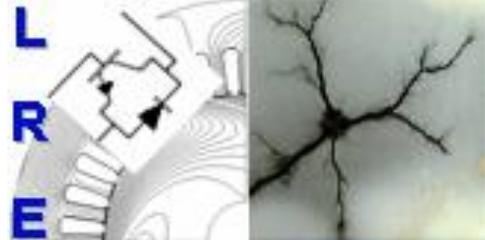


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'ELECTROTECHNIQUE**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'  
**Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

Intitulé

**Diagnostic de défauts d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par un transformateur pentaphasé asymétrique**

Présenté par

**Chaouki DJABELLAOUI et Walid HASNIOU**

Sous la direction de **Pr. O. TOUHAMI**

Soutenu publiquement le 26 juin 2019

**Membres du Jury**

Président :

R. IBTIOUEN, Professeur à l'ENP

Rapporteur :

O. TOUHAMI, Professeur à l'ENP

Examineur :

K. BOUGHRARA, Professeur à l'ENP

M. DJEBLI, Doctorant à l'ENP

**ENP 2019**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie



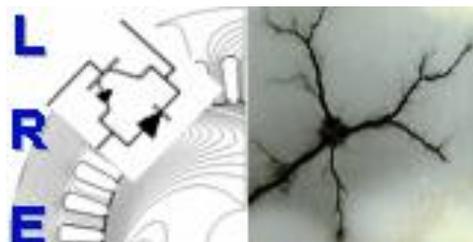
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Département d'ELECTROTECHNIQUE**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'  
**Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

Intitulé

**Diagnostic de défauts d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par un transformateur pentaphasé asymétrique**

Présenté par

**Chaouki DJABELLAOUI et Walid HASNIOU**

Sous la direction de **Pr. O. TOUHAMI**  
soutenu publiquement le 26 juin 2019

**Membres du Jury**

Président :	R. IBTIOUEN, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	O. TOUHAMI, Professeur à l'ENP
Examineur :	K. BOUGHRARA, Professeur à l'ENP
	M. DJEBLI, Doctorant à l'ENP

**ENP 2019**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

---

*Dédicace*

---

*Je dédie ce modeste travail.*

*A ma mère avec toute mon affection.*

*A mon père avec toute ma reconnaissance.*

*A mes frères et ma sœur.*

*Une dédicace spéciale à mon amie Bouchra ABDELRAHMAN*

*A tout ma famille.*

*A tous mes amis.*

A tous mes collègues spécialement Mehdi Djami, AbdelhakHamidou CHOUIT et Amine DJATI

***Chaouki***

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon projet ainsi je le dédie à :*

*Celle qui m'a élevé, m'a nourrit, m'a bien éduqué, ma **Mère**, celui qui m'a toujours soutenu et aidé dans toute ma vie mon **Père**.*

*A mon frère Nassim et ma sœur Amina Turkiya.*

*A mon grand-père Amar BOUGAA et mes grands-mères Khadra TOUMI et Zineb HASNIOU.*

*A la famille BOUGAA spécialement mes oncles Nabil, Djamel, Mourad et Nouredine*

*Et mes tantes Assia, Yasmina et Nacera*

*Une grande dédicace à mon oncle Fares qui m'a soutenu le long de mon parcours*

*A mes amis et frères Abdelmoumene CHOUDAR, Amir GUERNAH, Nabil ALOUANI et Essaid ALOUANI*

*Une dédicace spéciale à mon amie Rosa MEGRES*

*A tous mes amis et mes collègues sans exceptions.*

**Walid**

---

## *Remerciement*

---

*Le travail de recherche développé dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche en Electrotechnique de l'Ecole Nationale polytechnique.*

*Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donné tout au long de notre étude.*

*Nous remercions très sincèrement Monsieur le Professeur Omar TOUHAMI notre promoteur de ce travail, pour ces conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestion a grandement facilité ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à Monsieur Abdelhakim KHELAFI et Abdelmalek DJEBLI doctorants à l'école nationale polytechnique pour leurs aide et leurs conseille tout le long de ce travail*

*Nous exprimons notre remerciements à Monsieur le professeur Rachid IBTIOUEN pour avoir accepté de présider le jury.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur le professeur Kamel BOUGHRARA et Monsieur Abdelmalek DJEBLI, pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Merci à tous ceux qui ont rendu possible ce travail.*

## الملخص

يعتمد هذا العمل على دراسة سلوك الأجهزة غير المتزامنة خماسية الطور وموثوقيتها عند مواجهة عيوب في الجزء الثابت. من المعروف جيداً أن الآلات متعددة الأطوار حيث يكون عدد الأطوار أكبر من 3. قابلة لأكثر تطور لأنها تتمتع بمزايا من حيث عزم الدوران، شدة تيار الطور منخفضة، وكفاءة أعلى بكثير من تلك الموجودة في المحركات ثلاثية الطور. يبدأ الموضوع من خلال إيجاد نموذج مناسب للمحرك المتاح بقوة 7.5 كيلو وات وتحديد المعلمات الكهربائية والميكانيكية للأخيرة والتي يتم استخدامها في المحاكاة للتحقق من صحتها. يتناول الموضوع أيضاً التحليل الطيفي للنتائج التجريبية مع وبدون عيوب لدراسة التوافقية التي تؤثر على النظام.

كلمات جامعة: آلة خماسية الطور، التوافقيات، المعلمات الكهربائية والميكانيكية للآلة، التحليل الطيفي.

## Abstract

This work is based on the study of the behavior of five phase asynchronous machines and their reliability, when faced with stator defects. It is well known that poly-phase machines, where the number of phases  $m$  is greater than 3, are called upon to the greatest development because they have advantages in terms of torque, lower phase current, and much higher efficiency than those of the three-phase machine. . This subject starts by the development of a model that is suitable for the machine of 7.5Kw available and the determination of its electrical and mechanical parameters, which are used after in a simulation to validate it. The subject also addresses a spectral analysis of the experimental results with and without defects to study the harmonic, which affects the system the most.

Key words: five phase machine, harmonics, electrical and mechanical parameters of the machine, spectral analysis.

## Résumé

Ce travail est basé sur l'étude du comportement des machines asynchrones pentaphasées et leurs fiabilités quand confrontée à des défauts statoriques. On sait bien que les machines polyphasées, telles que le nombre de phases  $m$  soit supérieur à 3, sont appelées au plus grand développement, car elles présentent des avantages, en termes de couple, courant de phase moins important, et rendement bien supérieurs à ceux de la machine triphasée. Le sujet est entamé par l'élaboration d'un modèle qui convient à la machine de 7.5Kw disponible et la détermination des paramètres électriques et mécaniques de cette dernière qui sont amené après à être utilisé dans une simulation pour validé le tout. Le sujet aborde aussi une analyse spectrale des résultats expérimentaux avec et sans défaut pour étudier les harmonique qui impacte le plus le système.

Mots Clés : machine pentaphasée, les harmoniques, paramètres électriques et mécaniques de la machine, analyse spectrale.

## Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles utilisés

Introduction Générale ..... 15

### **I. Chapitre 1 Généralités Sur la Machine asynchrone pentaphasée et son fonctionnement avec défauts**

I.1 Introduction..... 17

I.2 Constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil ..... 17

I.2.1 Caractéristiques des machines polyphasées ..... 18

I.2.2 Domaines d'application des machines polyphasées ..... 18

I.2.3 Choix de la machine pentaphasée ..... 18

I.2.4 Classification des défauts au niveau de la Machine Asynchrone ..... 20

I.2.5 Méthodes de diagnostics utilisés pour détecter les défauts ..... 23

I.2.6 Surveillance par estimation paramétrique ..... 24

I.3 Conclusion ..... 25

### **II. Chapitre 2 Étude expérimentale sur la machine asynchrone pentaphasée**

II.1 Introduction..... 27

II.2 Différents types de couplage d'un moteur asynchrone polyphasé ..... 27

II.2.1 Couplage étoile ..... 28

II.2.2 Couplage pentagone ..... 35

II.2.3 Couplage pentacle ..... 43

II.3 Conclusion ..... 47

### **III. Chapitre 3 Simulation du fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée avec et sans défauts**

III.1 Introduction..... 49

III.2 Identification paramétrique d'une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil. 49

III.3 Modèle général de la machine asynchrone pentaphasée ..... 55

III.3.1 Équations en tension au stator et au rotor ..... 55

III.3.2	3.2.1. Équations de flux au stator et au rotor .....	56
III.3.3	3.2.2 Équation mécanique.....	57
III.4	Modèle de la machine asynchrone pentaphasée dans le repère (d, q) .....	57
III.4.1	Transformation de Park .....	58
III.5	Simulation du système transformateur pentaphasé-machine asynchrone pentaphasée...	61
III.6	Conclusion .....	66
	Conclusion Générale .....	67
	Références Bibliographiques .....	68

---

*Liste des tableaux*

---

**Chapitre 2**

Tableau1 : Détermination des différents couplages pour machine polyphasée.....27

**Chapitre 3**

Tableau 1 : courants et tensions continus .....50

Tableau 2.a : résultats de l'essai à vide pour la première séquence .....51

Tableau 2.b : résultats de l'essai à vide la troisième séquence.....51

Tableau 3.a : résultats de l'essai à rotor bloqué pour la première séquence ..... 52

Tableau 3.b : résultats de l'essai à rotor bloqué pour la troisième séquence.....53

Tableau 4.a : résultats des paramètres électriques de la machine asynchrone pour la première séquence.....53

Tableau 4.b : résultats des paramètres électriques de la machine asynchrone pour la troisième séquence.....53

### **Chapitres 1**

Fig.1.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	17
Fig.1.2 Différentes configurations d'enroulements pour une machine électrique pentaphasée. ..	19
Fig.1.3 Caractéristiques Couple-Vitesse pour différents couplages des enroulements statoriques d'une machine électrique pentaphasée.....	20

### **Chapitres 2**

Fig.2.1 couplage étoile de la machine pentaphasée.....	28
Fig.2.2.a Courants statoriques phase (a) et (b) et (c) pour un fonctionnement de la machine saine.....	28
Fig.2.2.b Vitesse en tr/min pour un fonctionnement de la machine saine.....	29
Fig.2.3.a Courants statoriques de démarrage des phases (a) et (b) et (c) (fonctionnement avec une phase ouverte).....	29
Fig.2.3.b Vitesse de rotation de la machine en tr/min lors du démarrage avec une phase Ouvert.	30
Fig.2.4.a Courants statoriques phase (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture d'une phase).....	30
Fig.2.4.b Harmoniques de courants avant et après défaut d'ouverture d'une phase au stator .....	31
Fig.2.5.a Courants statorique phase (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture de deux phases) .....	31
Fig.2.5.b Tracé des harmoniques de courants statoriques avant et après ouverture de deux phases.....	32
Fig.2.6.a Couplage du transformateur avec le stator pour injection de 3 <sup>ème</sup> harmonique.. .....	33
Fig.2.6.b Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c).....	33

Fig.2.6.c Vitesse en tr/min pour une machine alimentée par un système en troisième harmonique.....	34
Fig.2.7 couplage pentagone de la machine pentaphasée.....	35
Fig.2.8.a Courant statorique des phases (a) et (b) et (c) au démarrage et en régime permanent...	35
Fig.2.8.b Vitesse de rotation en tr /min lors de la machine.....	36
Fig.2.9.a Les courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au démarrage avec défaut d'ouverture d'une phase.....	36
Fig.2.9.b Vitesse en tr/min de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase statorique.....	37
Fig.2.10.a Courants des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase statorique.....	37
Fig.2.10.b Spectre de raies du courant stator avant et après défaut.....	38
Fig.2.11.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture de deux phases.....	38
Fig.2.11.b Spectre de raies en courant avant et après défaut au stator.....	39
Fig.2.12.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment de l'ajout de la charge...	39
Fig.2.12.b Vitesse en tr/min au moment de l'ajout de la charge.....	40
Fig.2.13.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase statorique.....	40
Fig.2.13.b Spectre de raies du courant stator avant et après défaut.....	41
Fig.2.14.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture de deux phases).....	41
Fig.2.14.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture de deux phases.....	42
Fig.2.15 Couplage pentacle du stator de la machine asynchrone pentaphasée.....	43

