) \cdot j_{rk} - M_{rr} \cdot \sum_{m=1, m \neq k}^{N_r} j_{rm} - L_b (j_{r(k+1)} + j_{r(k-1)}) - \frac{L_e}{N_r} j_{acc} - M_{rsk} \cdot [I_s] \quad (II.9)$$

Et :

$$M_{rsk} = L_{sr} \cdot \left[\cos(\theta_r + k\rho) : \cos\left(\theta_r + k\rho - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + k\rho - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (II.10)$$

Le courant de la barre rotorique (k) et le courant du segment de l'anneau de court-circuit (k), sont liés aux courants de boucles rotoriques comme suite

$$\begin{cases} I_{rbk} = J_{rk} - J_{r(k+1)} \\ i_{ek} = J_{rk} - J_{acc} \end{cases} \quad (II.11)$$

Il faut compléter les équations des circuits du rotor par celles de l'anneau de court circuit :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} j_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{dj_{rk}}{dt} - R_e j_{acc} - L_e \frac{dj_{acc}}{dt} = 0 \quad (II.12)$$

L'équation de la tension rotorique se met sous la forme :

$$[v_r] = [R_r] \cdot [J_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (II.13)$$

Les boucles rotoriques étant magnétiquement couplées aux phases statoriques, le vecteur flux Φ_r dépend non seulement des courants de mailles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques :

$$[\Phi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (II.14)$$

Avec :

Vecteur de tensions des mailles rotoriques :

$$[V_r] = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 : 0]^T \quad (II.15)$$

Vecteur de flux dans les mailles rotoriques :

$$[\Phi_r] = [\phi_{r0} \ \phi_{r1} \ \dots \ \phi_{rk} \ \dots \ \phi_{r(N_r-2)} \ \phi_{r(N_r-1)} : \phi_{rcc}]^T \quad (II.16)$$

Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (II.17)$$

Les résistances des (Nr +1) mailles rotoriques sont regroupées dans la matrice $[R_r]$ qui est décrite à l'équation (II.8).

La matrice inductance $[L_r]$ décrite à l'équation (II.9), se compose des inductances Propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque maille rotoriques.

<i>inductances</i>	<i>expressions</i>									
<i>L'inductance principale d'une maille rotorique</i>	$L_{rp} = \frac{Nr - 1}{Nr^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} Rl$									
<i>L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.</i>	$M_{rr} = \frac{\mu_0}{Nr^2} \frac{2\pi}{e} Rl$									
<i>L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.</i>	$M_{r_{k(k\pm 1)}} = M_{rr} - L_b$									
<i>L'inductance mutuelle entre une maille rotorique k et une phase statorique j .</i>	$M_{r_{ksj}} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k\rho - \psi)$									
	$L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s Rl}{e\pi p^2} \sin\left(\frac{\rho}{2}\right)$									
	<table border="1"> <tr> <td><i>j</i></td> <td>=</td> <td><i>a</i></td> <td><i>b</i></td> <td><i>c</i></td> </tr> <tr> <td><i>ψ</i></td> <td>=</td> <td>0</td> <td>$\frac{2\pi}{3}$</td> <td>$\frac{4\pi}{3}$</td> </tr> </table>	<i>j</i>	=	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>ψ</i>	=	0	$\frac{2\pi}{3}$
<i>j</i>	=	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>						
<i>ψ</i>	=	0	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3}$						

Tableau II.2 :les inductances rotoriques

Les matrices $[R_r], [L_r]$ sont comme suit :

Matrice des résistances des mailles rotoriques [Rr] :

$$\begin{bmatrix}
 (R_{b1} + R_{bN_r} + 2\frac{R_e}{N_r}) & -R_{b1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -R_{bN_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 -R_{b1} & (R_{b2} + R_{b1} + 2\frac{R_e}{N_r}) & -R_{b2} & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & (R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r}) & -R_{bk} & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & -R_{bk} & (R_{b(k-1)} + R_{bk} + 2\frac{R_e}{N_r}) & -R_{b(k+1)} & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -R_{b(N_r-2)} & (R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r}) & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 -R_{bN_r} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -R_{b(N_r-1)} & (R_{bN_r} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r}) & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La matrice inductance[Lr] :

$$\begin{bmatrix}
 (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \dots & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 M_{rr} - L_b & (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \vdots & \vdots & \vdots & M_{rr} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 M_{rr} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & M_{rr} - L_b & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & M_{rr} - L_b & (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & M_{rr} - L_b & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & M_{rr} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 M_{rr} & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & M_{rr} - L_b & (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 -R_{bN_r} & M_{rr} & \dots & \dots & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & (L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}) & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e
 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.5. Equations globales des tensions :

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + \frac{d[\Phi]}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

[V] vecteur global des tensions $(N_r + 4) \times 1$ il contient les trois tensions statoriques, et Les N_r tensions des mailles rotoriques ainsi que la tension de la mailles de l'anneau de Court-circuit :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

[I] vecteur global des tensions $(N_r + 4) \times 1$ il contient les trois courants statoriques, et Les N_r courants des mailles rotoriques ainsi que les courants des mailles de l'anneau De court-circuit:

$$[I] = \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$[\phi]$ vecteur global des flux $(N_r + 4) \times 1$ il contient les trois flux statoriques, et les N_r Flux dans les mailles rotoriques ainsi que le flux de la mailles de l'anneau de court circuit:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = [L][I] \quad (\text{II.23})$$

[R] matrice globale des résistances $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$, elle contient la matrice des résistances statoriques et la matrice des résistances rotoriques :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

[L] matrice globale des inductances $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$, elle contient la matrice des inductances statoriques et la matrice des inductances rotoriques :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{rs}] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Car : } [\Phi] = [L][I] \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} [V] = [R][I] + \frac{d[L]}{dt}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} \\ [V] = [R][I] + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d[L]}{d\theta_r}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec : $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$

$$[V] = [R][I] + \omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.28})$$

Et :

$$\frac{d[L]}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [\frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r}] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.6. Equations mécaniques :

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage, la variation de la charge, etc....) il faut ajouter l'équation du mouvement au système d'équations différentielle Afin d'avoir la vitesse de rotation angulaire ω_r et la position du rotor par rapport au stator θ_r :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_t} (C_{em} - C_r - f_e \omega_r) \quad (\text{II.30})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{II.31})$$

Dans la théorie du champ électromagnétique des machines électriques, le couple électromagnétique intervenant dans l'équation (II.30) et (II.31) s'exprime par la dérivée partielle de stockage de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta_r} = P \frac{\partial W}{\partial \theta_r} \quad (\text{II.32})$$

Pour la machine électrique triphasée l'expression de l'énergie électromagnétique est de la forme :

$$W = \frac{1}{2} [\Phi]^T [I] = \frac{1}{2} [I]^T [L] [I] \quad (\text{II.33})$$

D'où:

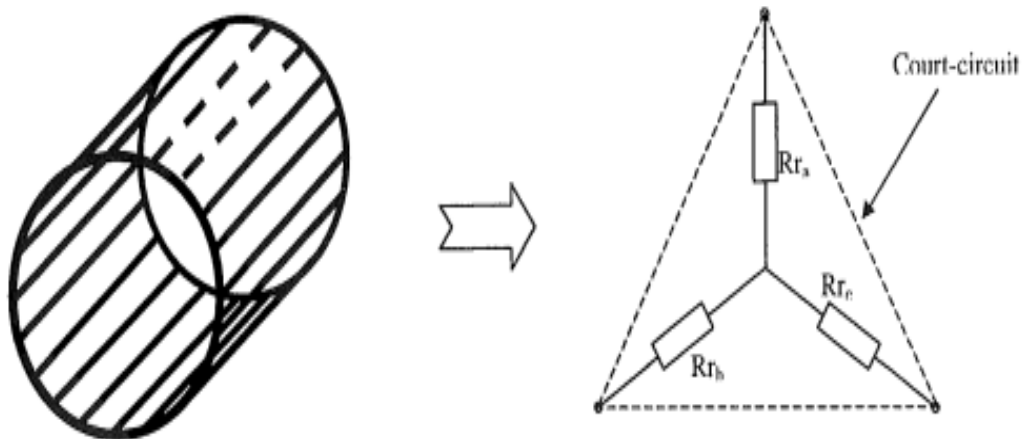
$$C_{em} = \frac{1}{2} P \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [\frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r}] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

Ces équations peuvent être regroupées sous une forme matricielle tel que :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] + \omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} & [0] & [0] \\ \frac{1}{2} P [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_e & 0 \\ [0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & [0] & [0] \\ [0] & J_t & 0 \\ [0] & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \frac{d}{d\theta_r} \left(\begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \right) \quad (II.35)$$

II.7.Modèle triphasé réduit pour le rotor :

pour faciliter les calculs et les études en cas de sain et le défaut de moteur. Le modèle triphasé-triphasé représente réellement les trois phases statoriques ce qui permet de différentier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques (barres +anneaux) sont représentés par trois phases rapportées au stator[4].



FigII.5 : Représentation triphasée du rotor [4].

II.7.1.Les équations des tensions rotoriques triphasé simplifié :

L'équation de la tension statorique se met sous la forme :

$$[v_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (II.36)$$

Où $[V_r]$ représente la vecteur tension, $[I_r]$ le vecteur courant, $[\phi_r]$ le vecteur flux tel -que

$$: [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

La matrice des résistances $[R_r]$, où sont regroupées les résistances de chacune des phases rotoriques, se met sous la forme suivante :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

II.7.2. Les équations des flux rotoriques simplifié :

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.39})$$

La matrice inductance $[L_r]$ se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases rotoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ra} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_{rb} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

La matrice des inductances mutuelles $[M_{rs}]$ entre les trois phases statoriques et trois phases rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

θ : angle entre la phase a du stator et celle du rotor

M_{rs} : inductance mutuelle maximale entre une phase du rotor et une phase du stator

II.8. Equations générales du modèle biphasé de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est de nature triphasée. La structure symétrique et équilibrée de la machine permet de passer à une représentation biphasée équivalente (transformation de Park), réduisant considérablement la complexité du modèle en vue de la commande ou bien le diagnostic. Toutes les grandeurs électromagnétiques (flux, courants) soient statoriques ou rotoriques sont ramenées sur un seul repère. Ce repère peut être positionné soit fixe par rapport au stator (repère α - β), soit tournant (repère d-q)).

Pour notre étude on choisit le repère lié au stator α - β donc la matrice de transformation de Park mais cas spécial $\theta=0$ donc le matrice devient matrice de Concordia

II.8.1.Modélisation dans le repère de Park :

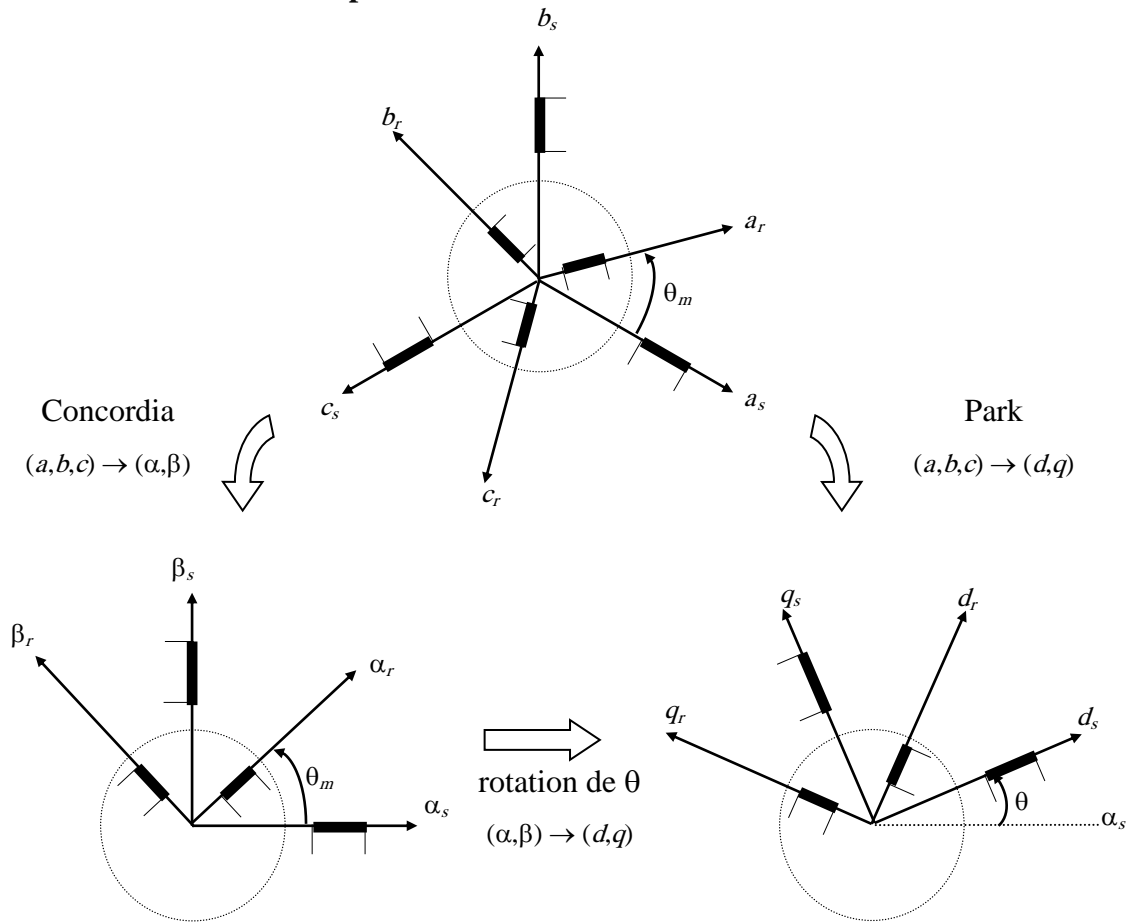


Fig. II. 6:Représentation spatiale de la transformation triphasée / biphasée.

De ce fait, il est donc possible de définir une matrice $[T_{33}]$, permettant le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes X_{dqo} du système biphasé tournant à la même vitesse, telle que :

$$[T_{33}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.42)$$

θ : étant l'angle entre la phase a du stator et l'axe d du référentiel.

Si l'angle $\theta=0$ la matrice devient :

$$[C_{33}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

[C33] : matrice de Concordia

On applique la matrice Concordia [C33] sur les équations des tensions(II.1),(II.36)et des flux (II.4) (II.39)on trouve :

II.8.2.Les équations de tension :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{r\alpha} + \phi_{r\alpha} \omega_r \\ V_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{r\beta} - \phi_{r\beta} \omega_r \end{array} \right. \quad (\text{II.44})$$

II.8.3.Les équations de flux:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \\ \phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \\ \phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \end{array} \right. \quad (\text{II.45})$$

II.9.Le modèle en représentation d'état de la machine asynchrone :

Ces objectifs imposent donc directement le choix des sorties du système. La représentation d'état du moteur dépend, comme nous l'avons vu, du repère choisi et du choix des variables d'état pour les équations électriques. Nous donnons, dans ce chapitre (les paramètres variables lorsque la machine est en cas de défaut et les variables) comme notre étude.