Fig.2.16.a. Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) lors du démarrage de la machine saine.....	43
Fig.2.16.b. Vitesse de rotation de la machine en tr/min lors du démarrage.....	44
Fig.2.17.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au démarrage avec défaut d'ouverture d'une phase.....	44
Fig.2.17.b Vitesse de rotation de la machine en tr /min avec défaut d'ouverture d'une phase.....	45
Fig.2.18.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase au stator.....	45
Fig.2.18.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture d'une phase au stator.....	46
Fig.2.19.a Courants statorique des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture de deux phases.....	46
Fig.2.19.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture de deux phases au stator.....	47

### **Chapitres 3**

Fig.3.1 Schéma équivalent en régime permanent pour la séquence "k".....	50
Fig.3.2 Schéma équivalent en tenant compte du courant rotorique négligeable.....	51
Fig.3.3 Schéma équivalent de la machine asynchrone lors du test à rotor bloqué.....	52
Fig.3.4 Temps d'arrêt de la machine après avoir coupé l'alimentation (14.25s).....	54
Fig.3.5 représentation du modèle.....	59
Fig.3.6 Schéma de la simulation du modèle de la machine asynchrone à cage pentaphasée .....	61
Fig.3.7 Vitesse rotorique en tour/min en fonctionnement à vide.....	62
Fig.3.8 Les courants statoriques simulés à vide.....	63

Fig.3.9 Vitesse rotorique (tour/min) pour un fonctionnement en charge.....	63
Fig.3.10 Courants statoriques simulés en charge.....	64
Fig.3.11 Vitesse rotorique en tour/min au démarrage (ouverture d'une phase).....	65
Fig.3.12 Courants statoriques simulés au démarrage (ouverture d'une phase).....	65
Fig.3.13 Vitesse rotorique en tour/min en régime permanent (après ouverture d'une phase).....	66
Fig.3.14 Courants statoriques simulés en régime permanent (avec ouverture d'une phase).....	66

---

*Liste des symboles utilisés*

---

$Z$  : Nombre total d'encoches au stator

$P$  : Nombre de paires de pôles

$m$  : Nombre de phases statoriques

$q$  : Nombre d'encoches par pôle et par phase

$a, b, c, d, e$  : Indices des phases statoriques

$N_s$  : Nombre de spires en série par phase.

$\delta$  : Largeur de l'entrefer

$I_a, I_b, I_c, I_d, I_e$  : Courants d'un système pentaphasé direct équilibré.

$\alpha$  : Angle de position sur la périphérie du stator [rad électrique]

$\Psi$  : Flux Magnétique

$\Psi_s, \Psi_r$  : Flux Magnétiques statorique et rotorique

$R_s, R_r$  : Résistances statorique et rotorique.

$L_s, L_r$  : Inductance propre statorique et rotorique

$L_{ls}$  : Inductance propre statorique

$L_{s1}$  : Inductance fondamentale de phase.

$L_{s3}$  : Inductance du 3<sup>ème</sup> harmonique de phase.

$Z_0$  : Impédance à vide

$Z_{cc}$  : Impédance à rotor bloqué

$X_s, X_r$  : Réactances statorique et rotorique.

$X_m$  : Réactance magnétisante.

$L_s$  : Inductance cyclique de l'enroulement statorique.

$L_r$  : Inductance cyclique de l'enroulement rotorique.

$[V_s]$  : Vecteur des tensions statoriques dans la base naturelle.

$[I_s]$  : Vecteur des courants statoriques dans la base naturelle

$[I_r]$  : Vecteur des courants rotoriques dans la base naturelle

$[\Psi_s]$  : Flux statoriques dans la base naturelle.

$[\Psi_r]$  : Flux rotoriques dans la base naturelle.

$[R_s]$  : Matrice résistance statorique

$[R_r]$  : Matrice résistance rotorique

[ $L_{ss}$ ] : Matrice inductance statorique.

[ $L_{rr}$ ] : Matrice inductance rotorique.

[ $M_{sr}$ ] : Matrice inductance mutuelle rotor-stator

[ $M_{rs}$ ] : Matrice inductance mutuelle stator-rotor

$M$ : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$L_m$ : Inductance magnétisante.

$\theta$ : Angle de rotation rotorique respectant les axes de référence

$C_{em}$ : Couple électromagnétique

$C_r$ : Couple résistant

$\Omega$  : Vitesse de rotation mécanique du rotor en (rad/s)

$J$  : Moment d'inertie de l'ensemble tournant

$f_r$  : Coefficient de frottement

$T_m$  : Constante du temps mécanique

[ $F_{abcde}$ ] : Vecteur de la base naturelle.

[ $F_{dq1dq3}$ ] : Vecteur de la base de découplage

[ $T(\theta)$ ] : Matrice de transformation à la base de découplage

[ $V_{sdq1}$ ] : Vecteur des tensions statoriques dans la base de découplage pour le fondamentale.

[ $V_{sdq3}$ ] : Vecteur des tensions statoriques dans la base de découplage pour le 3<sup>ème</sup> harmonique.

[ $I_{sdq1}$ ] : Vecteur des courants dans la base de découplage.

[ $I_{sdq3}$ ] : Vecteur des courants dans la base de découplage.

[ $V_{rdq}$ ] : Vecteur des tensions rotoriques dans la base de découplage

[ $I_{rdq}$ ] : Vecteur des courants rotoriques dans la base de découplage

[ $\Psi_{sdq1}$ ] : Flux statoriques dans la base de découplage pour le fondamentale.

[ $\Psi_{sdq3}$ ] : Flux statoriques dans la base de découplage pour le 3<sup>ème</sup> harmonique.

[ $\Psi_{rdq}$ ] : Flux rotoriques dans la base de découplage.

$\omega_e$  : Vitesse angulaire statorique

$\omega_r$  : Vitesse angulaire liée au champ tournant

Les moteurs à courant alternatif (synchrones, asynchrones, à reluctance variable, etc.) ne présentent pas de limitations par rapport à la machine à courant continu. Ils sont robustes, fiables de moindre coût et peuvent supporter de très fortes puissances et de très hautes vitesses. Cependant, il faut les alimenter avec des convertisseurs statiques à tension et fréquence variables pour pouvoir envisager leur entraînement électrique à vitesse variable.

Les machines polyphasées ont été reconnues ces dernières années comme une meilleure alternative aux machines triphasées conventionnelles. Cela est principalement dû à :

- leur utilisation dans un domaine d'application donné avec une réduction de la puissance totale par phase,
- la possibilité d'utiliser la machine polyphasée avec défauts au stator ou au rotor.

La traction électrique, la propulsion navale, l'aérospatiale ou encore les systèmes de production d'énergie éolienne sont des exemples d'applications réelles mises à jour utilisant plusieurs machines polyphasées. Ils peuvent également profiter de la possibilité de poursuivre le fonctionnement dans des conditions de défauts. Parmi les machines polyphasées, celles pentaphasées sont probablement les machines les plus fréquemment considérées dans les recherches actuelles.

Le diagnostic de défauts des machines électriques est relativement développé, aujourd'hui, dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une simple défaillance peut mener à un dommage matériel et/ou corporel. Pour éviter ces problèmes, les chercheurs s'emploient depuis plusieurs années à élaborer des méthodes de diagnostic et de surveillance des systèmes électriques. Ceux-ci ont pour objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système, [1].

Dans ce mémoire, on se propose d'étudier le diagnostic de défaut de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écurie alimentée par transformateur asymétrique pentaphasé. L'étude est effectuée par l'analyse du comportement de la machine asynchrone pentaphasée avec défaut d'ouverture d'une ou de deux phases. Des résultats expérimentaux contenant l'analyse spectrale sont présentés pour montrer le comportement de l'ensemble du système dans des conditions saines et défectueuses.

Après identification des paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone pentaphasée on effectue une simulation du fonctionnement de la machine saine et avec défauts et on compare les résultats théoriques avec ceux expérimentaux pour valider le modèle proposé.

# **I. Chapitre 1**

**Généralités Sur la Machine asynchrone pentaphasée et son  
fonctionnement avec défauts**

## I.1 Introduction

En raison des avantages potentiels résultant de l'utilisation d'un nombre de phases supérieur à trois dans la transmission, un intérêt est porté aux machines polyphasées. Pour les applications d'entraînement électrique, un système polyphasé peut potentiellement répondre de façon robuste et Co-énergétique. Les moteurs à grand nombre de phases possèdent plusieurs avantages par rapport à ceux conventionnels, à savoir :

- Réduction de l'amplitude du courant de démarrage ;
- Diminution de la fréquence de pulsation du couple ;
- Réduction des courants harmoniques du rotor ;
- Réduction du courant par phase sans augmentation de la tension ;
- Obtention d'une fiabilité plus élevée et d'une puissance accrue dans le même cadre.

Le système polyphasé est susceptible de rester limité aux applications spécialisées exigeant une grande fiabilité, telles que les véhicules électriques / hybrides, applications aérospatiales, navires, la propulsion et les applications à forte puissance où la combinaison de plusieurs dispositifs à semi-conducteurs constitue un des piliers de l'entraînement électrique à vitesse variable. Au cours de ces deux dernières décennies, des recherches sont en cours d'élaboration pour examiner les divers problèmes liés à l'utilisation de la machine polyphasée comme solution de rechange. C'est une alternative potentielle à la machine conventionnelle triphasée [1].

## I.2 Constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil

On se propose de donner quelques précisions sur les éléments de constitution des machines asynchrones. Cette description permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où 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.

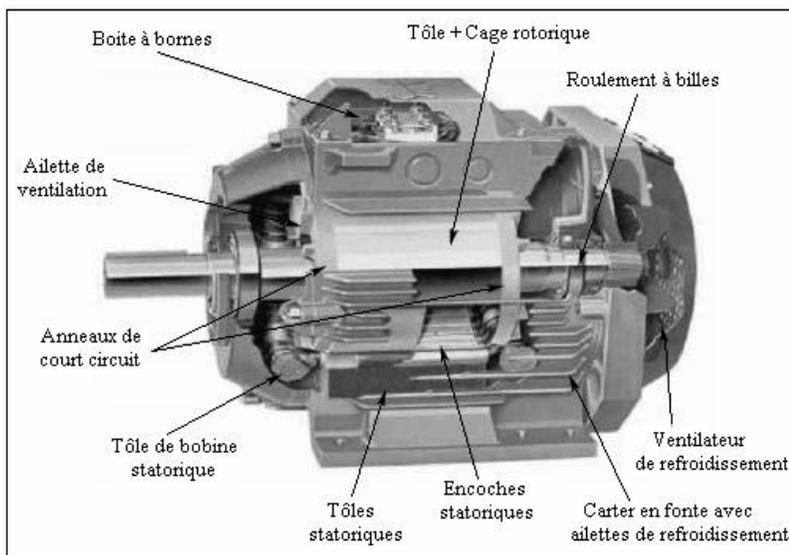


Fig.1.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

### I.2.1 Caractéristiques des machines polyphasées

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator, on distingue deux types de "machines polyphasées", celles dont le nombre de phases est ou non un multiple de trois. De plus, on considère rarement le nombre de phases pair sauf si celui-ci est un multiple de trois [3]. On peut donc les classer en deux groupes, que l'on nommera :

- Machines polyphasées de type 1.
- Machines polyphasées de type 2.

On peut ainsi avoir plusieurs configurations possibles dans une machine asynchrone à nombre donné de phases statoriques suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes. Pour pouvoir différencier entre les configurations possibles, on introduit un autre terme, à savoir : le

nombre de phases équivalent défini comme suit :  $\eta ph_\alpha = \frac{2\pi}{\alpha}$

#### A/ Machines polyphasées de type 1

Dans ce type de machines le nombre de phases statoriques est un multiple de trois.

$$\eta ph = 3\eta \text{ avec } \eta = 1, 2, 3, \dots$$

#### B/ Machines polyphasées de type 2

Les machines polyphasées de type 2 sont des machines dont le nombre de phases statoriques  $\eta ph$  est  $\eta ph = 2\eta + 1$  avec  $\eta = 1, 2, 3, \dots$

Concernant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les phases sont régulièrement décalées de  $\alpha = \frac{2\pi}{\eta ph}$ , [3].

### I.2.2 Domaines d'application des machines polyphasées

Les machines polyphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissance élevée, par exemple : les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications, on cite encore : les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment, etc., [3], [4].

### I.2.3 Choix de la machine pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée est très utilisée aujourd'hui dans les applications industrielles à cause de sa grande robustesse électromagnétique et son faible coût. Les entraînements des machines électriques jouent un rôle important dans plusieurs applications industrielles. Ce qui conduit à des exigences :

- Puissance et couple élevés;
- Capacité de large plage de vitesse opérationnelle ;
- Réponse dynamique rapide;

- Haut rendement sur une large plage de vitesse et conditions de charge variable ;
- Fiabilité et robustesse.

Le stator d'une machine asynchrone pentaphasée peut être connecté en étoile, en pentagone, en pentacle ou encore en étoile/pentagone, Fig.2. Les effets des connexions des enroulements en étoile, pentagone et pentacle sur les caractéristiques couple-vitesse et rendement-vitesse sont discutés dans certains articles [4] [6]. La Figure 3 présente les différents effets du couplage des enroulements statoriques sur la caractéristique couple - vitesse d'une machine électrique à cinq phases [4].

Par contre, pour la connexion combinée étoile / pentagone de machines à induction à cinq phases a récemment été démontrée comme un compromis prometteur entre les connexions conventionnelles étoile et pentagone. Il combine les avantages des connexions en étoile et en pentagone sans aucun matériel supplémentaire pour le changement d'enroulement. Cette connexion est basée sur deux ensembles d'enroulements concentrés à une seule couche à cinq phases décalés dans l'espace de  $\pi / 10$  et connectés dans une configuration combinée étoile / pentagone pour fournir des terminaux à cinq phases. Etant donné que la machine à induction combinée étoile / pentagone est fondamentalement une machine asymétrique à 10 phases, le modèle mathématique de la machine possède des sous-espaces supplémentaires qui affectent le comportement de la machine, notamment dans des conditions d'ouverture de phase.

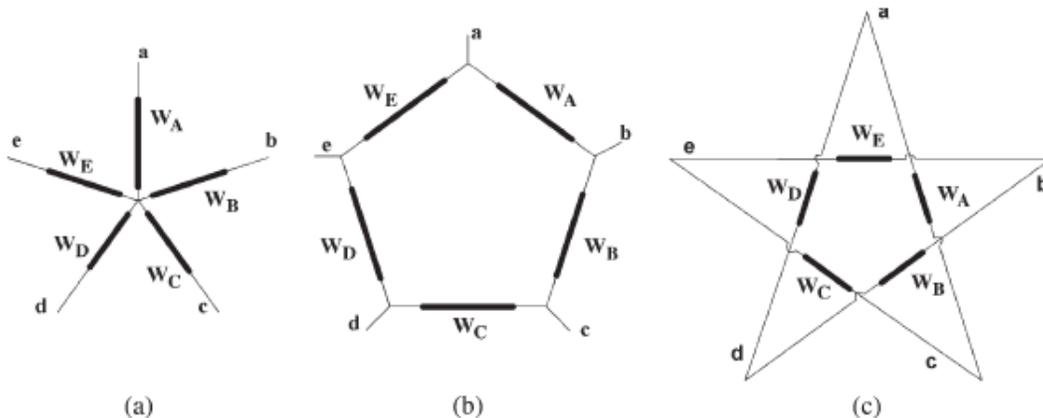


Fig.1.2 Différentes configurations d'enroulements pour une machine électrique pentaphasée  
(a) étoile (b) pentagone (c) pentacle

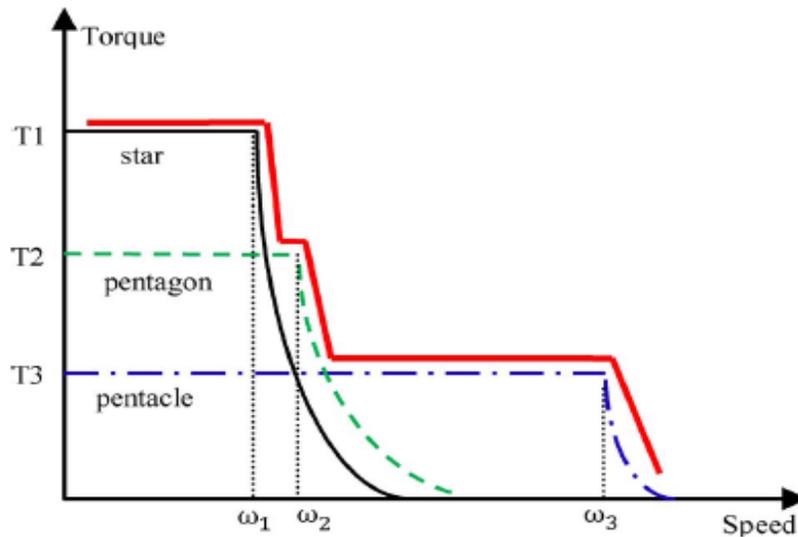


Fig.1.3 Caractéristiques Couple-Vitesse pour différents couplages des enroulements statoriques d'une machine électrique pentaphasée

## I.2.4 Classification des défauts au niveau de la Machine Asynchrone

Les défauts dans les entraînements électriques à vitesse variable se répartissent en deux catégories :

- Les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts électriques stator et rotor, défauts mécaniques roulements et inclinaison de l'axe) et,
- Ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur de la machine électrique (défauts dans la chaîne d'entraînement électrique à vitesse variable)[5].

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter des défauts qui nécessitent leurs diagnostics.

### I.2.4.1 Défauts d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent,[6].

- **Défauts des circuits électriques statoriques**

Les vibrations des conducteurs dans les encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants. Il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal des bobinages. En effet, pour les machines fonctionnant dans des conditions dures, la poussière et l'humidité viennent se déposer, pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobines, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant de fait les conducteurs, [7].

### ***A/ Les courts-circuits internes***

Le court-circuit de spires est donc le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator. Ce sont des pannes dues à un court-circuit dans une ou plusieurs phases statoriques. Ce type de défaut provoque une détérioration de la machine. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui perturbe les commandes développées sur la base du modèle de Park. Un défaut de court-circuit est une connexion directe entre deux points du bobinage. Il peut se manifester soit entre les spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre. On distingue trois types de court-circuit au niveau du stator [8].

#### ***- Court-circuit spire-neutre***

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants. De plus le facteur de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit. Ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée également par le défaut et affecte les autres par couplage magnétique.

#### ***- Court-circuit au milieu de la phase***

Le court-circuit entre spires loin du neutre augmente les courants dans les phases statoriques, dans les barres, et les portions d'anneaux de court-circuit du rotor.

#### ***- Court-circuit entre phases différentes***

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre deux phases conduit à un des courants très forts qui provoque la fusion des conducteurs. Cependant, un court-circuit proche du neutre engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. De plus, les courants des barres sont amplifiés lors de l'apparition du défaut.

#### ***- Les isolations électriques***

Les défauts d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement dû au milieu de fonctionnement hostile ou non, et à la façon dont est alimenté le moteur [9].

#### ***- Décharges partielles***

Ce type de défauts est dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse qui s'amplifie avec l'usure des isolants. Sa présence précède l'apparition de court-circuit entre phases ou entre phases et la masse [9].

- **Défauts des circuits électriques rotoriques**

Le problème des ruptures de barres dans les moteurs asynchrones a été à l'origine des premiers travaux de recherche sur le diagnostic des machines tournantes. L'émergence de nombreux travaux de recherche, notamment ceux des mécaniciens par analyse vibratoire, a contribué à une avancée prometteuse du diagnostic des machines tournantes à vitesse constante. Les défauts rotoriques des machines asynchrones sont dus à un défaut de fabrication, ou à un défaut d'utilisation [7].

On peut citer les principaux :

*A/ Cassures des barres*

Ces défauts apparaissent au niveau du rotor .Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une (des) barre (s) au niveau de la cage d'écureuil. 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.

*B/ Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit*

Les cassures de portion d'anneaux de court-circuit sont dues aux dilatations entre les barres et les anneaux. Les 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 des courants peuvent entraîner leur cassure. La cassure d'une portion d'anneau de court-circuit engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres.

### **I.2.4.2 Défauts d'ordre mécanique**

Les défauts d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrés parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur [10], [11].

*A/ Défauts de roulements à billes*

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix du matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation.

### ***B/ Excentricité***

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés. On retrouve alors ces effets dans le spectre des courants. On distingue généralement trois cas d'excentricité:

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
- l'excentricité mixte, associant les deux cas précédemment cités.

### ***C/ Défauts de l'arbre***

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [12].

## **I.2.5 Méthodes de diagnostics utilisés pour détecter les défauts**

Il est nécessaire d'observer quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une anomalie au sein de la machine asynchrone et notamment pentaphasée.

### ***A/ Approche signal***

Le principe des méthodes d'analyse du signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc., [13]. L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc., ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

### ***B/ Analyse temps-fréquence et temps-échelle***

La non-stationnarité des signaux est une propriété très courante mais difficile à maîtriser. Si nous prenons le cas d'une machine asynchrone, certaines utilisations obligent cette dernière à fonctionner sous des couples de charge variant très souvent dans le temps. C'est pour cette raison que des techniques de traitements temps-fréquence et temps-échelle ont vu le jour, [13] , [14].

### ***C/ Analyse spectrale***

L'analyse spectrale est utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages, [15].

### ***D/ Analyse spectrale à haute résolution***

Ce type d'analyse est utilisé lorsque le nombre d'échantillons du signal est relativement faible (nombre de points compris entre quelque dizaines et quelque centaines).

En effet, pour un nombre de points fixé, les méthodes hautes résolutions permettent d'obtenir une meilleure résolution fréquentielle par rapport à une analyse par transformée de Fourier classique. Notons aussi que les méthodes à haute résolution requièrent des hypothèses sur la nature du bruit et sur le modèle du signal, [12].

### ***E/ Approche modèle***

Ces méthodes reposent sur l'utilisation de modèles du processus à surveiller incluant ou non l'influence des défauts et des perturbations sur l'état de la sortie. La sortie du modèle est comparée aux données accessibles pour former un résidu exploité pour alimenter un mécanisme dédié à la détection des défauts, [16].

## **I.2.6 Surveillance par estimation paramétrique**

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défauts. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé du modèle de connaissance [17].

### I.3 Conclusion

Nous avons présenté les principaux défauts qui peuvent survenir soit dans la phase de fabrication, soit dans celle d'utilisation.

Aussi, nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, s'effectue majoritairement par la surveillance de l'amplitude de composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable, en utilisant la transformée de Fourier rapide (prochain chapitre).

Cependant, il s'avère que lorsque le signal à analyser est non-stationnaire (vitesse rotorique variable), les transformations temps-fréquence et temps-échelle fournissent un outil plus efficace pour la détection des défauts. Même l'approche modèle reste un outil efficace pour le diagnostic des machines asynchrones à cage d'écureuil.