II.9.1.Modèle avec entrées en tension :

a)Choix des variables d'état :

Le choix des variables d'état dépend des objectifs liés soit à la commande soit à l'observation(les paramètres variables lorsque la machine est en cas de défaut et les variables) Pour le modèle complet, Nous considérons dans notre cas les variables d'état suivants :

$$X = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \phi_{r\alpha}, \phi_{r\beta}]^T \quad (\text{II.46})$$

Les entrées du modèle de la machine asynchrone sont les tensions de commande $V_{s\alpha}$, $V_{s\beta}$ Pour mettre les équations sous forme de représentation d'état, nous devons modifier les équations des tensions statoriques et des tension rotoriques on trouve finalement le modèle sous forme:

$$\frac{dx}{dt} = A. X + B. U \quad (\text{II.47})$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma Lr}\right) & 0 & \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma Lr Lm} & \frac{(1-\sigma)\omega_r}{\sigma Lm} \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma Lr}\right) & -\frac{(1-\sigma)\omega_r}{\sigma Lm} & \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma Lr Lm} \\ \frac{Lm Rr}{Lr} & 0 & \frac{Rr}{Lr} & -\omega_r \\ 0 & \frac{Lm Rr}{Lr} & -\frac{Rr}{Lr} & -\frac{Rr}{Lr} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma.L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma.L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix}$$

A: matrice d'état.

B : le vecteur de commande.

X : vecteur d'état

U : vecteur de tension d'entrée

σ : $1 - \frac{Lm^2}{Lr Ls}$ Le coefficient de dispersion magnétique

Ts : $\frac{Ls}{Rs}$ constant de temps statorique

b) Le couple électromagnétique de la machine asynchrone :

Le couple électromagnétique C_{em} développé par la machine peut s'exprimer de différentes façons. Du point de vue de l'état et de par le choix de nos variables d'état, le couple de la machine est donné par la relation suivant :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \phi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{II.48})$$

A l'équation du couple électromagnétique s'ajoute l'équation mécanique :

$$J\dot{\Omega} = C_{em} - C_{ch} - fe \cdot \Omega \quad (\text{II.49})$$

Avec :

C_{ch} : Le couple de charge ;

fe : Le coefficient du frottement sur l'arbre.

J : est l'inertie de l'ensemble tournant.

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre premièrement on a présenté la modélisation de machine asynchrone a cage en triphasé et après, nous avons présenté une catégorie de modèles de la machine asynchrone sous forme de représentation d'état. Cette modélisation de la machine asynchrone est donnée en considérant la structure du système avec une partie primaire (le stator) et une partie secondaire en court-circuit (le rotor). A partir d'un modèle triphasé, ces modèles deux phases sont données dans le cadre de certaines hypothèses permettant de simplifier la modélisation. Les équations de flux, courants et tensions ont alors été extraites. De plus, la modélisation est donnée en faisant apparaître les variables d'états nécessaires aux objectifs d'observation.

Bibliographie

- [1] L.Anbar « détection des défauts électriques et mécaniques d'une machine asynchrone par analyse du courant statorique » Mémoire en licence Professionnel, université mohammed V-Souissi le 27/6/2014.
- [2] M.Gaouaoui « diagnostic par reconnaissance des formes : application à la machine asynchrone » Mémoire de Magister, Université mouloud mammeri tizi-ouzou le 22/02/2012.
- [3] G.DIDIER « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » *Thèse de Doctorat, Université henri poincaré, nancy-I le 29/10/2004.*
- [4] T.Boumegoura, « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic », *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 26 Mars 2001.*
- [5] A.Abderrahim « Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas - Setif-Ufas (algerie) le 05 / 05 / 2010

Chapitre III :

Conception de la filtre de kalman

III.1.Introduction :

Dans le domaine de l'estimation des paramètres des machines électriques a courants alternatifs, beaucoup des méthodes utilisées. Selon les considérations sur les différentes perturbations, ces méthodes peuvent être stochastiques ou Déterministes les secondes ne font pas d'hypothèse sur les propriétés des bruits, tandis que Les premières tiennent compte des bruits de perturbation du système (bruit de mesure et bruit d'état).

Parmi Les méthodes stochastiques, nous avons, le Filtre de Kalman Etendu. Un cas particulier de Filtre de Kalman. Il est approprié pour le traitement des mesures bruitées discrètes et pour obtenir des estimates précises des variables d'état et des paramètres du modèle.

III.2.Concepts d'estimateur et d'observateur :

Dans le domaine des entraînements à vitesse variable (moteur asynchrone), Ces grandeurs (les flux, les paramètres variables) sont difficilement accessibles à la mesure. En effet, les capteurs de flux sont relativement délicats (sensible au bruit de mesure, chaleur et vibrations) et réduisent la robustesse de l'ensemble. Ainsi, la reconstruction du flux et de sa position par des estimateurs ou des observateurs devient un objectif principal.

Un tel estimateur ou observateur est représenté sur la Fig (III.1).

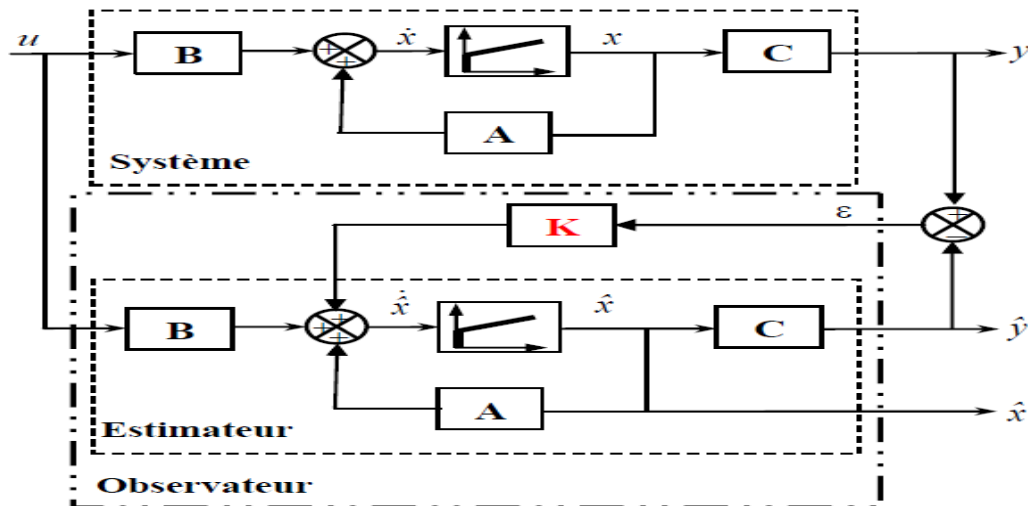


Fig. III.1 : Schéma de principe de : Estimateur ou Observateur [2]

III.2.1. Estimateurs :

Les estimateurs s'appuient sur l'utilisation d'une copie du modèle d'états de la machine en régime permanent (estimateur statique) ou en transitoire (estimateur dynamique). Il n'y a aucun bouclage avec des grandeurs réelles permettant de prendre en compte ces erreurs ou perturbations (boucle ouverte). La dynamique d'un estimateur dépend des modes propres de la machine.

Une telle approche conduit à la mise en oeuvre d'algorithmes simples et rapides, mais sensibles aux erreurs de modélisation et aux variations paramétriques au cours de fonctionnement. Pour construire un estimateur de la machine asynchrone, le modèle mathématique pris comme un système linéaire variant dans le temps, est donné par [3] :

$$\begin{cases} \dot{X} = A.X + B.U \\ Y = C.X \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Pour évaluer la précision de l'estimation, on considère l'écart entre les états réels et estimés, donné par :

$$\varepsilon = X - \hat{X} \quad (\text{III.2})$$

Alors, la dynamique de l'erreur est :

$$\dot{\varepsilon} = \dot{X} - \dot{\hat{X}} \quad (\text{III.3})$$

III.2.2. Observateur :

Un observateur d'état est un algorithme basé sur la connaissance des modèles décrivant le comportement du procédé et utilisant des mesures acquises sur le procédé afin de reconstruire les mesures manquantes. Le but de l'observateur est de fournir à chaque instant la valeur du vecteur d'état ou une évaluation de celui-ci. Un signal appelé résidu, est ensuite généré, pour pouvoir décider de l'état de fonctionnement du système : s'il est normal ou défectueux. De façon générale, on considère que l'on dispose toujours des équations d'état du système.

III.3. Classification des observateurs :

Nous allons présenter brièvement les différentes catégories des observateurs les plus utilisés [4],[5],[8],[9]:

III.3.1. Les observateurs déterministes :

Ce sont les observateurs qui ne prennent pas en compte les bruits de mesures et les fluctuations aléatoires des variables d'états, l'environnement est déterministe. Parmi ces observateurs on peut citer l'observateur de Luenberger.

III.3.2. Les observateurs stochastiques :

Ces observateurs donnent une estimation optimale des variables d'état en se basant sur des critères stochastiques. Leurs observations se basent sur la présence de bruit dans le système ce qui est souvent le cas. Le filtre de Kalman illustre ce type d'observateur.

III.3.3. Les observateurs linéaires :

Ce sont les observateurs dont la construction du gain est basée sur une matrice A du système qui est linéaire est invariante dans le temps. Les observateurs de Luenberger en mode glissant se basent sur cette approche.

III.3.4. Les observateurs non linéaires :

Les systèmes peuvent être non linéaires (comme c'est le cas de la machine asynchrone). Dans ce cas, des observateurs ont été développés pour palier à cette difficulté. Ainsi, le problème de détection des défauts est relativement complexe.

Trois approches peuvent être distinguées :

- La première consiste à appliquer les méthodes développées pour le cas linéaire après linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement. Cependant, ceci peut engendrer de fausses alarmes et des détections erronées dues aux erreurs de linéarisation.
- La deuxième approche consiste à utiliser des observateurs non linéaires. Néanmoins, ceci nécessite une connaissance exacte des paramètres et de la structure du modèle. Ainsi, de part la diversité du caractère non linéaire des processus, il n'est pas évident de déterminer un observateur applicable pour tout système.
- La troisième approche, qui est l'approche multi modèle. Son principe de base est de représenter un système non linéaire par un ensemble de modèles locaux (linéaires ou affines) caractérisant le fonctionnement du système dans différentes zones de fonctionnement, ces

modèles locaux sont pondérés par des fonctions d'activation qui représentent le degré de confiance attribué à chaque modèle, cette méthode fera l'objet d'une étude plus détaillée.

III.3.5.Observateurs d'ordre complet :

Ces observateurs donnent les informations sur les quatre variables d'état. Ces variables sont définies, soit comme quatre composantes des flux statoriques et rotoriques, soit comme deux composantes du courant statorique et deux composantes du flux rotorique. Remarquons que ces observateurs nécessitent un temps de calcul long.

III.3.6.Observateurs d'ordre réduit :

Ces observateurs donnent les informations sur les variables d'état non mesurables (flux). Ces observateurs nécessitent moins temps de calcul que ceux d'ordre complet.

Remarque : Dans la littérature spécialisée, le terme d'observateur d'état est réservé pour une estimation d'état déterministe et le terme filtre pour le cas stochastique.

Dans cette étude, le filtre stochastique d'ordre complet de Kalman a été retenu. Comme le fonctionnement de ce filtre est en présence du bruit, la quantification de ces bruits (état et mesure) Est essentielle pour le bon fonctionnement du filtre. Il est intéressant de rappeler les différentes sources de ces bruits.

III.4.Notion sur les bruits d'état et de mesure :

III.4.1.Bruit d'état :

Le bruit d'état rend compte des imperfections du modèle par rapport à la machine réelle. Les principales approximations effectuées correspondent aux hypothèses qui ont permis d'élaborer le modèle dynamique de la machine. En général, une machine n'est pas une précision symétrique et la répartition du flux dans l'entrefer n'est pas rigoureusement sinusoïdale (hypothèses simplificatrices). Ces défauts, dus principalement à la fabrication de la machine, engendrent des harmoniques dans les tensions et les courants de la machine. La machine présente en général, des Pertes fer qui sont difficiles à identifier et compliquent l'expression mathématique du modèle d'état

Si on veut les prendre en compte dans la modélisation. Cependant, pour des machines dont la fabrication est soignée, les défauts précédents ne sont pas en général prépondérants dans les termes de bruit.

Dans le cas d'une estimation d'état sans extension aux paramètres de la machine, les termes prépondérants de bruit d'état sont dus aux variations des paramètres de la machine. Ce type de bruit est engendré par l'échauffement des enroulements de la machine. Il provoque un accroissement des résistances statoriques. En effet, la résistivité d'un conducteur augmente avec la température [8],[4].

Il existe d'autres sources de bruits d'état qui affectent le système. Il s'agit du bruit d'état introduit par l'onduleur. L'influence d'une incertitude sur la mesure de la vitesse mécanique (pour réactualiser la matrice d'état "A " dans chaque période d'échantillonnage) peut introduire un bruit d'état sur tout lorsqu'on suppose que la période d'échantillonnage n'est pas négligeable devant les constantes de temps mécaniques [4].

III.4.2. Bruit de mesure :

Les bruits de mesure concernent la chaîne de mesure des courants de ligne, c'est-à-dire les capteurs et les convertisseurs analogiques- numériques (CAN). Il y a donc principalement deux sources de bruits: un bruit analogique, dû au capteur, et un bruit de quantification dû au CAN. Le bruit résultant dépend de l'amplitude de chacun de ces bruits [8].

III.5. Filtre de Kalman :

Le filtre de Kalman est un filtre récursif, qui utilise une approche temporelle. Il permet d'estimer l'état (cet état correspond à l'information utile) d'un système dynamique à partir d'une information, à priori, sur l'évolution de cet état (modèle) et de mesure réelles.

Ce filtre fournit une solution récursive pour les problèmes de filtrage optimal linéaire. Il est applicable aussi bien dans les environnements stationnaires que dans les environnements non stationnaires [8],[9] [4].

Le filtre de Kalman est un outil de traitement utilisé dans une large gamme de domaines technologiques tels que le traitement du signal, l'automatique le radar et les systèmes de

communication. Il est également de plus en plus utilisé en dehors du domaine du traitement du signal, par exemple en météorologie et en océanographie, en finance et en navigation.

Le filtre de Kalman peut également être utilisé dans les situations où nous voulons lisser, filtrer ou prédire les états d'un système dynamique et linéaire, suivant la quantité d'informations disponibles [6],[9].

III.5.1.Evolution historique du filtre de Kalman :

Le filtre de Kalman doit son nom à Rudolf Kalman bien que Thorvald Nicolai Thiele et Peter Swerling aient développé un algorithme similaire avant lui. La paternité du filtre fait l'objet d'une petite controverse dans la communauté scientifique. Le filtre a été décrit dans diverses publications par Swerling (1958), Kalman (1960) et Kalman-Bucy (1961) [9]

En 1960, alors que Kalman visitait la NASA, un des responsables, F.Schmidt comprit la possibilité d'appliquer les résultats de Kalman pour le projet "Apollo" pour l'estimation et la commande de la trajectoire. Schmidt travailla sur le sujet et on peut dire que ce fut la première réelle implantation du filtre.