## **II. Chapitre 2**

**Étude expérimentale sur la machine asynchrone pentaphasée**

## II.1 Introduction

On débute la phase expérimentale par le traitement du fonctionnement du moteur asynchrone pentaphasé dans son état sain. Les résultats obtenus seront alors utilisés comme référence pour l'étude des différents types de défauts statoriques pouvant apparaître dans le moteur.

On traitera des défauts par l'ouverture de phases au démarrage et en régime permanent avec différents couplages, à savoir : le couplage étoile, le couplage triangle et le couplage pentacle.

## II.2 Différents types de couplage d'un moteur asynchrone polyphasé

Le couplage des enroulements statoriques permet de faire fonctionner les moteurs asynchrones sous deux tensions. Ce couplage est fonction de la tension du réseau et de la tension que peuvent supporter les enroulements. Il est réalisé par une connexion, à l'aide de fils, sur la plaque à bornes.

Pour trouver le nombre de couplages possibles pour une machine asynchrone à n-phases, Tableau 1, on applique la relation suivante :

$$N_{couplage} = \frac{n+1}{2}, \text{ avec } n \text{ le nombre de phases}$$

Tableau 1 : Détermination des différents couplages pour machine polyphasée

Nombre de phase (n)	$N_{couplage}$	Couplages possibles
Machine asynchrone monophasé (n=1)	1	Monophasé
Machine asynchrone triphasé (n=3)	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couplage étoile</li> <li>• Couplage triangle</li> </ul>
Machine asynchrone pentaphasée (n=5)	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couplage étoile</li> <li>• Couplage pentagone</li> <li>• Couplage pentacle</li> </ul>
Machine asynchrone heptaphasée (n=7)	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couplage étoile</li> <li>• Couplage heptagone</li> <li>• Couplage heptacle</li> <li>• Etc..</li> </ul>

Dans notre cas de figure, les trois couplages possibles que nous allons utiliser dans nos tests expérimentaux, sont les suivants :

- Couplage des enroulements en Etoile
- Couplage des enroulements en Pentagone
- Couplage des enroulements en Pentacle

### II.2.1 Couplage étoile

On réalise une étoile à cinq branches avec les 5 enroulements du moteur, Fig.1. Le point milieu forme ainsi un point neutre artificiel. Chaque enroulement est alimenté sous une tension simple  $V$  (phase-neutre).

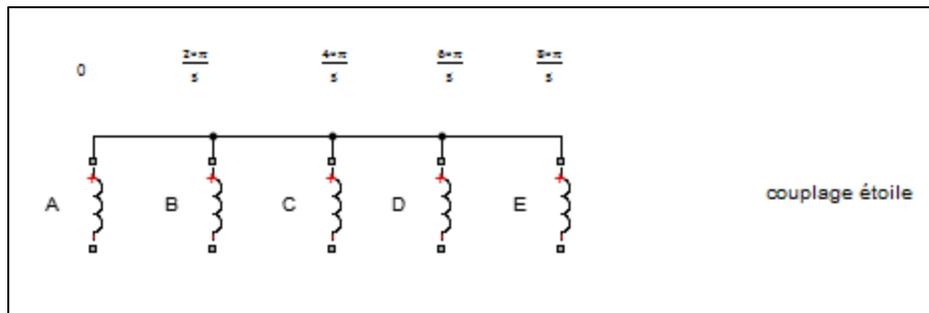


Fig.2.2.1 couplage étoile de la machine pentaphasée

#### - *Fonctionnement de la machine saine*

On démarre nos tests par le fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée en étoile sans défaut. On alimente la machine avec une tension simple pentaphasée  $V = 220V$  jusqu'à atteindre le régime permanent, on relève les signaux expérimentaux, à savoir : les courants statoriques et la vitesse, Figs.2.2.

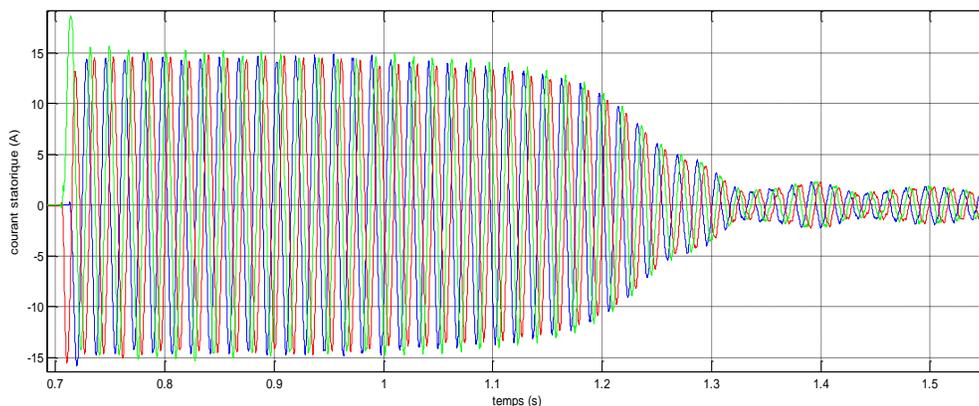


Fig.2.2.a Courants statoriques phase (a) et (b) et (c) pour un fonctionnement de la machine saine

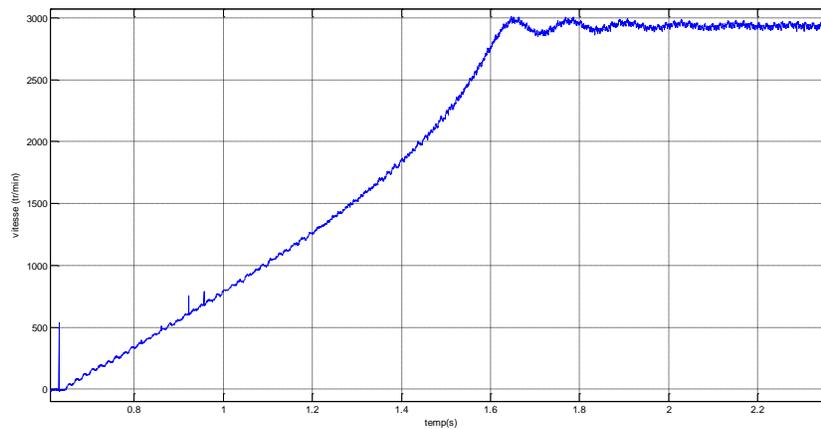


Fig.2.2.b Vitesse en tr/min pour un fonctionnement de la machine saine

Dans le cas du fonctionnement de la machine saine, on remarque qu'après un régime transitoire qui dure 0.7s, la vitesse atteint une valeur maximale de 2975 tr/min et le courant 1.58 A en régime permanent. On note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage qui peut atteindre jusqu'à 7 fois la valeur nominale.

- *Fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée avec défauts statoriques*

Deux types de défauts sont testés. L'ouverture de phases (1 et 2) en régime permanent et le démarrage avec défauts sont des tests exécutés expérimentalement. Il est à remarquer qu'avec ouverture de deux phases, le démarrage de la machine peut s'avérer très dangereux car le courant de démarrage prend des valeurs extrêmement élevées.

- **Démarrage avec une phase ouverte**

On ouvre une phase du stator, la machine est alimentée avec une tension simple nominale  $V=220V$  puis on démarre la machine et on relève les signaux de courants statoriques et la vitesse de la machine Figs.2.3.

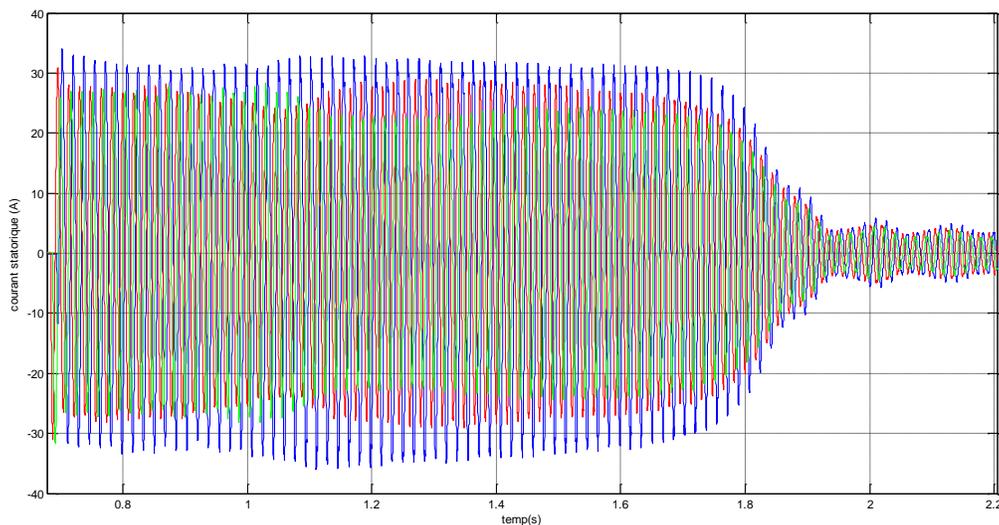


Fig2.3.a Courants statoriques de démarrage des phases (a) et (b) et (c) (fonctionnement avec une phase ouverte)

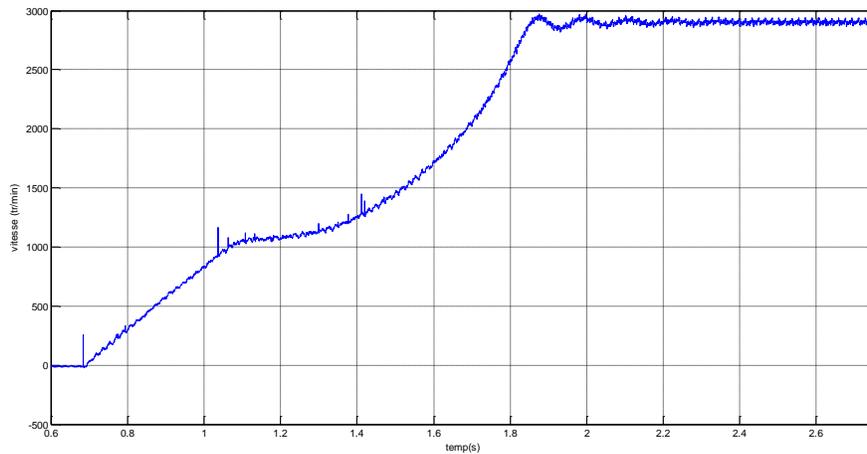


Fig.2.3.b Vitesse de rotation de la machine en tr/min lors du démarrage avec une phase ouverte

Dans le cas d'ouverture d'une phase au stator, le moteur démarre avec un régime transitoire un peu long qui dure 2s avant d'atteindre le régime permanent. Les courants sont déséquilibrés à cause de l'ouverture d'une phase et ont une valeur importante de 30 A avant de converger vers une valeur plus faible de 4 A, Fig.3a. La vitesse atteint également la valeur nominale après 2s, Fig.2.3.b.

- **Ouverture d'une phase après le régime permanent**

On fait fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre une phase, on relève courants statoriques Fig.4a. Lorsque le moteur subit un défaut d'ouverture de phase il apparait clairement une augmentation de l'amplitude du courant dans les autres phases de 3.4 A à 4.6 A (avec une différence d'amplitude entre les phases). La vitesse ne subit pas de changement. Le tracé des harmoniques de courants statoriques montrent une légère diminution de l'harmonique 5 après défaut d'ouverture d'une phase au stator, Fig.2.4.b.