L'application du filtre de Kalman (estimateur linéaire) pour l'estimation de la position d'un objet nécessite, assez souvent, la linéarisation des équations d'un système non linéaire.

Cette étape supplémentaire conduit à définir ce que l'on appelle, aujourd'hui, le filtre de Kalman étendu [6].

III.5.2.Fonctionnement du filtre de Kalman :

Le filtrage de Kalman comporte deux phases distinctes : Prédiction et mise à jour. La phase de prédiction utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation courante. Dans l'étape de mise à jour, les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise



Fig III.2 : Les étapes du filtre de Kalman

La phase de prédiction :

On se place à l'instant $k + 1$. A cet instant, on dispose d'une estimation initiale fondée sur la connaissance du processus et des mesures jusqu'à l'instant précédent, c'est-à-dire k . Cette estimation est appelée estimation à priori. Si on notera $\hat{X}_{p(k+1)}$ l'estimation d'état à priori, donc Les équations de la phase de prédiction sont :

$$\begin{cases} \hat{X}_{p(k+1)} = A_d \hat{X}_k + B_d U_k \\ P_{p(k+1)} = A_d P_k A_d^T + Q \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

La phase de mise à jour (correction) :

Nous allons, maintenant, utiliser la mesure y_{k+1} (pour corriger l'estimation à priori) $\hat{X}_{p(k+1)}$ et Obtenir l'estimation à posteriori $\hat{X}_{e(k+1)}$, Les équations de la phase de correction sont :

$$\begin{cases} \hat{X}_{e(k+1)} = \hat{X}_{p(k+1)} + K_{k+1} [y_{k+1} - C_d \hat{X}_{p(k+1)}] \\ P_{e(k+1)} = P_{p(k+1)} - K_{k+1} C_d P_{p(k+1)} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec:

$$K_{k+1} = P_{p(k+1)} C_d^T + [C_d P_{p(k+1)} C_d^T + R]^{-1} \quad (\text{III.5.1})$$

K_{k+1} : Gain de Kalman optimal, au sens de l'erreur quadratique moyenne, c'est-à-dire qui entraîne une erreur à posteriori minimale, est appelé gain de Kalman.

Le filtre de Kalman nécessite un modèle discret de la machine qui se déduit du modèle continu [1], Le modèle de la machine discrétisé est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_d = e^{AT_e} = I + AT_e \\ B_d = BT_e \\ C_d = C \end{array} \right. \quad (III.6)$$

Où :

T_e : Période d'échantillonnage.

A_d, B_d, C_d : Matrices d'entrée et de sortie du modèle discret.

III.5.3. Filtre de Kalman étendu :

Le filtre de Kalman standard, décrit précédemment, permet l'estimation de l'état d'un système linéaire. Si on veut estimer des paramètres de la machine asynchrone, une solution consiste à étendre le vecteur d'état estimé aux paramètres recherchés. Le modèle devient alors non linéaire. On peut, sous certaines hypothèses, appliquer le filtre de Kalman standard à un modèle linéarisé du système.

Il faut alors effectuer une linéarisation du système à chaque pas autour du point de fonctionnement défini au pas précédent [4], [1]. Dans ce cas, le comportement dynamique du moteur asynchrone peut être modélisé par le modèle non linéaire suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{k+1} = f(x_k, u_k, k) + Vm_k \\ Y_k = h(x_k, k) + Wo_k \end{array} \right. \quad (III.7)$$

Vm_k, Wo_k sont respectivement, à l'instant 'k', les bruits des états et de sortie.

Un nouveau vecteur d'état contenant les états originaux et le paramètre qu'on veut estimer est alors constitué. On construit un système augmenté à partir de l'état du système X_k et des paramètres inconnus θ_k . Le nouveau vecteur d'état est défini par :

$$X_{\text{etendue } k} = \begin{bmatrix} X_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Avec : $\theta_k = R_r$

X_k : Le vecteur des états à estimer.

θ_k : Le vecteur des paramètres à estimer.

Les équations du système augmenté sont:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d(\theta_k) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k \\ \theta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d(\theta_k) \\ 0 \end{bmatrix} U_k + \begin{bmatrix} Vx_k \\ V\theta_k \end{bmatrix} \\ Y_{k+1} = [C(\theta_k) \quad 0] + W o_k \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Avec:

$V\theta_k$: Le bruit de variation des paramètres.

Donc pour l'estimation des paramètres inconnus, il suffit d'appliquer l'algorithme de Kalman Etendu.

$$\begin{cases} f(x_k, u_k, k) = (I + AT_e)x_k + BT_e \cdot u_k + Vm_k \\ h(x_k, k) = C \cdot x_k + W o_k \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Les fonctions f et h (de l'équation ()) représentant respectivement la fonction d'évolution d'état et la fonction de mesure) ne sont pas des fonctions linéaires [6].

Remarque [1] :

Le bruit du système Vm_k est caractérisé par :

$$E\{Vm_k\} = 0 \quad (\text{III.11})$$

$$E\{Vm_k Vm(j)_r\} = Q \cdot \delta_{kj} \quad (\text{III.12})$$

$$Q \geq 0 \quad (III.13)$$

Le bruit des mesures W_{0k} est caractérisé par :

$$E\{W_{0k}\} = 0 \quad (III.14)$$

$$E\{W_{0k} \bullet W_{0(j)T}\} = R \bullet \delta_{kj} \quad (III.15)$$

$$R \geq 0 \quad (III.16)$$

Où $E\{\}$ représente l'opérateur d'espérance mathématique.

Où Q est la covariance de l'erreur du modèle et R est la covariance de l'erreur de mesure.

A partir de là, les équations de prédiction et de correction deviennent :

• **Equations de prédiction :**

$$\begin{cases} \hat{X}_{p(k+1)} = F_k \hat{X}_k + G_k U_k \\ P_{p(k+1)} = F_k P_k F_k^T + Q \end{cases} \quad (III.17)$$

• **Equations de correction :**

$$\begin{cases} K_{k+1} = P_{p(k+1)} H_{k+1}^T [H_k P_{p(k+1)} H_k^T + R]^{-1} \\ \hat{X}_{e(k+1)} = \hat{X}_{p(k+1)} + K_{k+1} [y_{k+1} - H_{k+1} \hat{X}_{p(k+1)}] \\ P_{e(k+1)} = P_{p(k+1)} - K_{k+1} H_{k+1} P_{p(k+1)} \end{cases} \quad (III.18)$$

III.5.4. Algorithme du filtre de Kalman étendu :

Les étapes du filtre de Kalman étendu sont les suivantes [6], [7]:

1) Initialisation du processus :

Cette étape consiste à calculer les valeurs initiales du vecteur d'état \hat{X}_{k0} , la matrice de variances-covariances de l'erreur d'estimation P_0 , la matrice de variances-covariances du bruit de processus Q_0 ainsi que la matrice de variances-covariances du bruit de mesure R_0 .

Valeurs initiales de :

$$\text{Vecteur d'état } \hat{X}_{k0} = \hat{X}_k(t_0) \quad (\text{III.19})$$

Matrices de covariance :

$$Q = Q_0 \quad (\text{III.20})$$

$$R = R_0 \quad (\text{III.21})$$

$$P_0 = P(t_0)$$

$$(\text{III.22})$$

2) Calcul de matrice Jacobine de fonction non linéaire f autour de l'état précédent (k) :

$$F_k = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(f(x_k, u_k, k) \right) \right]_{\hat{X}_k, u_k} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Avec : } F_{ii} = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \quad \text{et} \quad F_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (\text{III.24})$$

3) Prédiction de l'état à l'instant $K + 1$ par le calcul de l'estimé $\hat{X}_{p(k+1)}$ et de la matrice de covariance $P_{p(k+1)}$ à partir des mesures disponibles à l'instant K :

- Projection en avant de l'état :

$$\hat{X}_{p(k+1)} = F_k \hat{X}_k + G_k U_k \quad (\text{III.25})$$

- Projection en avant de la covariance de l'erreur :

$$P_{p(k+1)} = F_k P_k F_k^T + Q \quad (\text{III.26})$$

4) Calcul des matrices Jacobiennes de fonction non linéaire h :

$$G_k = \left[\frac{\partial}{\partial u} \left(f(x_k, u_k, k) \right) \right]_{\hat{X}_k, u_k} \quad (\text{III.27})$$

$$\text{Avec: } G_{ii} = \frac{\partial f_i}{\partial u_i} \quad \text{et} \quad G_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \quad (\text{III.28})$$

$$H_k = \left[\frac{\partial}{\partial x} (h(x_k, k)) \right]_{\hat{X}_{p(k+1)}} \quad (\text{III.29})$$

5) Correction de l'estimation par la mesure à partir des équations suivantes :

- Calcul du gain de Kalman :

$$K_{k+1} = P_{p(k+1)} H_{k+1}^T + [H_k P_{p(k+1)} H_k^T + R]^{-1} \quad (\text{III.30})$$

- Mise à jour de l'estimation avec y_{k+1} :

$$\hat{X}_{e(k+1)} = \hat{X}_{p(k+1)} + K_{k+1} [y_{k+1} - H_{k+1} \hat{X}_{p(k+1)}] \quad (\text{III.31})$$

- Mise à jour de la covariance de l'erreur :

$$P_{e(k+1)} = P_{p(k+1)} - K_{k+1} H_{k+1} P_{p(k+1)} \quad (\text{III.32})$$

6) Détermination des matrices de covariance de bruit d'état et de mesure Q et R :

Le but est de minimiser les erreurs liées à une modélisation approchée et à la présence de bruits sur les mesures à partir des matrices passeront les différents états mesurés, prédits et estimés.. Ce réglage requiert une attention particulière et seul un réglage en ligne permet de valider le fonctionnement du filtre.

La matrice Q liée aux bruits l'état, permet de régler la qualité estimée de notre modélisation et de sa discrétisation. Une forte valeur de Q donne une forte valeur du gain K réduisant l'importance de bruit qui correspondre de la modélisation et la dynamique du filtre. La mesure possède alors un poids relatif plus important. Une trop forte valeur de Q peut cependant créer une instabilité de l'observateur.

La matrice R liée aux bruits des mesures. Une forte valeur indique une grande incertitude de la mesure. Par contre, une faible valeur permet de donner un poids important à la mesure. Cependant, il faut faire attention au risque d'instabilité aux faibles valeurs de R.

La matrice de covariance Q est 5×5 , celle de R est 2×2 . Les matrices R et Q peuvent être diagonalisées [7], [4]:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{I_{S\alpha}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{I_{S\beta}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{\phi_{r\alpha}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{\phi_{r\beta}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{R_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{I_{S\alpha}} & 0 \\ 0 & R_{I_{S\beta}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

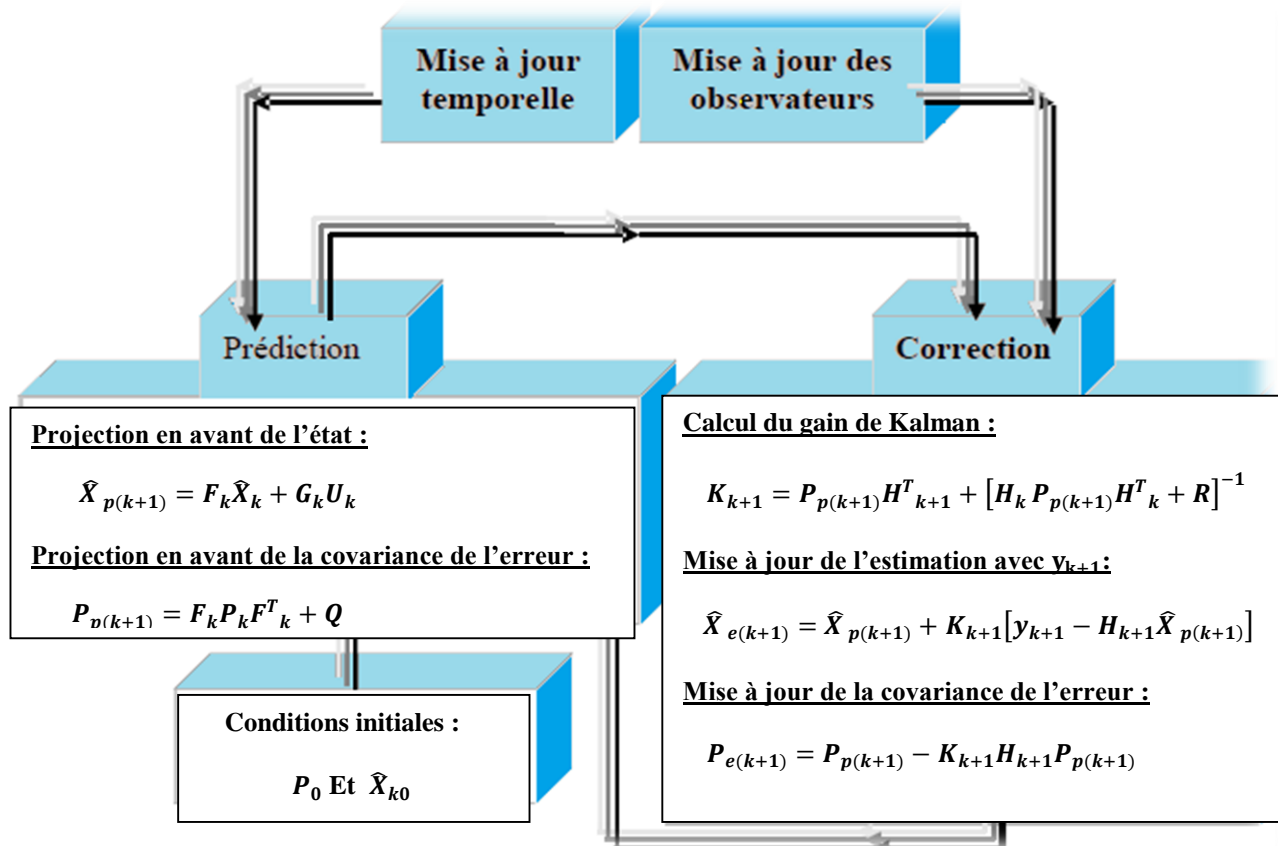


Fig III.3 : Schéma opérationnel du Filtre de Kalman étendue

III.5.5. Application filtre de Kalman étendue à la machine asynchrone:

III.5.5.1. Modèle de la machine pour le filtre de Kalman étendue :

Le modèle mathématique de la machine asynchrone représenté dans le système de coordonnées liée au stator (α, β) est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\dot{X}_{etendue}] = [A] \cdot [X_{etendue}] + [B] \cdot [U] \\ [Y] = [C] \cdot [X_{etendue}] \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Avec:

$$\dot{X}_{etendue} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\phi}_{r\alpha} \\ \dot{\phi}_{r\beta} \\ \dot{R}_r \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X_{etendue} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \\ R_r \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} & \frac{(1-\sigma)\omega_r}{\sigma L_m} & 0 \\ -\left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{-(1-\sigma)\omega_r}{\sigma L_m} & \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} & 0 \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\omega_r & 0 \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -\frac{L_r}{\omega_r} & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

III.5.5.2. Discrétisation du modèle :

Pour implanter le FKE dans une application en temps réel sur un ordinateur numérique le modèle continu doit être écrit sous sa forme discrète [8]:

$$\begin{cases} [X_{etendue(k+1)}] = [A_d] \cdot [X_{etendue(k)}] + [B_d] \cdot [U] \\ [Y] = [C_d] \cdot [X_{etendue(k)}] \end{cases} \quad (III.36)$$

Avec :

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{T_e R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} & \frac{T_e(1-\sigma)\omega_r}{\sigma L_m} & 0 \\ 1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{-T_e(1-\sigma)\omega_r}{\sigma L_m} & \frac{T_e R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} & 0 \\ \frac{T_e L_m R_r}{L_r} & 0 & 1 - \frac{T_e R_r}{L_r} & -T_e \omega_r & 0 \\ 0 & \frac{T_e L_m R_r}{L_r} & T_e \omega_r & 1 - \frac{T_e R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{T_e}{\sigma.L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_e}{\sigma.L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

III.5.5.3. La prédiction vecteur d'état \hat{X}_k à l'instant $k + 1$ est basé sur les fonctions suivants :

$$f(x_k, u_k, k) = \begin{bmatrix} \left(1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma.L_r}\right)\right) i_{s\alpha} + \frac{T_e R_r(1-\sigma)}{\sigma.L_r L_m} \phi_{r\alpha} + \frac{T_e(1-\sigma)\omega_r}{\sigma.L_m} \phi_{r\beta} + \frac{T_e}{\sigma.L_s} V_{s\alpha} \\ \left(1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{Rr(1-\sigma)}{\sigma.L_r}\right)\right) i_{s\beta} - \frac{T_e(1-\sigma)\omega_r}{\sigma.L_m} \phi_{r\alpha} + \frac{T_e R_r(1-\sigma)}{\sigma.L_r L_m} \phi_{r\beta} + \frac{T_e}{\sigma.L_s} V_{s\beta} \\ \frac{T_e L_m R_r}{L_r} i_{s\alpha} + \left(1 - \frac{T_e R_r}{L_r}\right) \phi_{r\alpha} - T_e \omega_r \phi_{r\beta} \\ \frac{T_e L_m R_r}{L_r} i_{s\beta} + T_e \omega_r \phi_{r\alpha} + \left(1 - \frac{T_e R_r}{L_r}\right) \phi_{r\beta} \\ R_r \end{bmatrix} \quad (III.37)$$

$$h(x_k, k) = \left[C(\theta_k) \quad \left(\frac{\partial(C(\theta_k)X_k)}{\partial\theta} \right)_{\theta_k} \right] = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (III.38)$$

$$G_k = \left[\frac{\partial}{\partial u} (f(x_k, u_k, k)) \right]_{\hat{x}_k, u_k} = \begin{bmatrix} \frac{T_e}{\sigma.L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_e}{\sigma.L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

III.5.5.4. Prédiction de la covariance de l'erreur :

- **Calcul de matrice Jacobienne de fonction non linéaire f autour de l'état précédent à l'instant k :**

$$F_k = \left[\frac{\partial}{\partial x} (f(x_k, u_k, k)) \right]_{\hat{X}_k, u_k} = \begin{bmatrix} A_d(\theta_k) & \left(\frac{\partial(A_d(\theta_k)X_k + B_d(\theta_k)U_k)}{\partial\theta} \right)_{\theta_k} \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Avec :

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1 - \sigma)}{\sigma L_r} \right) & 0 & \frac{T_e R_r(1 - \sigma)}{\sigma L_r L_m} & \frac{T_e(1 - \sigma)\omega_r}{\sigma L_m} & a1 \\ 0 & 1 - T_e \left(\frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{R_r(1 - \sigma)}{\sigma L_r} \right) & -T_e(1 - \sigma)\omega_r & \frac{T_e R_r(1 - \sigma)}{\sigma L_m} & a2 \\ \frac{T_e L_m R_r}{L_r} & 0 & \frac{\sigma L_m}{1 - \frac{T_e R_r}{L_r}} & \frac{\sigma L_r L_m}{-T_e \omega_r} & a3 \\ 0 & \frac{T_e L_m R_r}{L_r} & \frac{T_e \omega_r}{L_r} & 1 - \frac{T_e R_r}{L_r} & a4 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_r} & 1 \end{bmatrix}$$

$$a1 = T_e \left(\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} \mathbf{i}_{s\alpha} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r} \boldsymbol{\phi}_{r\alpha} \right)$$

$$a2 = T_e \left(\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r L_m} \mathbf{i}_{s\beta} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r} \boldsymbol{\phi}_{r\beta} \right)$$

$$a3 = T_e \left(\frac{L_m}{L_r} \mathbf{i}_{s\alpha} - \frac{1}{L_r} \boldsymbol{\phi}_{r\alpha} \right)$$

$$a4 = T_e \left(\frac{L_m}{L_r} \mathbf{i}_{s\beta} - \frac{1}{L_r} \boldsymbol{\phi}_{r\beta} \right)$$

- **Calcul de matrice Jacobienne de fonction non linéaire h pour calculé le gain :**

$$H_k = \left[\frac{\partial}{\partial x} (h(x_k, k)) \right]_{\hat{x}_{p(k+1)}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

- **Conditions d'opération :**

La période d'échantillonnage est fixé à $T_e = 0.0002$., Les valeurs des matrices du Filtre de Kalman Etendu sont :

$$P_0 = \text{diag}[10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7}]$$

$$Q_0 = \text{diag}[10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7} \quad 10^{-7}]$$

$$R = \text{diag}[10^{-5} \quad 10^{-5}]$$

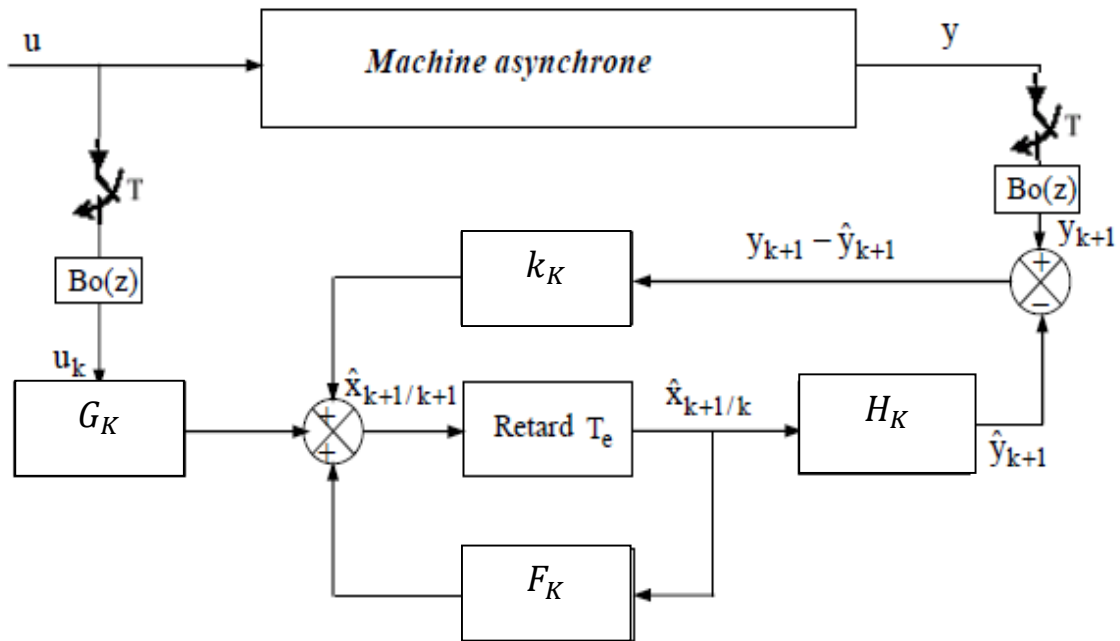


Fig III.4: schéma fonctionnel du filtre de Kalman étendu

III.5.6. Les avantages et les inconvénients de filtre de Kalman étendu [8]:

Les avantages:

- Plus facile à justifier dans le cas discret, que dans le cas continu.
- La plupart des applications sont faites sur calculateurs numériques.
- Les cas traités correspondent à des systèmes à observation discrète.
- Récursif utile pour le temps réel.
- Permet l'estimation d'états passés, présents et futurs.
- Utilisable même si le modèle du processus est imprécis.

Les inconvénients:

- Difficile à déboguer.
- Meilleur estimateur théorique seul.
- initialisation des matrices de covariance P , Q et R .

III.6.conclusion:

dans Ce chapitre nous avons étudié la modélésation de fltre du kalman qui permet d'obtenir une excellente estimation des variables d'état de moteur asynchrone à cage grace a des mesures de sortie 'y' qui est effectuées en ligne (instantanément) .

notre système (MAS à cage) est un système non linéaire on peut éstimer ses grandeurs internes qui ne sont pas mesurable (par l'utilisation de capteur) à partir l'application technique de filtrage stochastique de kalman (filter du kalman étendu).

Bibliographie

- [1] S.Meradi « Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone vue de diagnostic des défauts rotoriques » Mémoire de Magister, Université mohamed khider de Biskra le 27/06/2007
- [2] I. Benlaloui « Commande, Observation et Diagnostic d'un Système Non-linéaire : Application à la Machine Asynchrone en Présence de Défauts » Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, le 04/06/2016
- [3] A.Bouguerne, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones » Mémoire de Magister, Université Mentouri - Constantine 2009
- [4] K.Yahia « estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé » Mémoire de Magister, Université Mohammed Khider de Biskra 2005.
- [5] T.Boumegoura, « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic », *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 26 Mars 2001.*
- [6] F.Belmahdi « Application du filtre de kalman pour le débruitage des signaux » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou le 14/12/2015
- [7] O.Ouledali « commande directe du couple d'un moteur synchrone a aimants permanents sans capteur mécanique » Mémoire de Magister, Université Oran ENSET 2 2009
- [8] M.Hacène « Estimation des Grandeurs Intrinsèques D'une Machine Asynchrone » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Setif-UFAS le 06 /07/2009
- [9] M.HAIDOUR et N.HAZIANE, «Diagnostic de la asynchrone (Approche multi modèle)», mémoire Ingéniorat d'état , école nationale polytechnique de Harache,le juin 2005.

Chapitre VI:

Simulation et résultats

IV.1.Introduction :

Après avoir développé le modèle de la machine asynchrone on utilise l'outil informatique (MATLAB/SIMULINK) pour simuler le fonctionnement de la machine dans les différentes conditions, tout d'abord on va tracer l'évolution temporelle des différentes variables d'état de la machine comme les courants, flux, la vitesse, le couple électromagnétique pour l'état sain de la machine en suite on va voir l'influence de l'apparition d'un défaut rotorique (cassure d'une barre de la cage d'écureuil) sur les performances de la machine.

IV.1.1.Cas d'une machine saine à vide :

Les présentées dans cette partie correspond à la simulation de fonctionnement de la machine a vidé sans l'application du couple résistant de la charge.

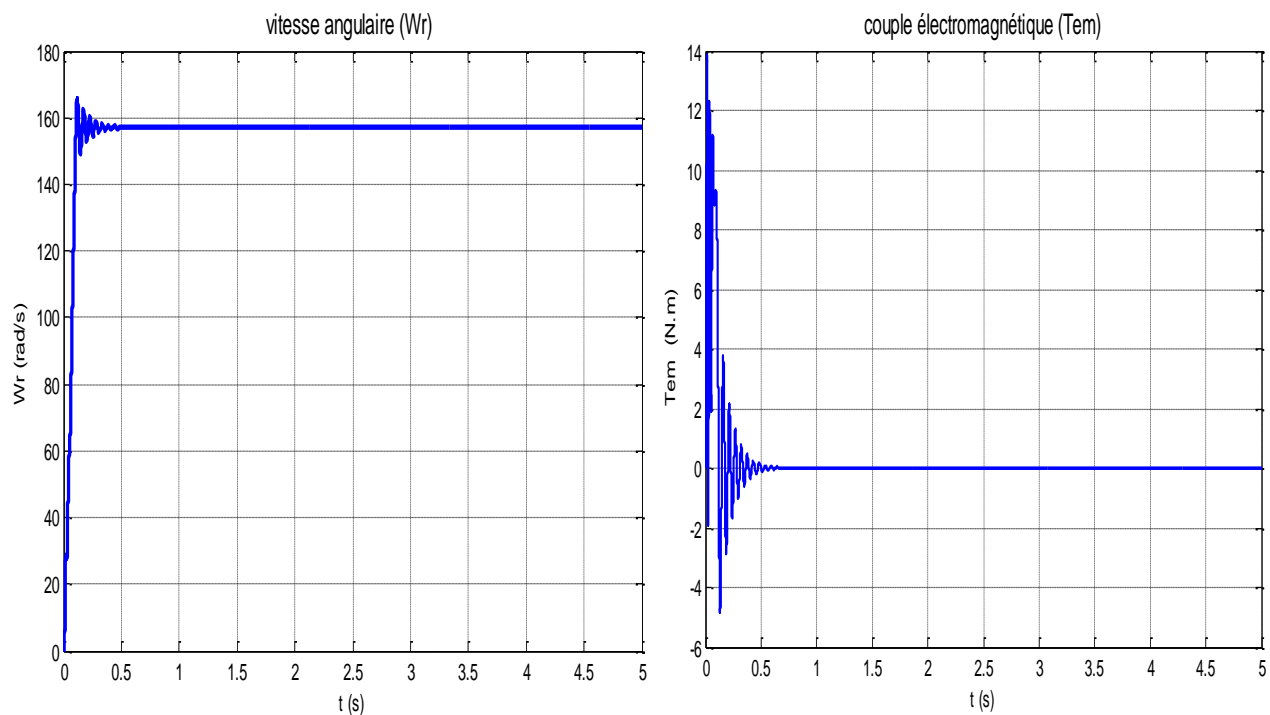


Fig. IV.1 : vitesse de rotation, couple électromagnétique

a) Vitesse de rotation :

La figure (IV.1) présente l'évolution de la vitesse angulaire du rotor, a l'instant de démarrage, la vitesse s'augmente a partir de la valeur 0 jusqu'à 0.5s durant le régime transitoire, après avoir atteindre le régime permanent la grandeur de cette vitesse reste constante.

b) Couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est illustré dans la figure (IV.1) durant le régime transitoire le couple oscille en régime amortie autour de la valeur du couple résistant due au frottement qui a une valeur presque nulle.