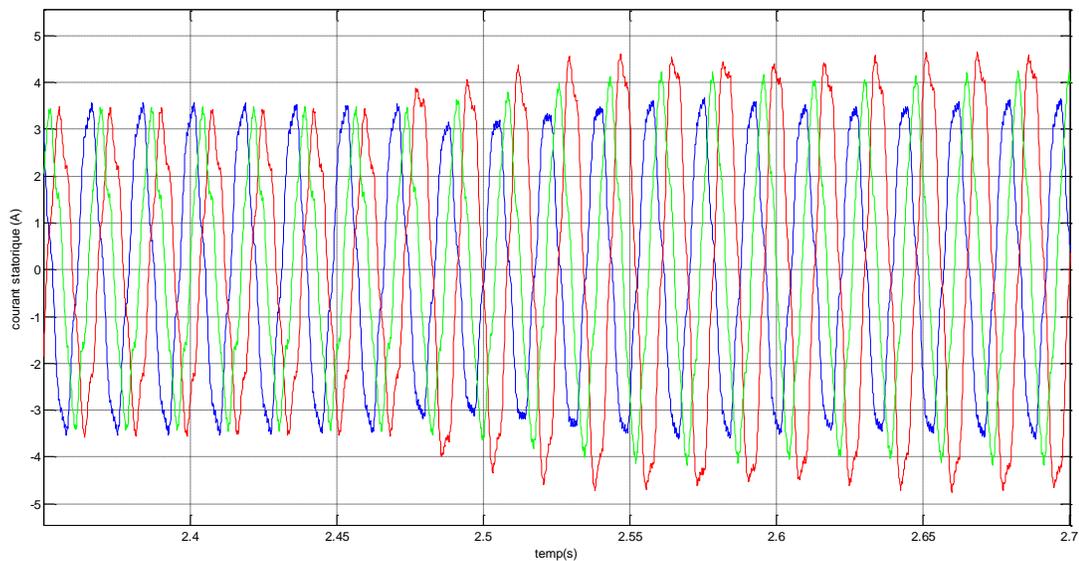


Fig.2.4.a Courants statoriques phase (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture d'une phase)

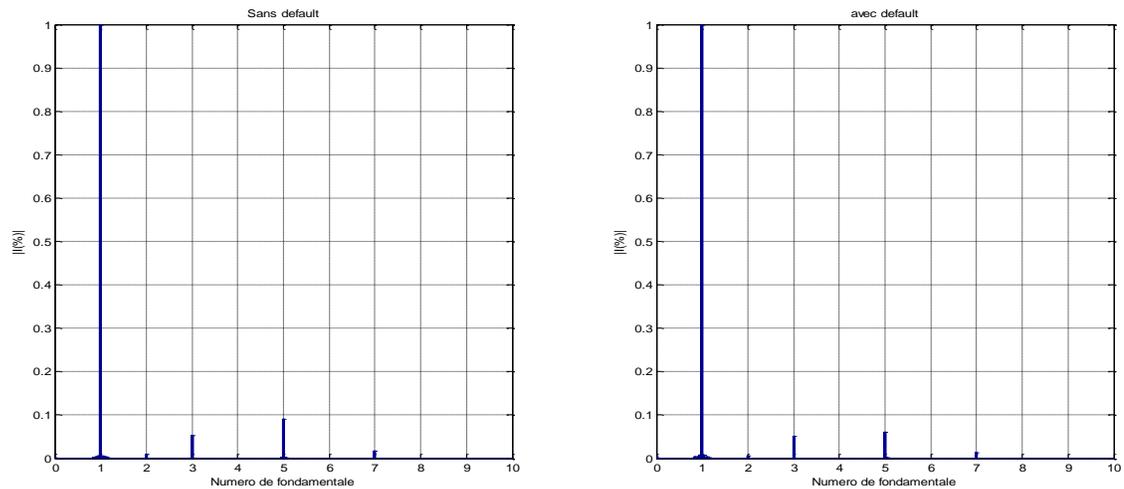


Fig.2.4.b Harmoniques de courants avant et après défaut d'ouverture d'une phase au stator

- **Ouverture de deux phases en régime permanent**

On fait fonctionner la machine jusqu'au régime permanent puis on ouvre deux phases au même temps, on relève les courants statoriques Fig.5a puis on trace les harmoniques de courants Fig.5b.

Dans le cas où le moteur subit un défaut d'ouverture de deux phases au stator, il apparaît une augmentation de l'amplitude du courant mais cette fois plus importante que dans le cas d'une phase ouverte. Le courant augmente jusqu'à 7 A (dans certaines phases). La vitesse ne subit pas de changement notable. Le tracé des harmoniques montre également qu'après ouverture de deux phases l'harmonique 3 disparaît comme dans le cas d'une machine asynchrone triphasée. L'harmonique 5 diminue après défaut d'ouverture de deux phases.

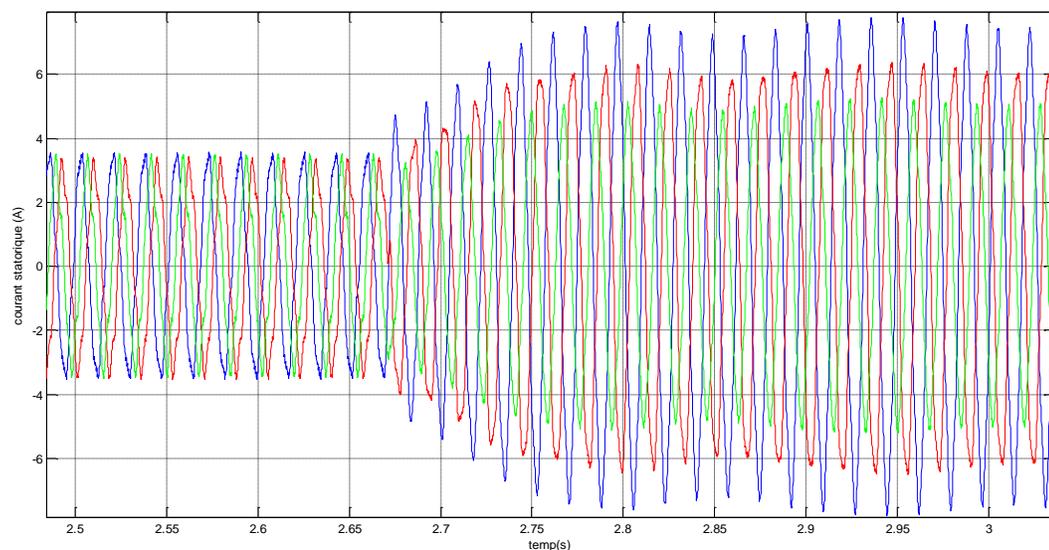


Fig.2.5.a Courants statorique phase (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture de deux phases)

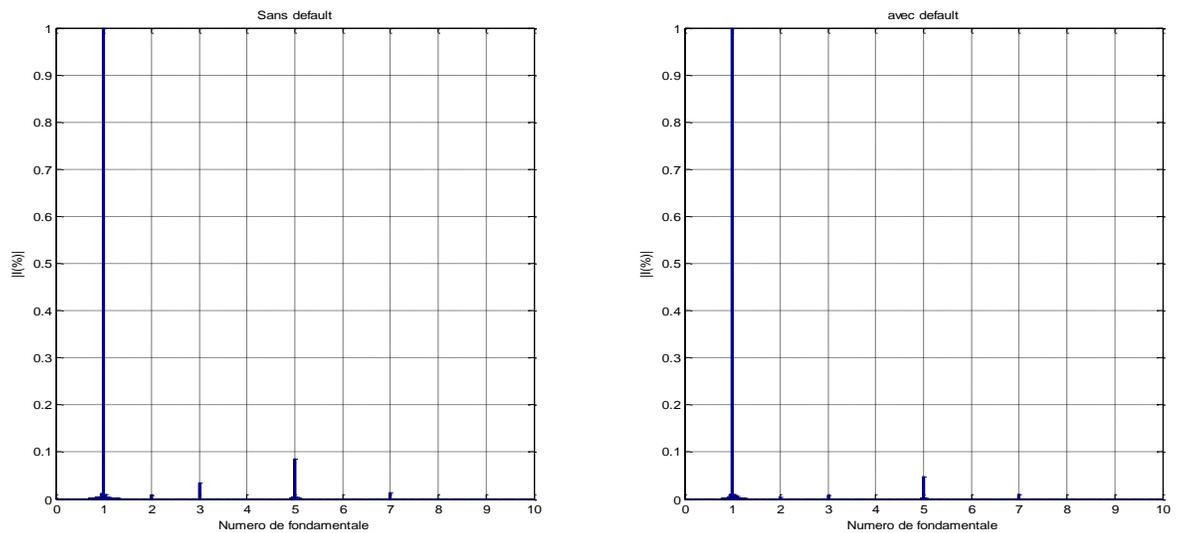


Fig.2.5.b Tracé des harmoniques de courants statoriques avant et après ouverture de deux phases

- **Fonctionnement avec le troisièmeharmonique**

On réalise le montage de la Fig.6a pour l'alimentation de la machine en troisième harmonique avec un transformateur pentaphasée asymétrique. Dans le cas où on fait fonctionner la machine avec une configuration pour l'injection de 3ème harmonique (séquence 3) avec un transformateur, on observe que le régime transitoire est plus lent (4,2s) par rapport à celui du fonctionnement de la machine saine (séquence 1), Fig.2.6.b.

Les courants statoriques ont une valeur de 4A en régime permanent avec un pic de 6A en régime transitoire. La vitesse atteint un maximum de 1000tr/min en régime permanent (puisque l'injection de la troisième séquence devrait être accompagnée d'une augmentation de 3fois la fréquence nominale pour pouvoir fonctionner à 3000 tr/mn, Fig.6c.

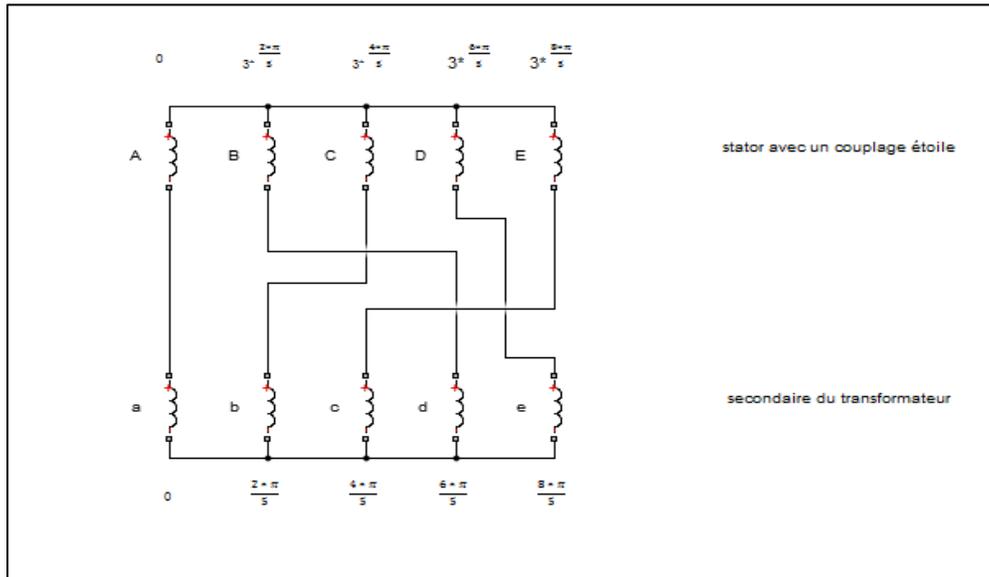


Fig.2.6.a. Couplage du transformateur avec le stator pour injection de 3<sup>ème</sup> harmonique