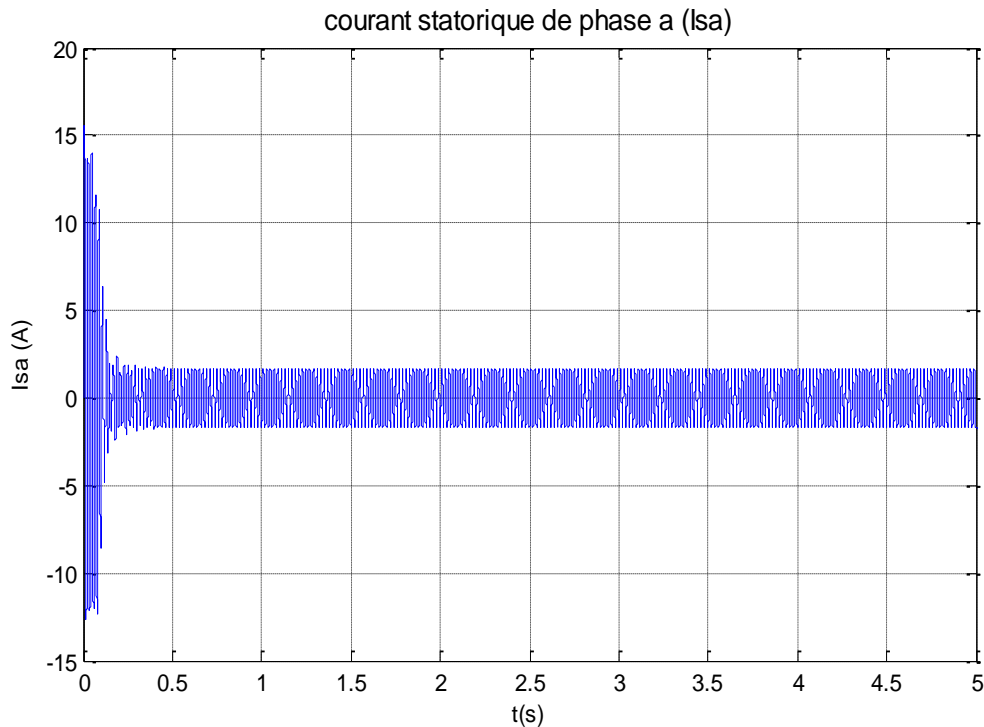


Fig. IV.2 : courant statorique

c) Courant statoriques :

La figure (IV.2) présente l'évolution temporelle du courant d'une seule phase statorique lors d'un démarrage à vide, l'appel des courants au démarrage de la machine alimentée par sa tension nominale dépasse les 15 A, dans un régime transitoire qui dure 0.3s, ensuite un régime permanent s'établit par conséquence les grandeurs du courant statorique diminue.

d) Courants rotoriques :

Pour la simulation des courants rotoriques (figure (VI.3)) qui circule dans les barres de la cage d'écurueil, on a choisit 3 barres le deuxième serait le sujet de l'injection de défaut (cassure) et les deux autre pour voir l'influence de ce défaut sur les courants qui les traverses par la suite dans ce chapitre.

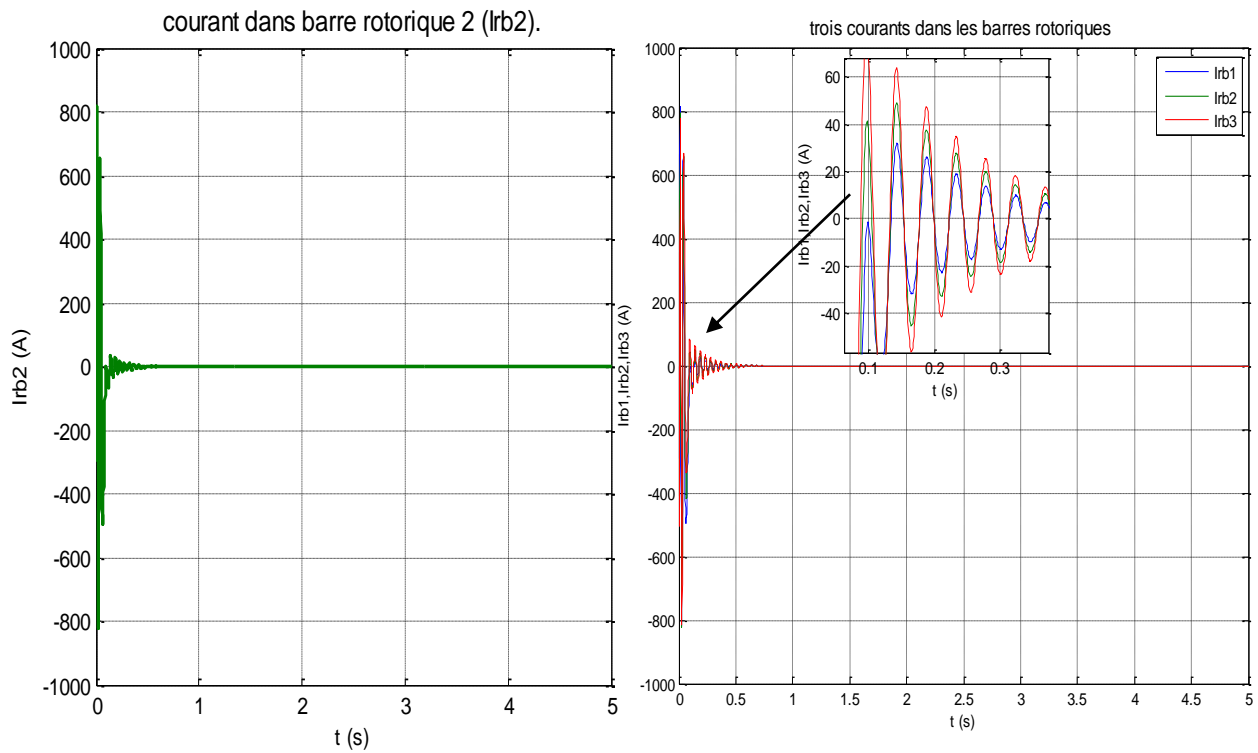


Fig. IV.3 : courants dans les barres rotoriques I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3}

IV.1.2. Cas d'une machine saine en charge :

À l'instant $t= 2.5s$ on applique un couple de charge résistant égale à $5N.m$ sur l'arbre de la machine et on voit son impacte sur les différentes variables et les performances de la machine.

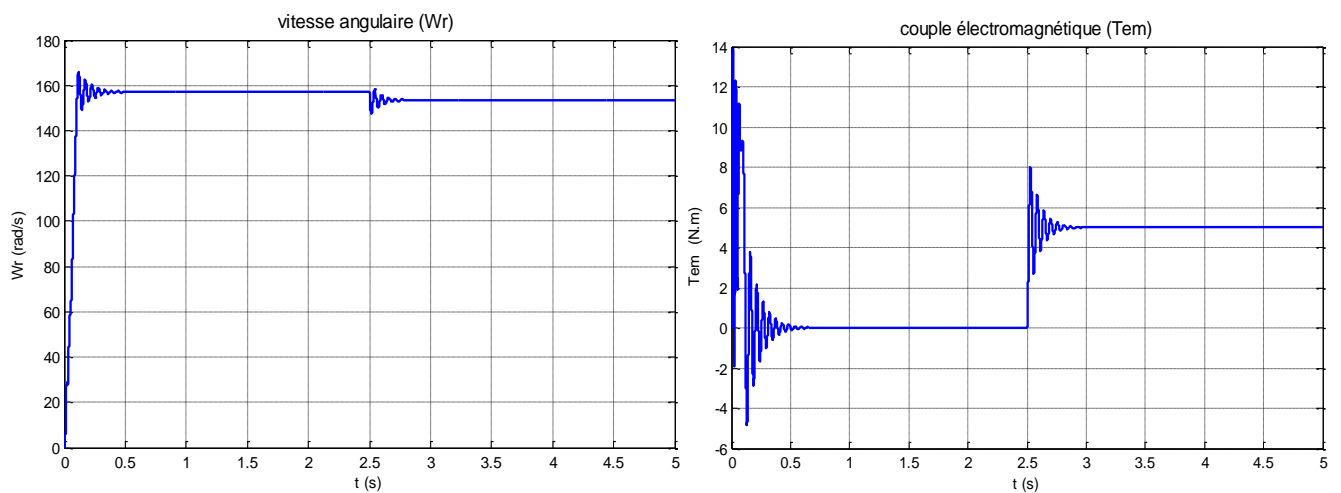


Fig. IV.4 : vitesse de rotation, couple électromagnétique

a) Vitesse de rotation et le couple électromagnétique:

les courbes de la figure (IV.4) présente la vitesse de rotation du rotor et le couple électromagnétique produit par la machine sur son arbre, on constate que a l'instant d'application du couple résistant la vitesse angulaire se réduite et par conséquent le couple produit s'augmente pour compensé l'application du couple résistant, jusqu'à l'établissement de l'équilibre entre le ces couples.

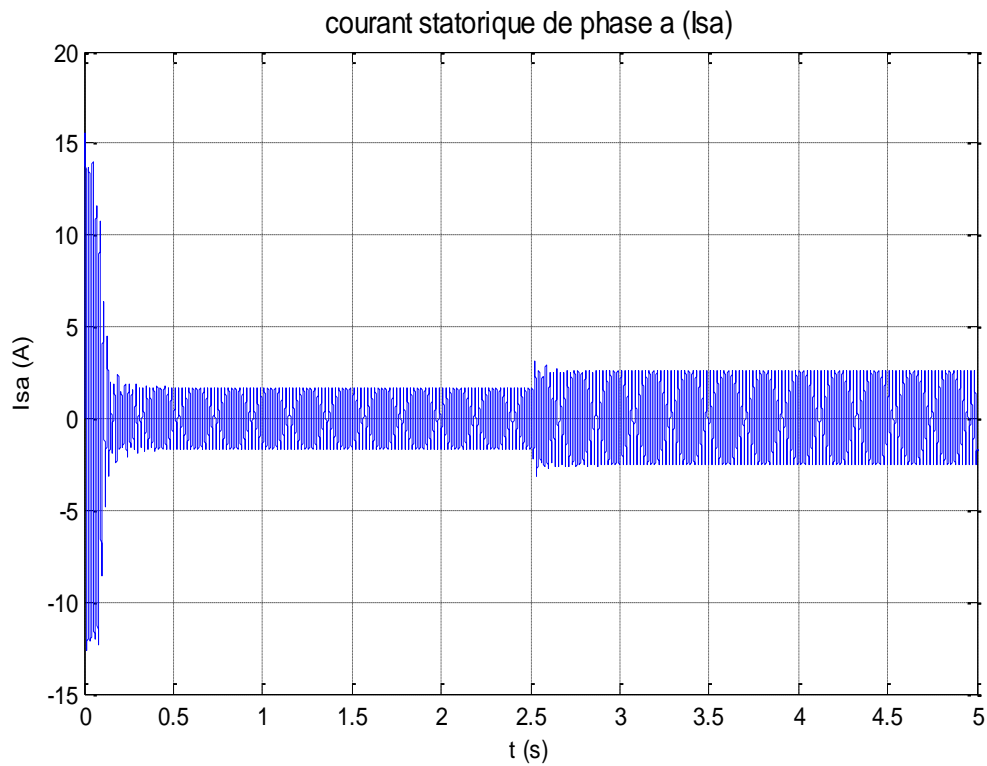


Fig.IV.5 : courant statorique

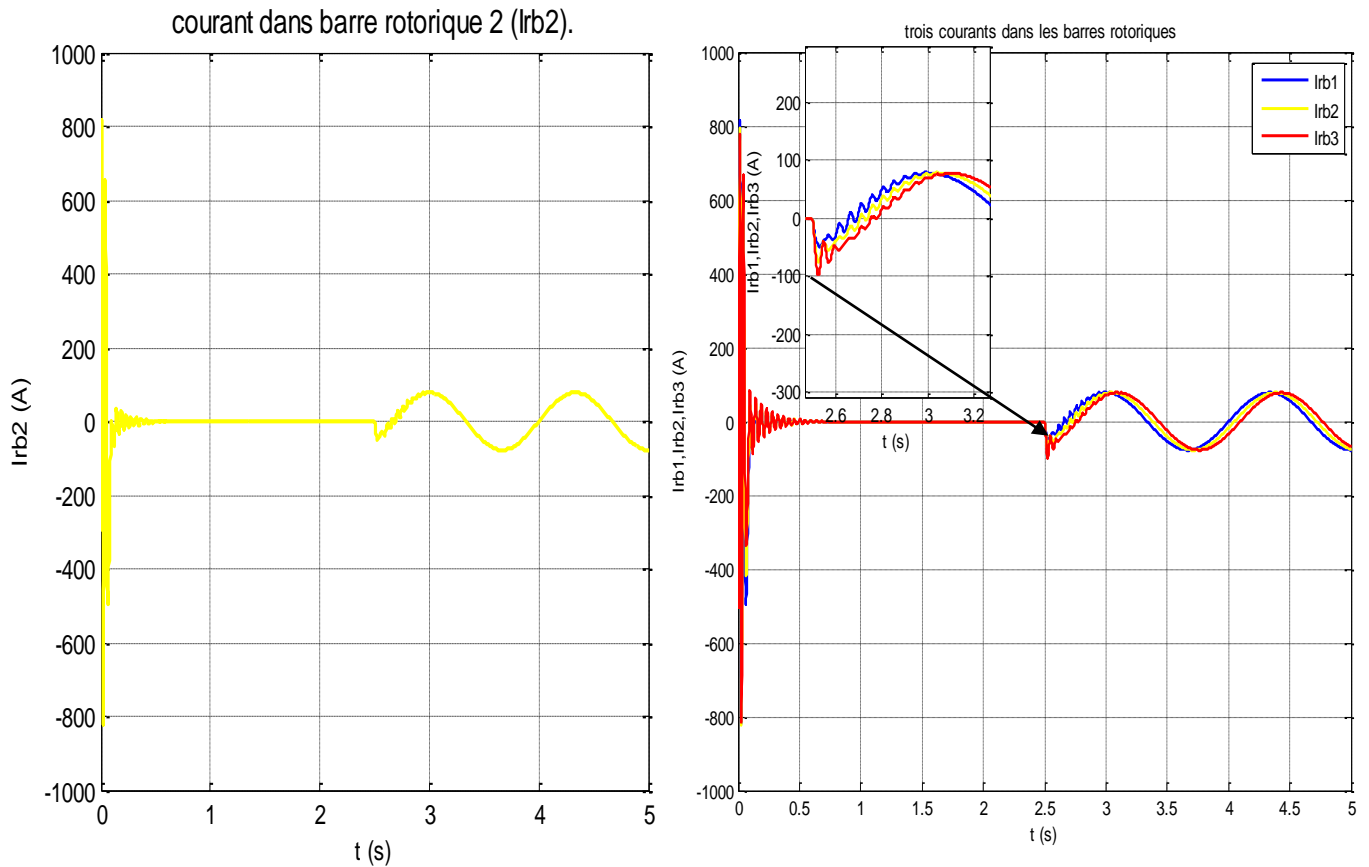
b) courant statorique :

Dans la figure (IV.5) on constate que le courant statorique témoin s'augmente a l'instant d'application du couple résistant parce que l'augmentation du couple produit par la machine fait appel a l'augmentation de puissance consommée par la machine.

c) courants des barres rotoriques :

La figure (IV.6) illustre trois courbes en régime transitoire des courants des barres rotoriques I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3} et en régime permanent. On observe que les barres rotoriques sont logiquement parcourues par des courants très importants de valeur maximale proche de 800A à cause de présence la charge (couple résistant).

Fig. IV.6 : courants dans les barres rotorique I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3}



IV.1.3.Simulation de défaut rotorique à vide et à la présence d'une charge sur l'arbre Du moteur :

IV.1.3.1Machine à vide :

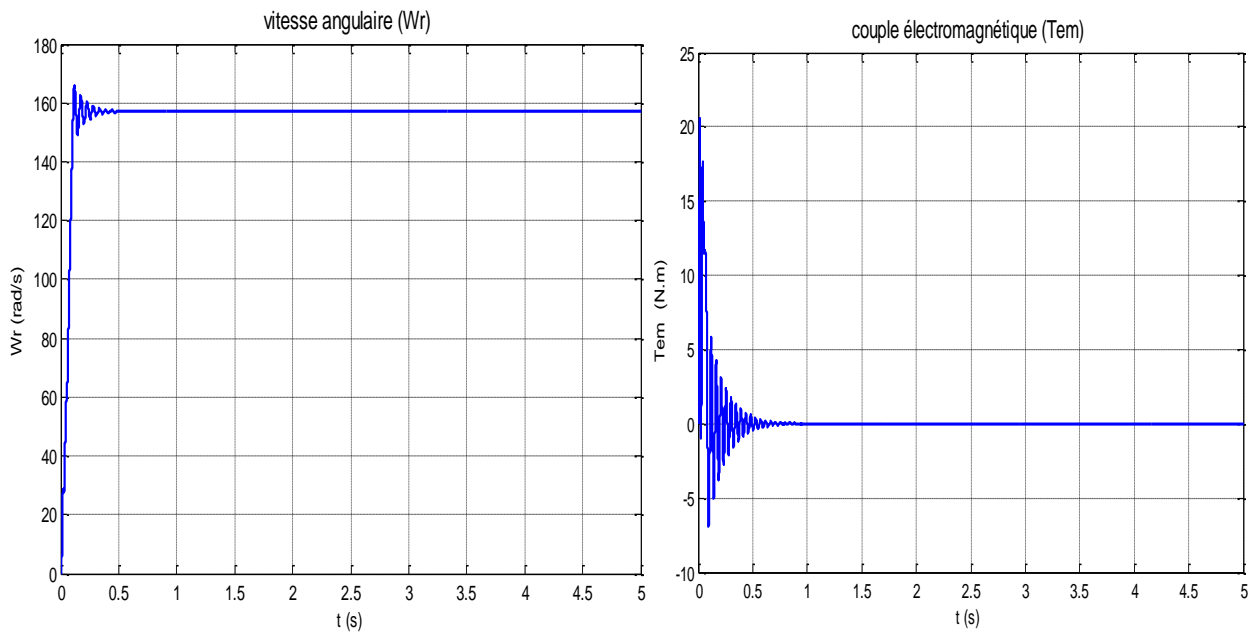


Figure IV.7 vitesse de rotation, couple électromagnétique

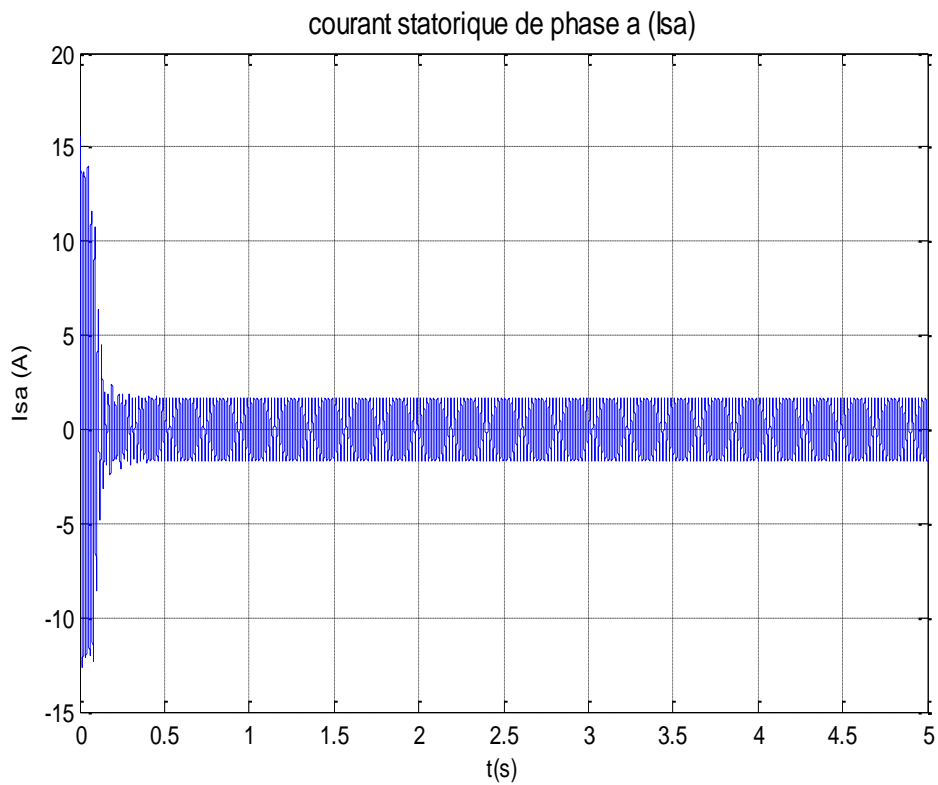


Fig.IV.8 courant statorique

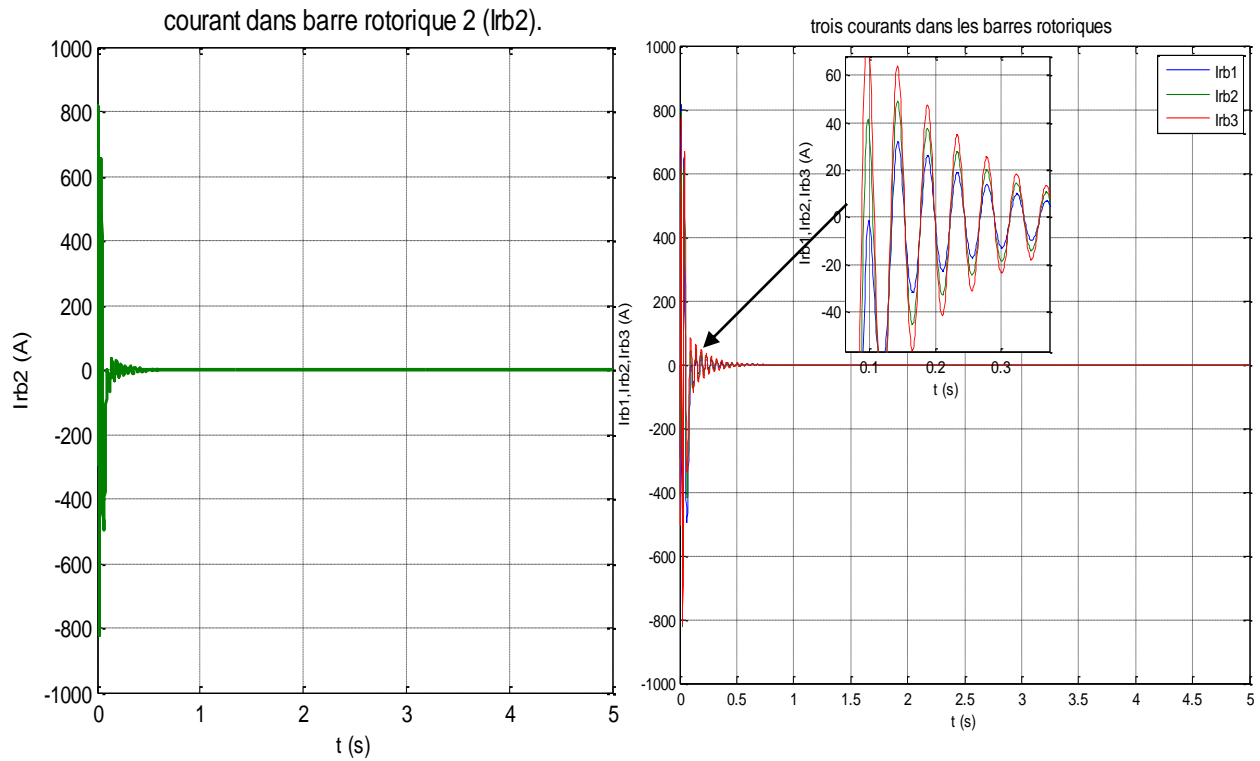
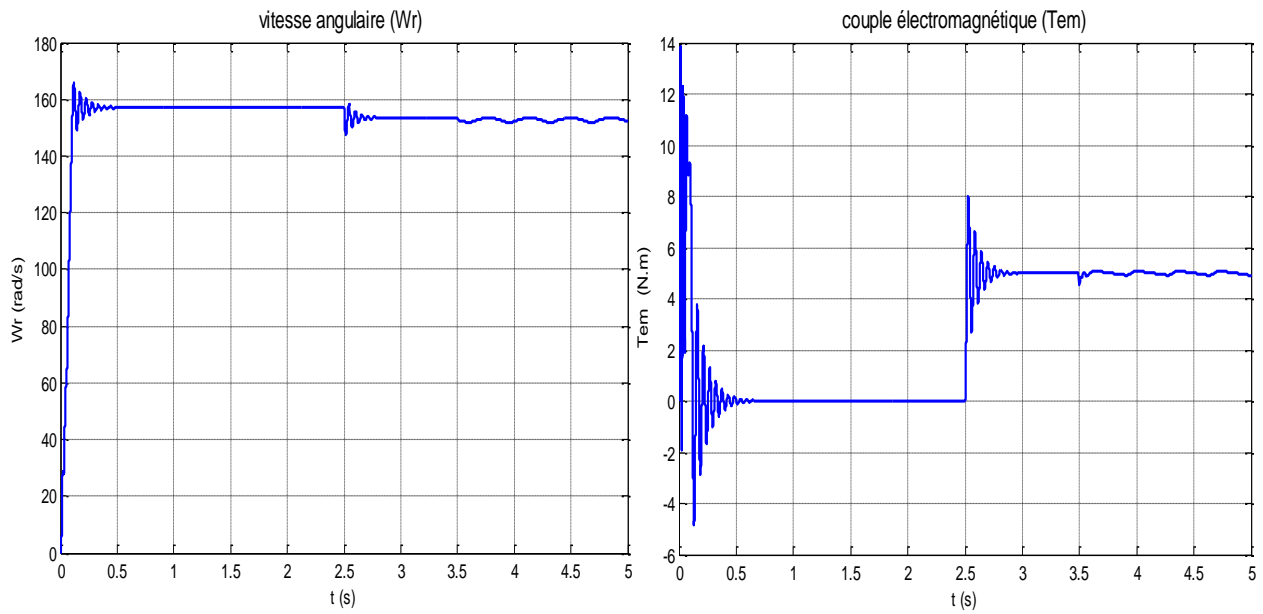


Fig.IV.9 : courants dans les barres rotoriques I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3}

A partir de cette étape la simulation de la machine sera faite avec présence de défaut. On injecte le défaut (cassure) au niveau du rotor à travers la variation de la valeur de résistance pour un des trois barreaux. Les résultats présentés illustrent l'influence de cette injection sur les courbes des variables d'état de la machine. On constate que l'apparition de défaut ne change pas les performances de la machine dans le cas où elle est sans charge (à vide).

IV.1.3.2 Machine en charge :



FigIV.10 : vitesse de rotation, couple électromagnétique

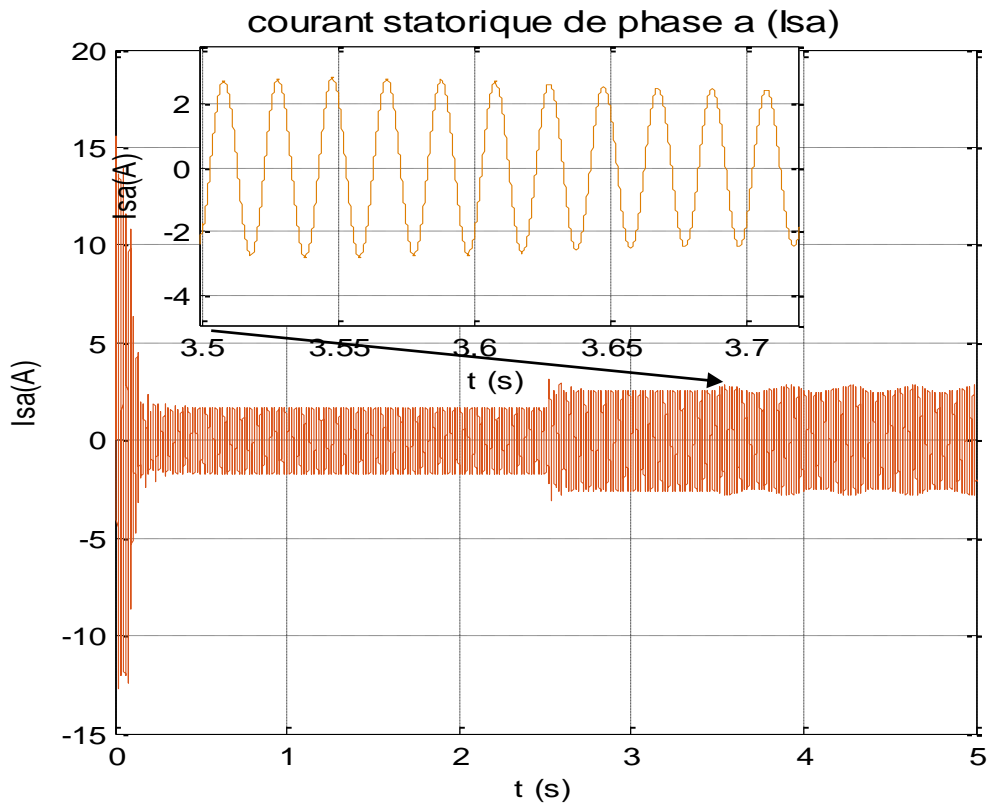
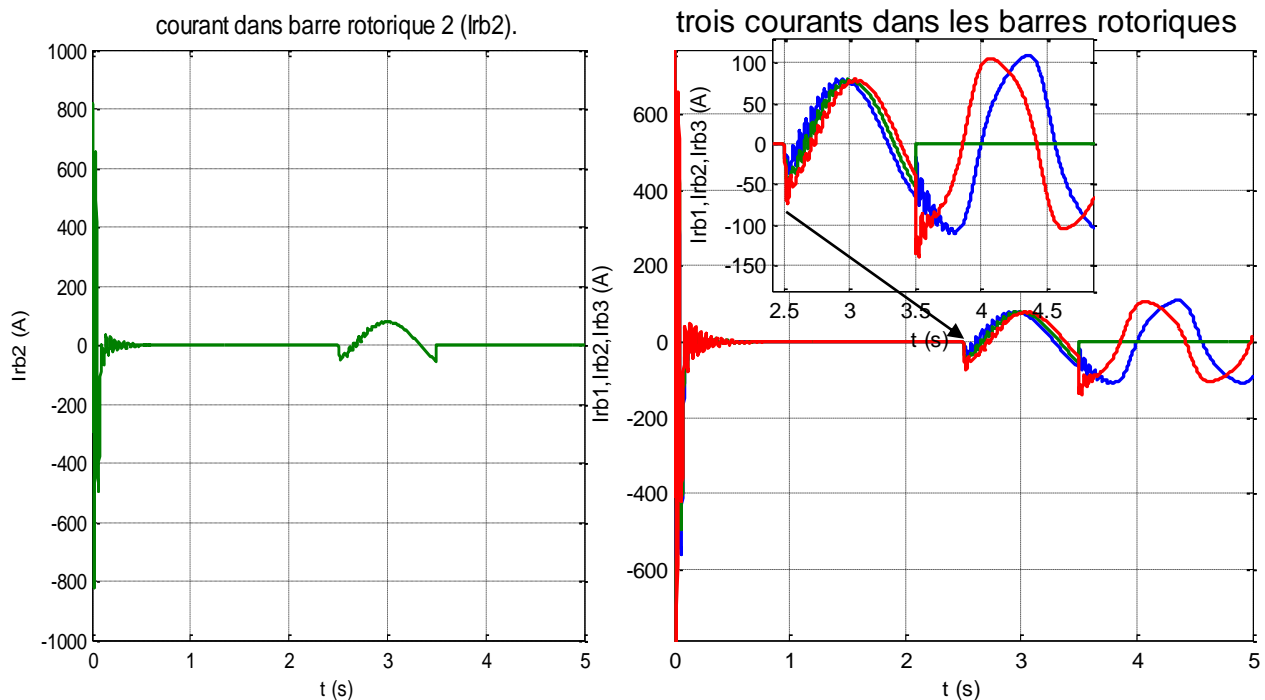