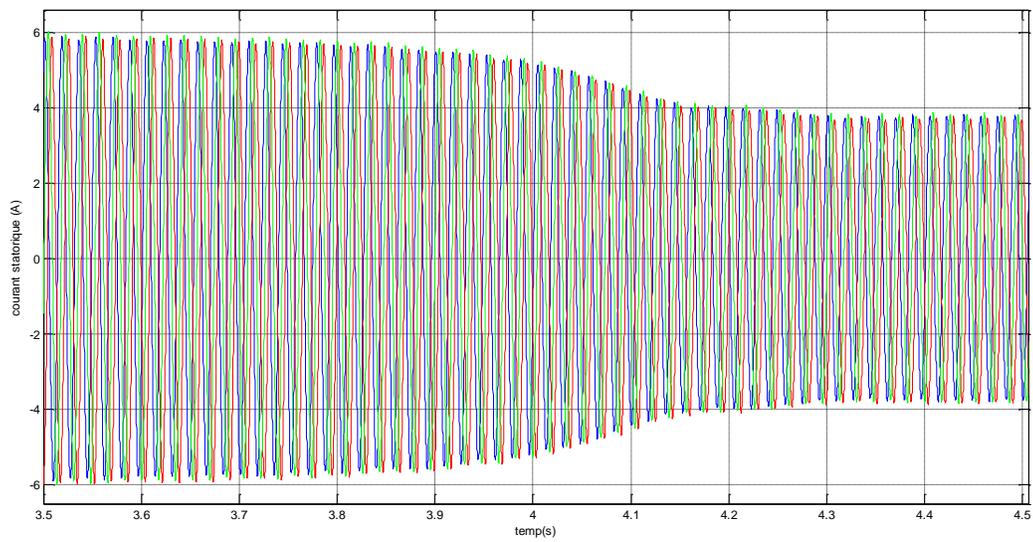


Fig.2.6.b Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c)

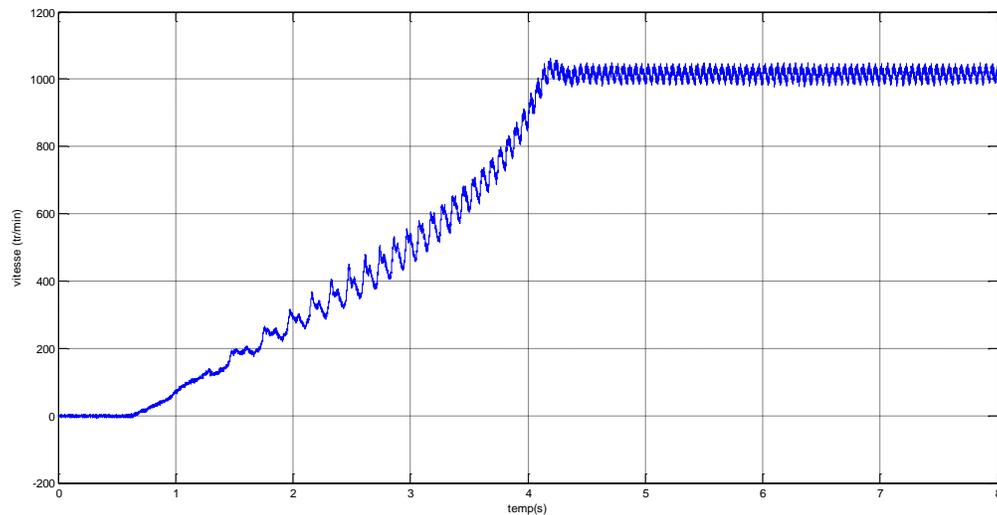


Fig.2.6.c Vitesse en tr/min pour une machine alimentée par un système en troisième harmonique

On observe bien que durant un défaut les courants statoriques ont tendance à augmenter que ce soit dans le cas d'un démarrage ou durant un fonctionnement. On remarque que la phase la plus proche du défaut subit une plus grande variation en amplitude ce qui fait que le défaut a moins d'influence sur la phase la plus éloignée par rapport au défaut.

L'application de l'analyse spectrale sur le signal du courant statorique avec défaut d'ouverture de deux phases au stator montre la disparition de la troisième harmonique vu que le signal tend vers celui d'un système triphasé.

## II.2.2 Couplage pentagone

On réalise un pentagone avec les 5 enroulements statoriques du moteur(Fig.2.7).Chaque enroulement est alimenté sous une tension composée (entre phases).

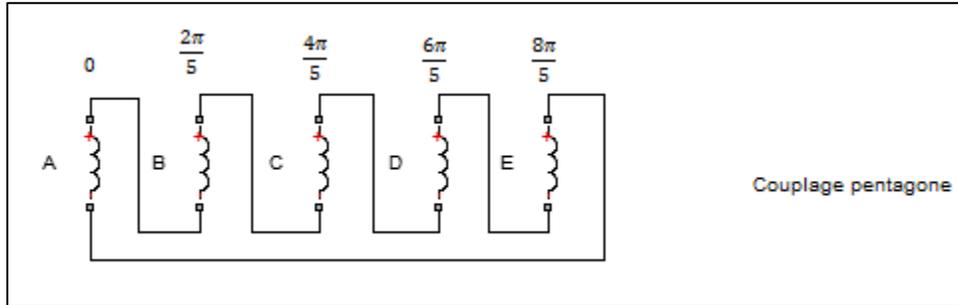


Fig.2.7 couplage pentagone de la machine pentaphasée

- **Fonctionnement de la machine saine**

On alimente la machine saine (sans défaut) avec une tension simple  $V= 220V$  jusqu'à atteindre le régime permanent, puis on relève les signaux de courants statoriques Fig.8a et la vitesse de rotation de la machine Fig.8b : On remarque dans ce couplage que le pic de courant en régime transitoire atteint 21A ce qui dépasse fortement celui du couplage étoile qui est de 15A. Le courant en régime permanent est de 3A. La constante de temps de démarrage est plus grande que celle du couplage étoile. Le temps mis pour atteindre la vitesse de 2975 tr/mn, est de l'ordre d'1 seconde.

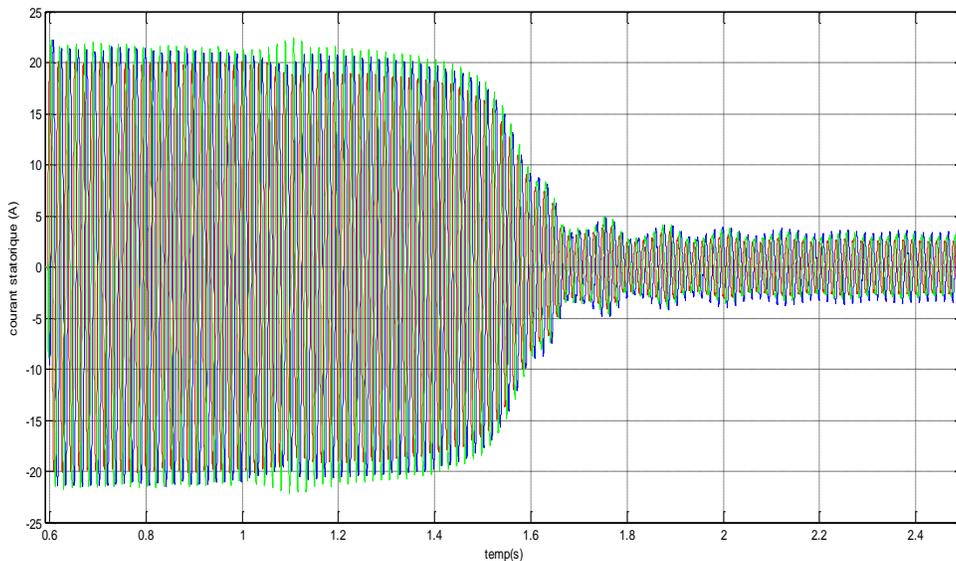


Fig.2.8.a Courant statorique des phases (a) et (b) et (c) au démarrage et en régime permanent

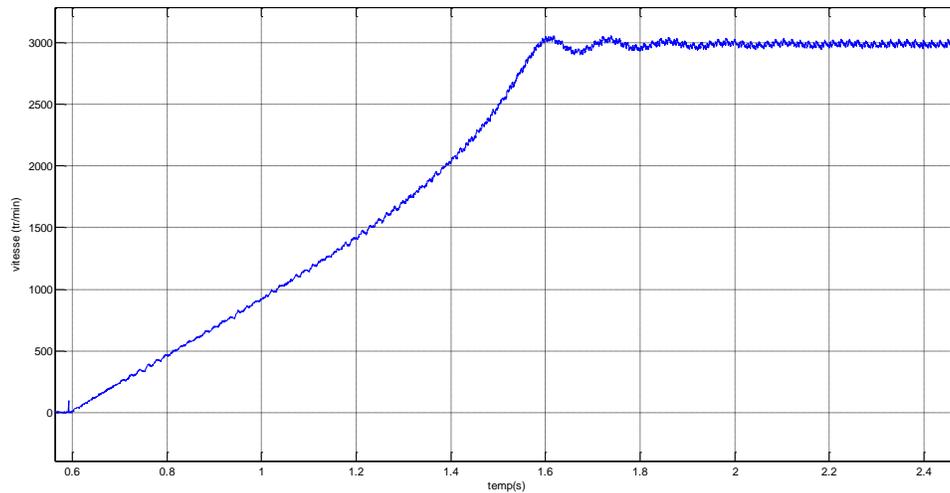


Fig.2.8.b Vitesse de rotation en tr /min lors de la machine

- **Fonctionnement avec défaut statorique**

On effectue un démarrage de la machine avec une phase ouverte. Chaque phase est alimentée avec une tension simple nominale de  $V = 220V$ , on relève les signaux de courants statoriques Fig.2.9.a et de vitesse de la machine Fig.9b. Avec une phase ouverte le courant de démarrage augmente jusqu'à atteindre 25A et 5A en régime permanent. On peut observer que la vitesse atteint 2975Tr/min avec une constante de temps plus importante que celle de la vitesse de la machine saine.

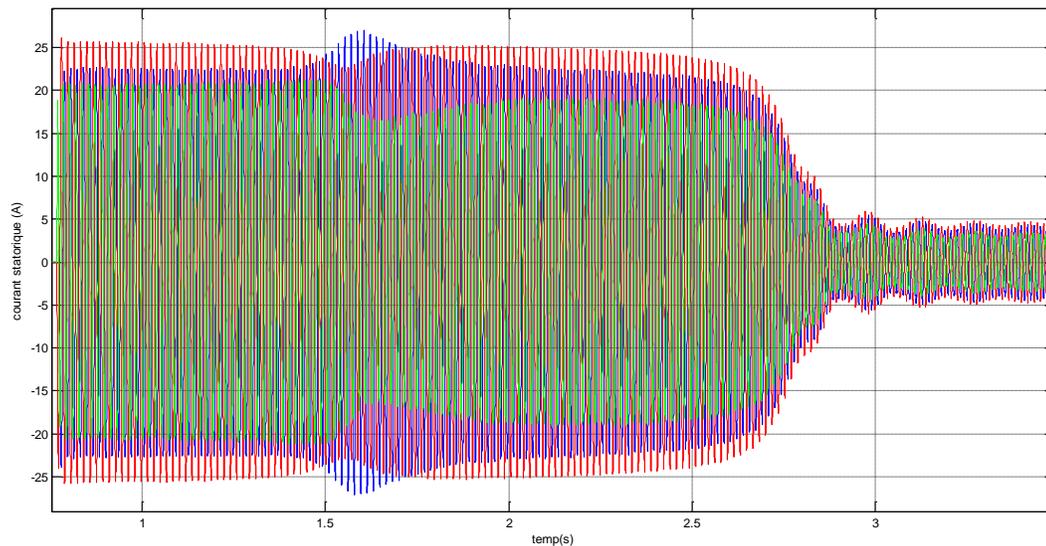


Fig.2.9.a Les courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au démarrage avec défaut d'ouverture d'une phase

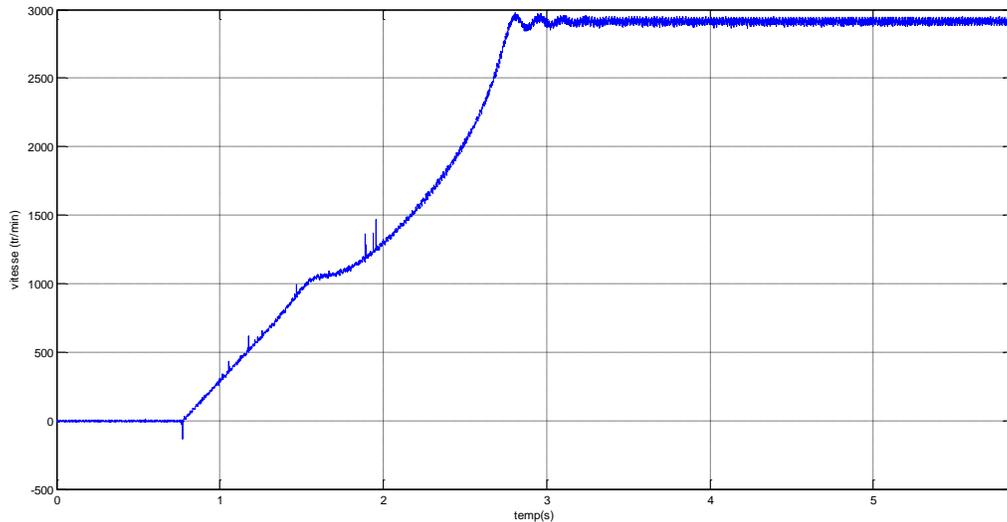


Fig.2.9.b Vitesse en tr /min de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase statorique

- **Fonctionnement du moteur avec défaut statorique**

On considère deux types de défaut, à savoir : Ouverture d'une phase durant le régime permanent et de deux phases durant le même régime dans des conditions à vide et en charge.