Fig IV.11 : courant statorique



figIV.12 : courants dans les barres rotoriques I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3}

les figures (IV.10), (IV.11) illustrent En présence du couple résistant de la charge, l'influence de l'apparition de défaut sur les courbes des variables d'état de la machine est claire. Par la suite le fonctionnement de la machine est infecté. Sur la courbe de la vitesse de rotation on constate la présence des ondulations. Par conséquent la courbe du couple électromagnétique produit par la machine porte elle aussi des ondulation après l'injection de défaut (cassure d'une barre de cage d'écureuil). Pour ce qui concerne le courant statorique on remarque la présence de ces ondulations. Dans la figure (IV.12) qui illustre l'évolution temporelle des courants rotoriques avant et après l'injection du défaut. On constate que l'apparition du défaut annule la circulation du courant a travers la barre sujet de la cassure, par contre on remarque bien que les courants traversent les barres adjacentes s'augmentent car elles compensent le rôle du barre cassé. Avec le temps cette augmentation induite un échauffement et peut causer des autres défaillances (propagation des défauts).

IV.1.4 Application du filtre de Kalman Étendu a la machine asynchrone :

IV.1.4.1 Cas d'une machine saine en charge :

Afin de détecter l'apparition de défaut, on ajoute un filtre qui est considéré comme un sous-système, ce filtre a comme rôle d'estimer les variables d'état non mesurables en espace de Concordia. Ce filtre est un estimateur de Kalman étendu. Il nous permet de reconstruire le vecteur d'état de la machine. Par comparaison entre le vecteur d'état de la machine et la sortie de l'observateur, on remarque bien que l'estimation des courants statoriques (figures(IV.13), (IV.14)) converge vers les valeurs mesurées en absence et en présence du couple résistant appliqué par la charge sur l'arbre de la machine. Cette estimation coïncide avec la valeur réelle. Pour les variables d'état non mesurables (les flux) (figures(IV.15)(IV.16)) montre que l'estimation délivrée par l'estimateur représente bien les grandeurs réelles de la machine après la phase de convergence malgré l'application du couple résistant sur l'arbre de la machine.

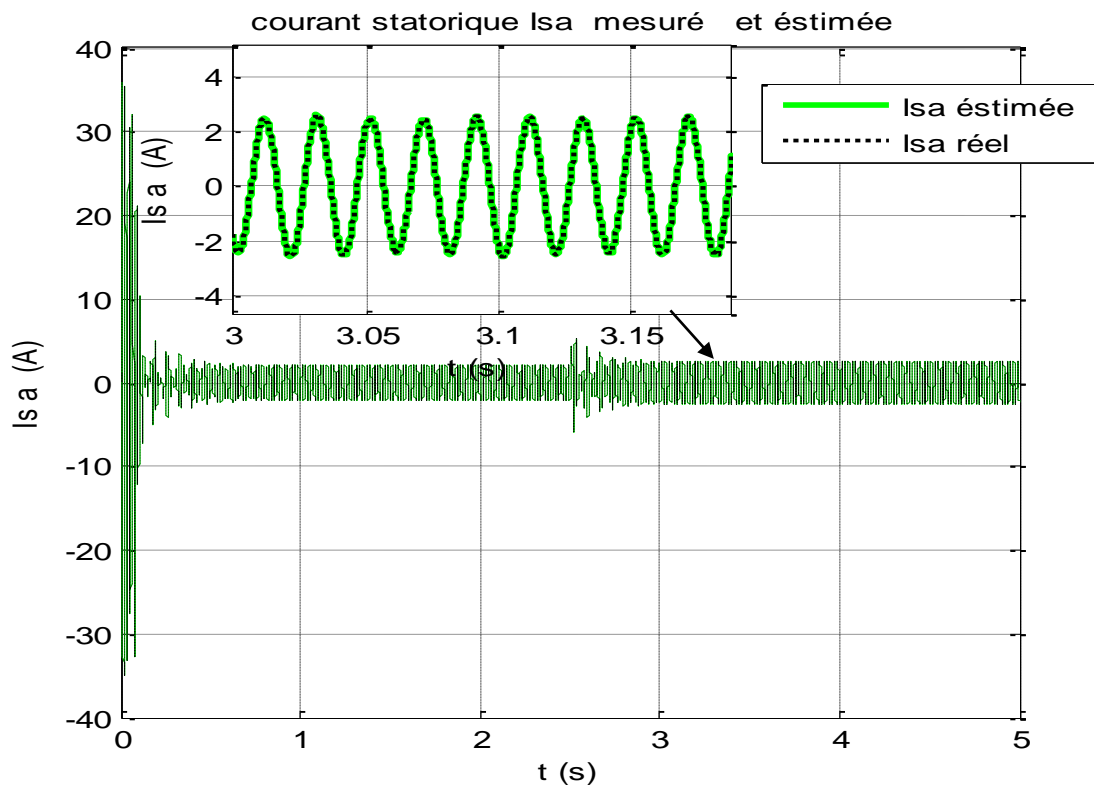


Fig. IV.13 : courant statorique I_{sa} mesuré et estimé

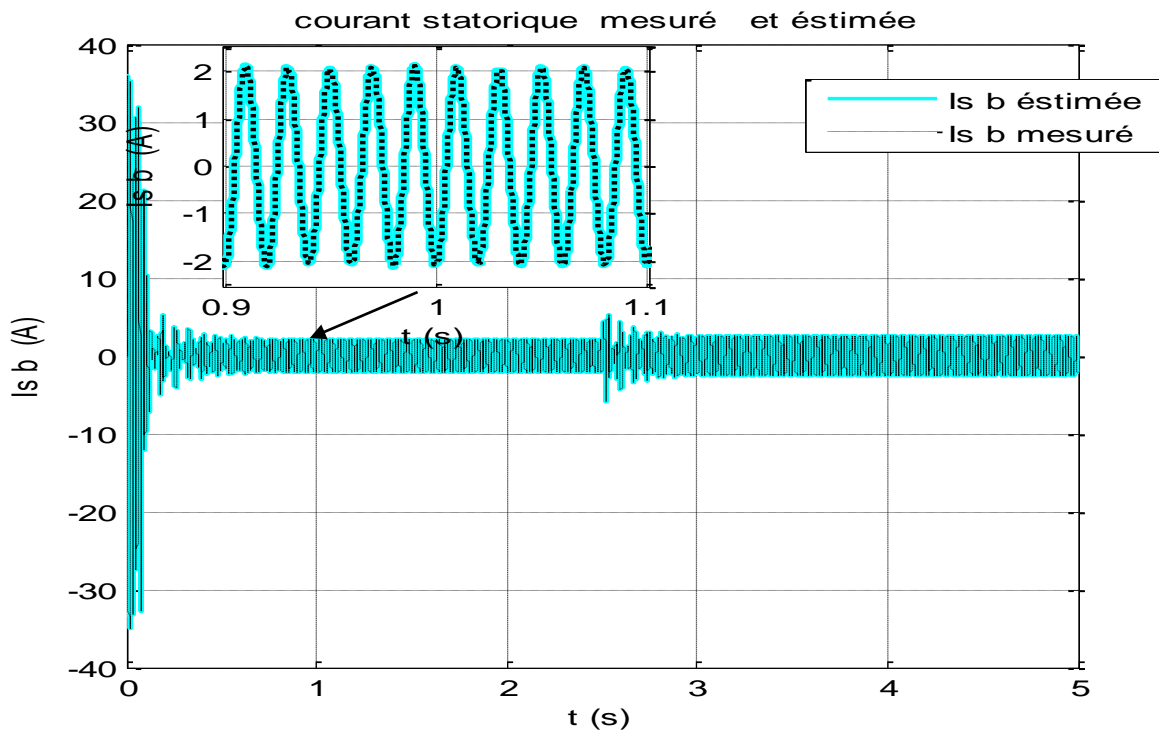


Fig. IV.14 : courant statorique I_{sb} mesuré et estimée

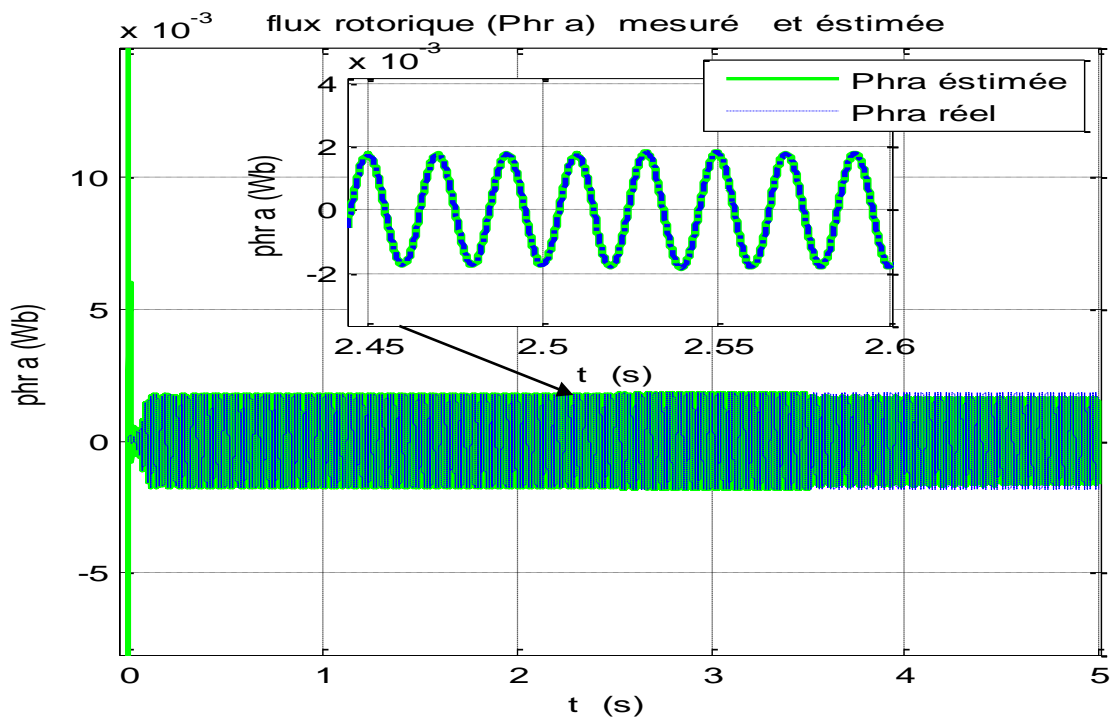


Fig. IV.15: flux rotorique ϕ_{ra} mesuré et estimée

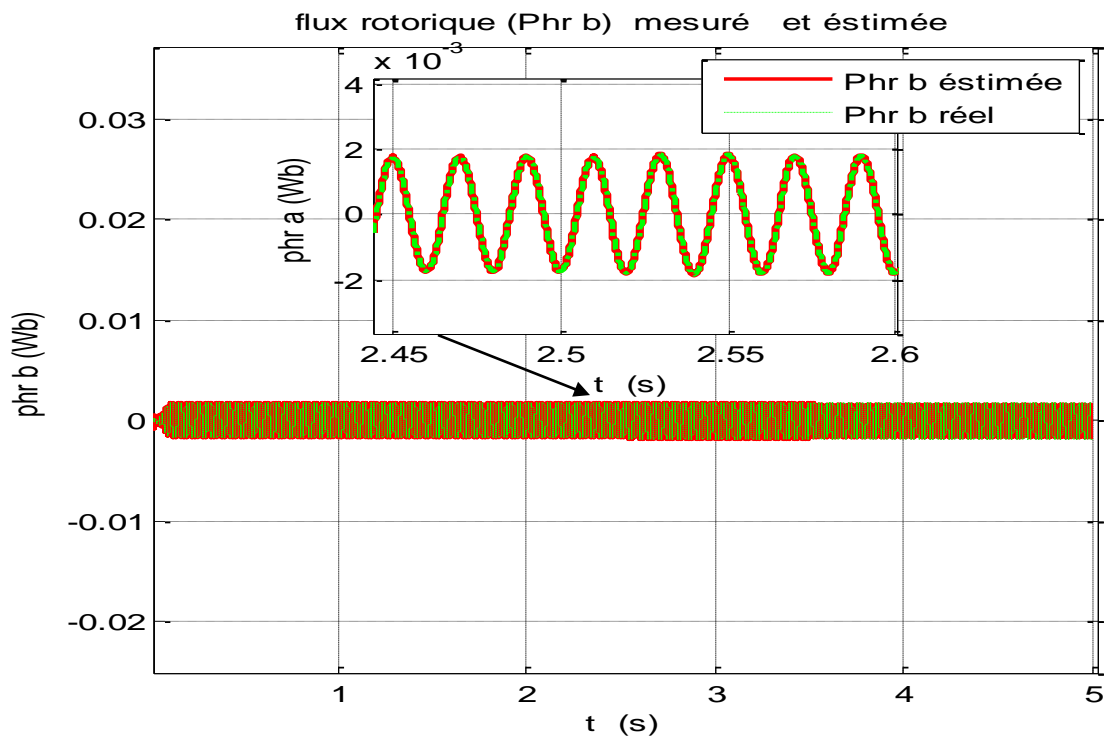


Fig. IV.16: flux rotorique $\phi_{r\beta}$ mesuré et estimée

IV.1.4.2. Cas d'une machine en charge avec défaut :