- **Fonctionnement à vide**

On introduit un défaut d'ouverture d'une phase au stator pour une machine fonctionnant à vide. On relève les courants statoriques Fig.10a. Le courant statorique de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase atteint 5A dans les phases (a) et (b) et est presque inchangé dans la phase (c) à cause du déséquilibre. On note que l'ouverture d'une phase n'influe pas sur la vitesse, elle reste constante autour de 2975 tr/min avec des petites ondulations. L'analyse harmonique donne une augmentation en amplitude de l'harmonique 3, Fig.2.10.b.

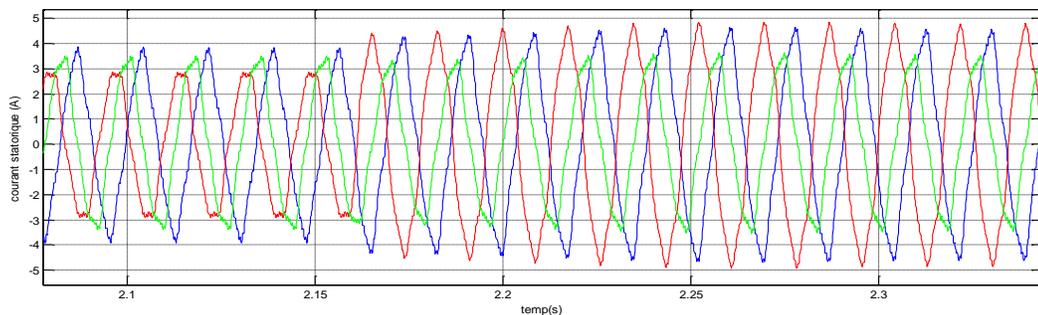


Fig.2.10.a Courants des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase statorique

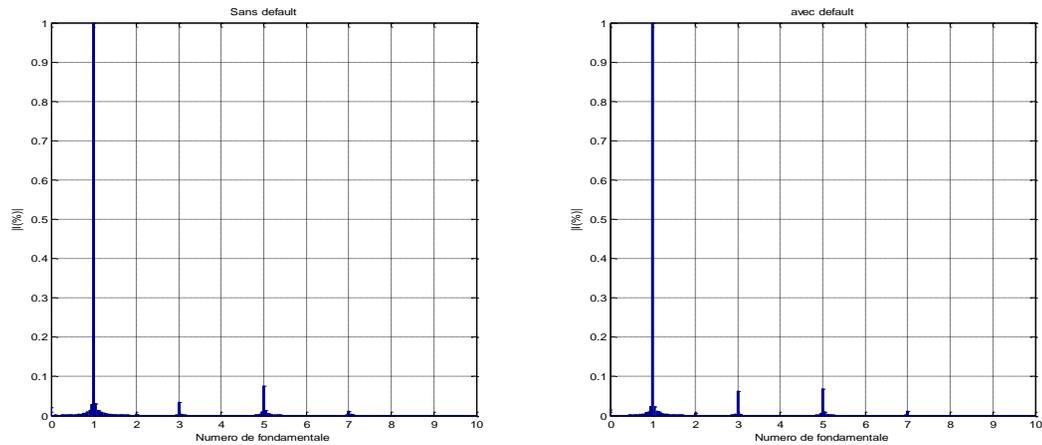


Fig.2.10.b Spectre de raies du courant stator avant et après défaut

### - Ouverture de deux phases en régime permanent

On fait fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre deux phases statoriques en même temps, et on relève les signaux de courants, Fig.11a. Le courant au moment du défaut (ouverture de deux phases à l'instant 2.5s) atteint les 6A dans les phases (a), (b) et (c) avec un déséquilibre. On note que l'ouverture de deux phases n'influe pas sur la vitesse, elle reste constante autour de 2975 tr/min avec des petites ondulations. L'analyse harmonique a donné une diminution en amplitude des harmoniques 3 et 5 après défaut d'ouverture de deux phases au stator Fig.2.11.b.

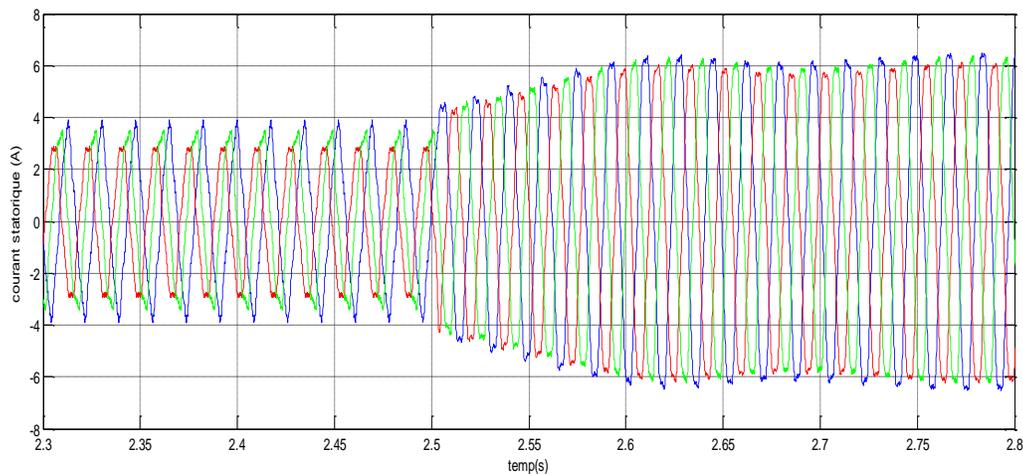


Fig.2.11.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture de deux phases

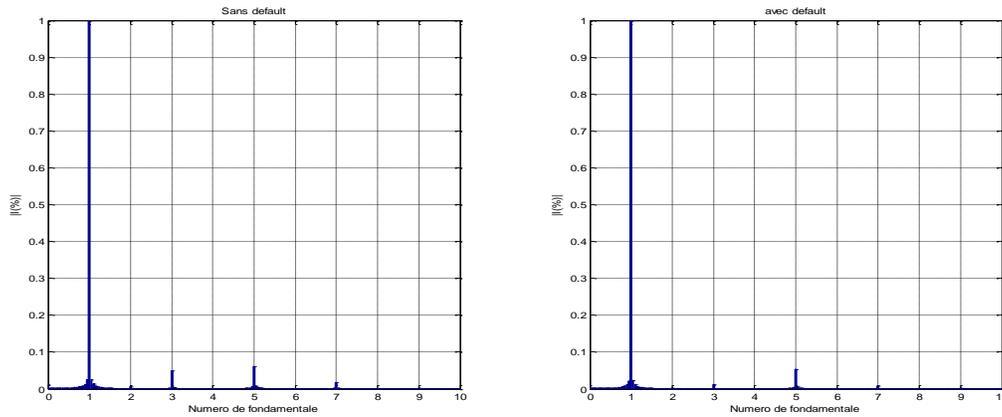


Fig.2.11.b Spectre de raies en courant avant et après défaut au stator

### - Fonctionnement en charge

On refait les mêmes essais que précédemment mais cette fois en charge. On fait fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ajoute une charge de  $33\Omega$ , on relève les signaux de courant, Fig.12a, et la vitesse de rotation de la machine, Fig.12b. Après ajout de la charge on remarque que le courant ne varie pas beaucoup, avec la diminution de la vitesse à 2700 tr/min à cause de l'augmentation du couple résistif.

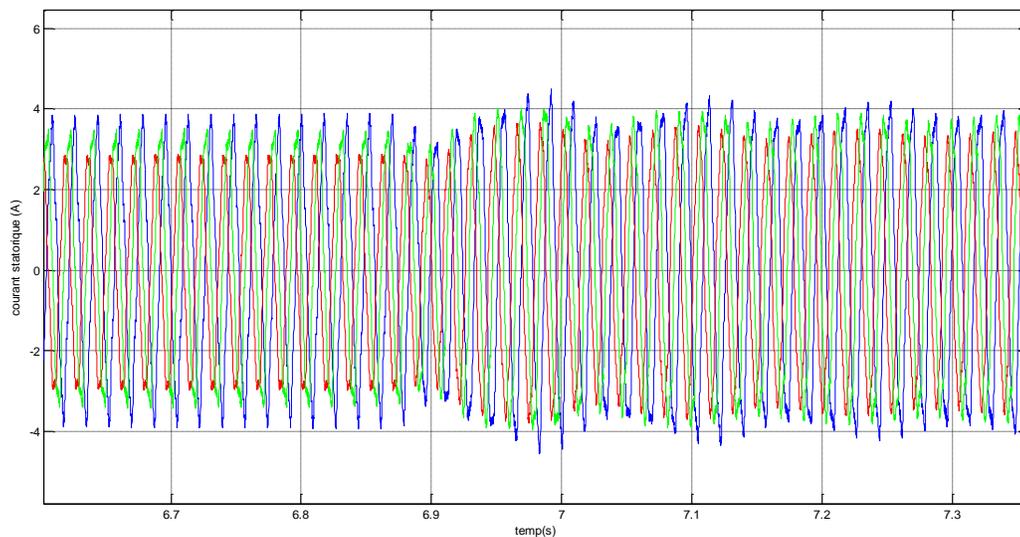


Fig.2.12.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment de l'ajout de la charge

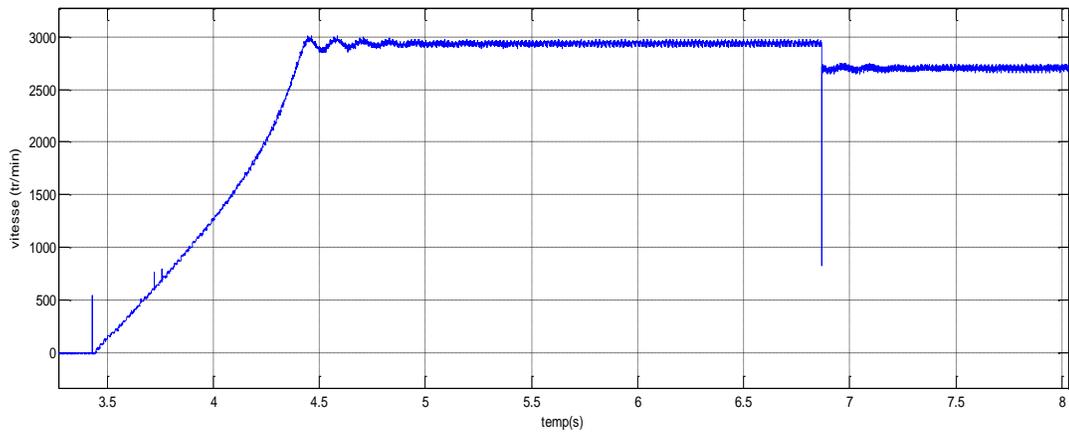


Fig.2.12.b Vitesse en tr/min au moment de l'ajout de la charge

### - Ouverture d'une phase en régime permanent

On fait fonctionner la machine en charge jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre une phase, on obtient les relevés en courant, Fig.13a et de la vitesse de rotation de la machine. Avec ajout de la charge, la vitesse de la machine passe à 2720 tr/min et reste la même après ouverture d'une phase au stator. On note une augmentation du courant jusqu'à 5A dans les phases les plus proches du défaut et pas de variation notable dans les phases les plus éloignés du défaut. Le spectre de raies en courant indique qu'il n'y a pas de variation en amplitude dans les harmoniques 3 et 5, Fig.2.13.b