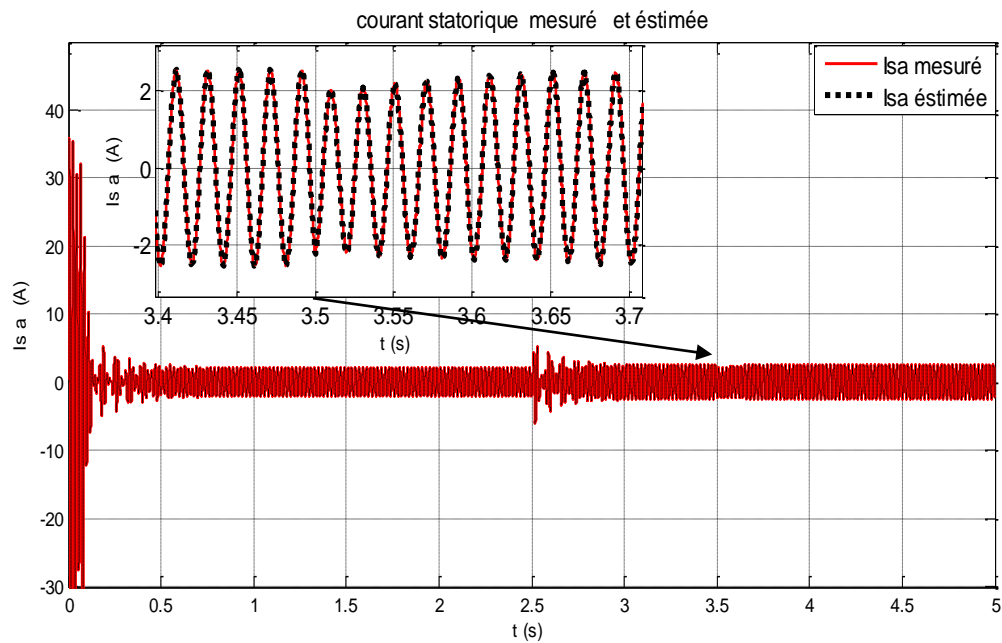


Fig. IV.17 : courant statorique $I_{s\alpha}$ mesuré et estimée

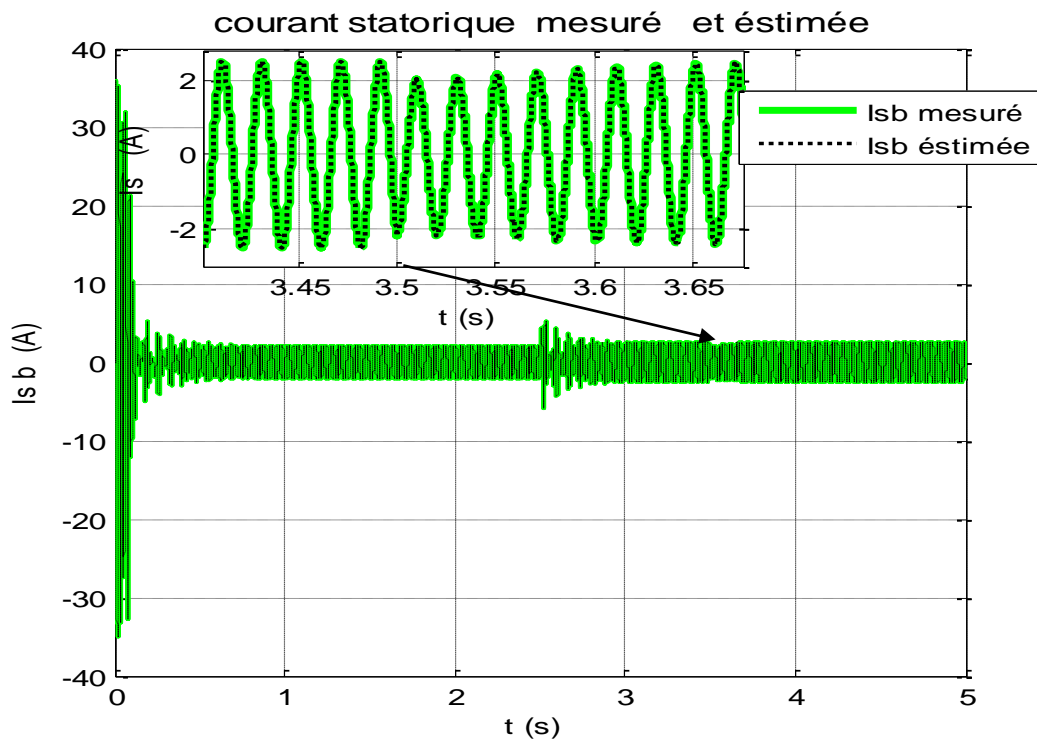


Fig. IV.18 : courant statorique I_{sb} mesuré et estimée

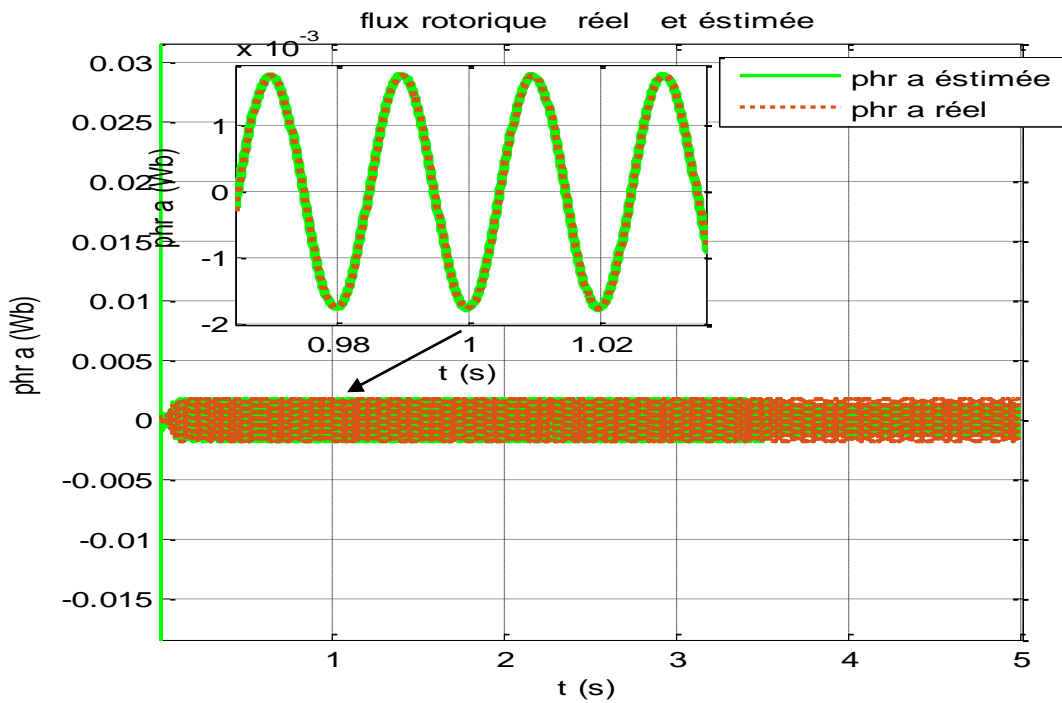


Fig. IV.19: flux rotorique ϕ_{ra} mesuré et estimée

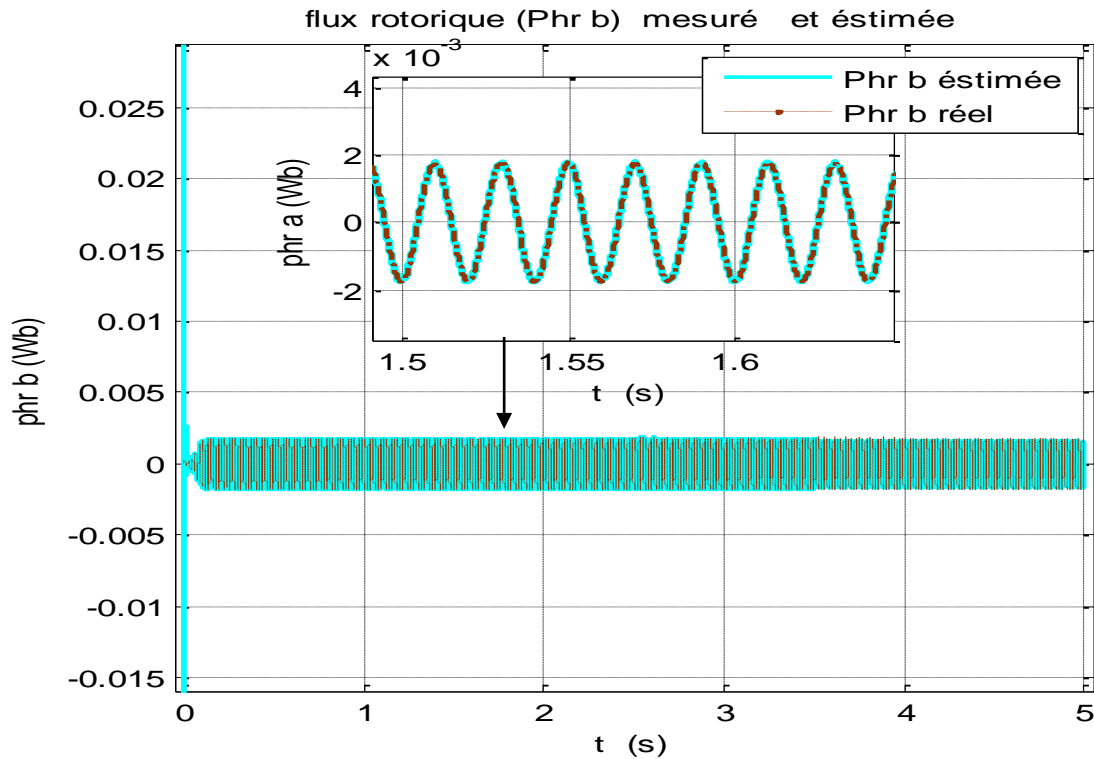


Fig. IV.20: flux rotorique $\phi_{r\beta}$ mesuré et estimée

Les figures (VI.17) (VI.18) (VI.19) (VI.20) présente les courants statorique ainsi que les flux de la machine avant l'apparition du défaut (changement de la valeur de la résistance rotorique à cause de la cassure de la barre) et après cette apparition. Les figures illustres la déstabilisation des courants et des flux durant une période du temps et le retour à la stabilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail consiste à diagnostiquer le défaut rotorique (cassure de barre) de la machine asynchrone à cage à l'aide d'un observateur basé sur le modèle biphasé. La modélisation de Concordia s'avère suffisante dans le cas d'une machine en situation de défauts. Cette modélisation plus fine de la machine nous a permis d'analyser de manière plus proche de la pratique, l'impact des défauts sur le comportement de la machine.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté de manière générale la construction de la machine asynchrone à cage ainsi que les différents défauts qui peuvent altérer le fonctionnement ce type de machine. Nous avons cité des défauts qui se produisent au niveau du stator par exemple (court circuit, circuit ouvert), et des défauts rotoriques par exemple (cassures de barres rotoriques et cassures d'anneaux) ainsi que des défauts mécaniques (extremité). Nous avons également présenté les signatures des défauts de la machine asynchrone sur les paramètres et les grandeurs mesurables. Ce qui nous a permis d'avoir une idée précise sur les signatures des défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation triphasé multi enroulements d'une machine asynchrone à cage ainsi que la modélisation dans le repère de Concordia et en fin de ce chapitre les on a présenté ces équations sous forme espace d'état, la simulation sera faire dans le dernière chapitre.

Dans le chapitre trois, nous avons utilisé l'estimateur des grandeurs internes (en cas de défauts et en absence de défaut) pour la machine asynchrone. Cet estimateur basé sur le filtre de Kalman, convient bien le système étudié mais dans son version étendu car le modèle de la machine est non linéaire. Nous avons linéarisé ce système. la simulation sera faite dans le dernière chapitre.

Dans le dernière chapitre: nous avons fait toutes les simulations des cas présentés dans le chapitre deux et trois ainsi que les interprétations sur ces résultats.

En conclusion, on peut dire que ce travail nous a permis de dire que le filtre de Kalman est un bon estimateur par qu'il a permit l'estimation d'état de la machine asynchrone à cage .et très meilleur estimation après le comparaison faire entre le signal de machine et signal estimé parce que il prend comme considération le bruit de mesure et le bruit d'état de système mais le grand problème (inconvenient) de ce filtre c'est initialisation des matrices de covariance P,Q ,R.

Annexe

ANNEXE A. MACHINE ASYNCHRONE

Paramètres de la machine asynchrone :

Les paramètres de la machine utilisés dans les simulations sont :

Puissance nominale : $P = 2.23\text{kW}$

Tension nominale : $U = 220/380\text{ V}$

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

Vitesse nominale : $n_r = 1420\text{ tr/min}$

Résistance statorique : $R_s = 9.8\ \Omega$

Résistance rotorique : $R_r = 1.608 \cdot 10^{-5}\ \Omega$

Inductance cyclique du stator : $L_s = 0.5847\text{ H}$

Inductance cyclique du rotor : $L_r = 1.238 \cdot 10^{-6}\text{ H}$

Inductance mutuelle cyclique : $L_m = 8.478 \cdot 10^{-5}\text{ H}$

Nombre de paires de pôles : $p = 1$

Moment d'inertie : $J = 0.005\text{ Kg.m}^2$

Couple résistant nominal : $C_{\text{chn}} = 15\text{ N.m}$

Coefficient de frottement : $f_e = 0.0005\text{ Kg.m}^2/\text{s}$

Nombre de barres $N_b = 28$

Nombre de spires par phase statorique : $N_s = 116$

Résistance d'une portion d'anneau : $r_e = 8.75 \cdot 10^{-7}\ \Omega$

Résistance d'une barre rotorique : $r_b = 61 \cdot 10^{-6}\ \Omega$

Inductance de fuite d'une barre : $l_b = 5.16 \cdot 10^{-6}\text{ H}$

Inductance de fuite d'une portion d'anneau : $l_e = 1.59 \cdot 10^{-9}\text{ H}$

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

Longueur utile de la machine : $l = 54 \cdot 10^{-3}$

Rayon moyen de la machine : $r = 45 \cdot 10^{-3}$

Epaisseur de l'entrefer : $e = 0.38 \cdot 10^{-3}$

Angle entre deux barres rotoriques adjacentes : $\alpha = 0.004$