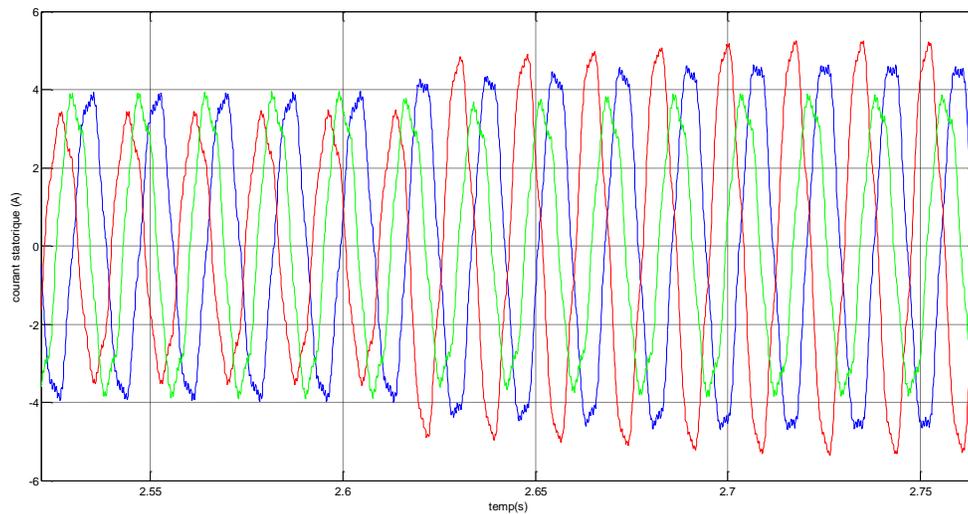


Fig.2.13.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase statorique

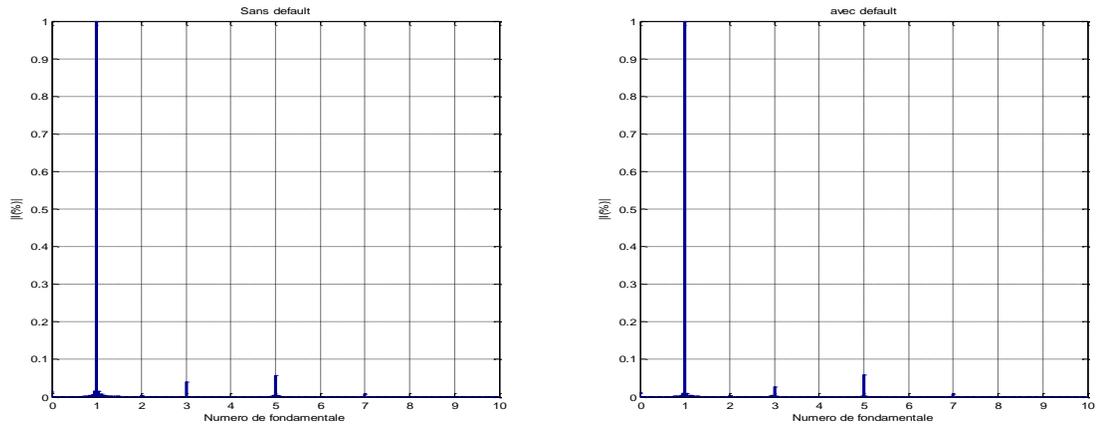


Fig.2.13.b Spectre de raies du courant stator avant et après défaut

### - Ouverture de deux phases en régime permanent

On fait fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre deux phases statoriques en même temps, on relève les signaux de courants Fig.14a et le spectre de raies Fig.14b. La machine continue de tourner à la même vitesse mais le courant statorique augmente jusqu'à 8A. Dans le cas du pentagone après le défaut, le déséquilibre est moins perçu que dans le cas de l'étoile

puisque nous avons un couplage fermé. Le spectre de raie indique que l'harmonique 3 est nul après le défaut.

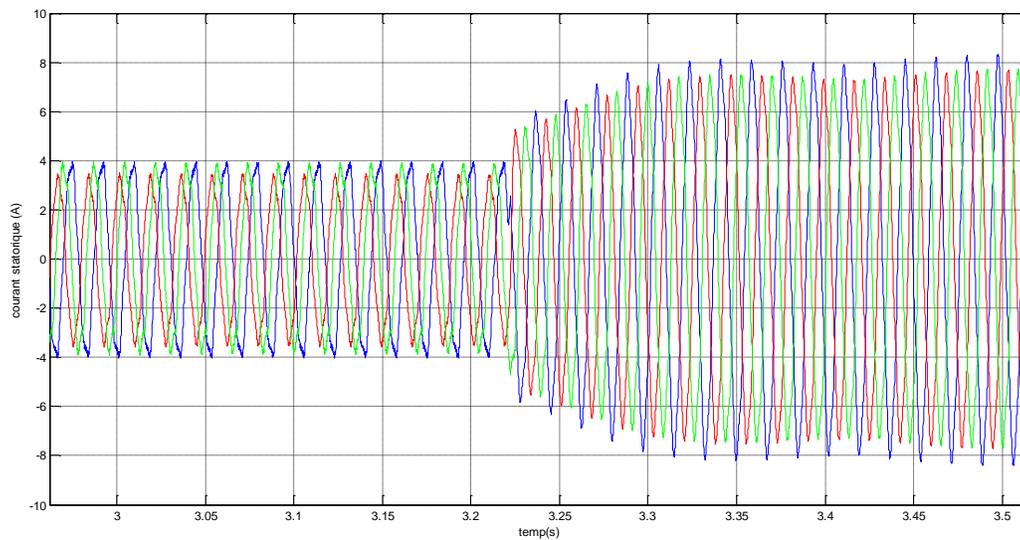


Fig.2.14.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut (ouverture de deux phases)

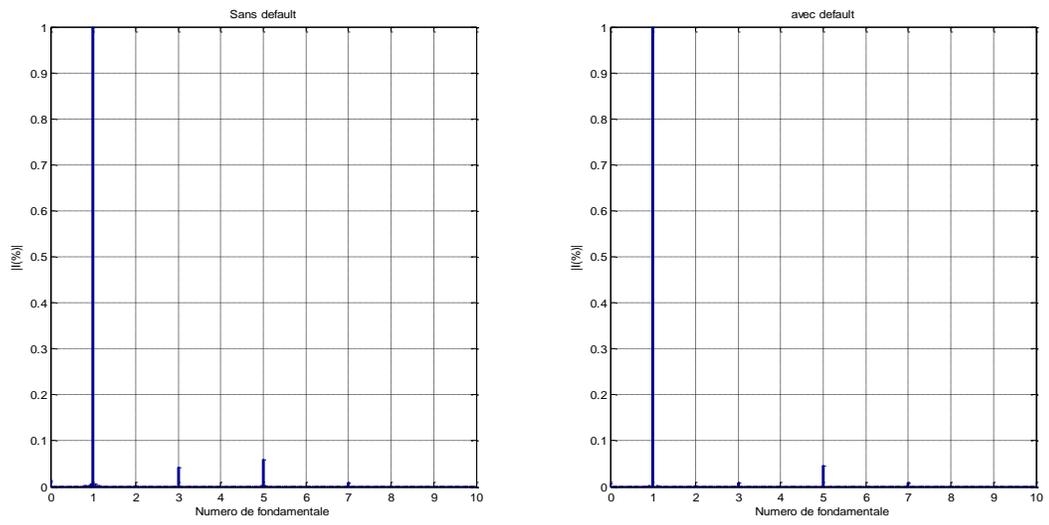


Fig.2.14.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture de deux phases

### II.2.3 Couplage pentacle

En reliant chaque phase avec la phase+2 de la machine on trouve le couplage pentacle tel qu'il est indiqué à la Fig.15.

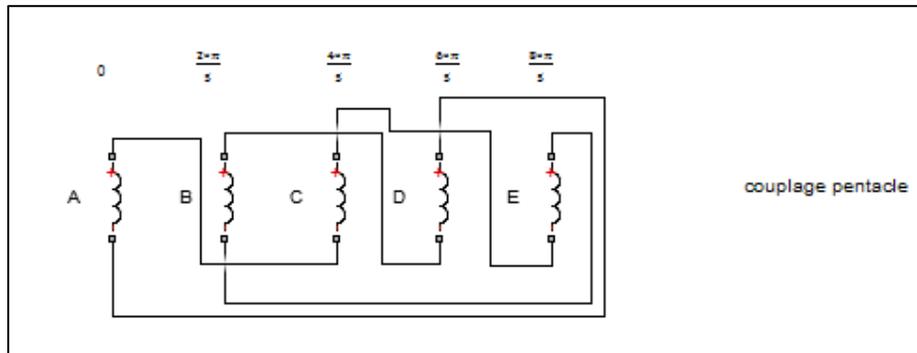


Fig.2.15 Couplage pentacle du stator de la machine asynchrone pentaphasée

#### - Fonctionnement normal de la machine saine

On alimente la machine avec une tension simple  $V = 220V$  jusqu'à atteindre le régime permanent, on relève les signaux de courants statoriques, Fig.16a et la vitesse de rotation de la machine, Fig.2.16.b.

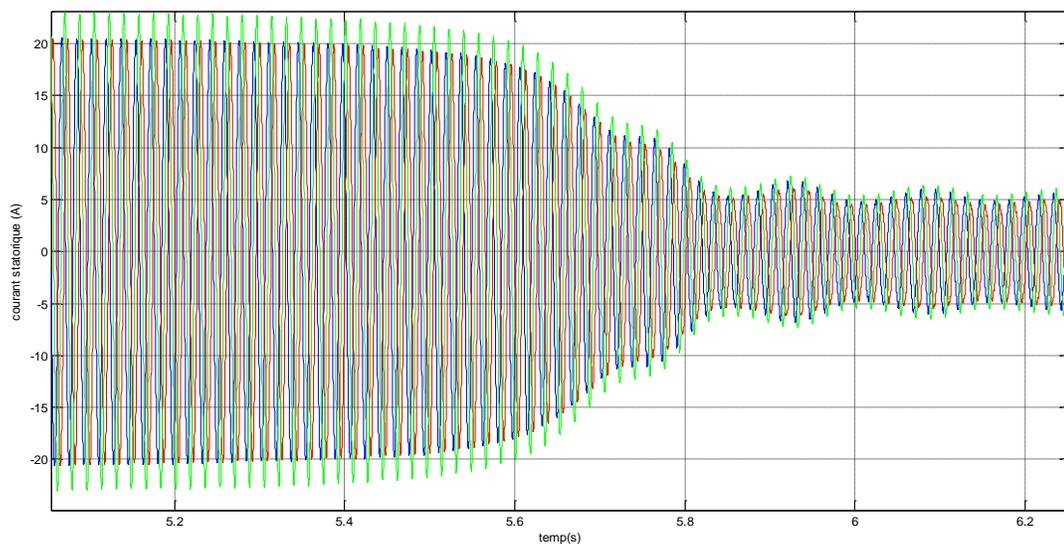


Fig.2.16.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) lors du démarrage de la machine saine

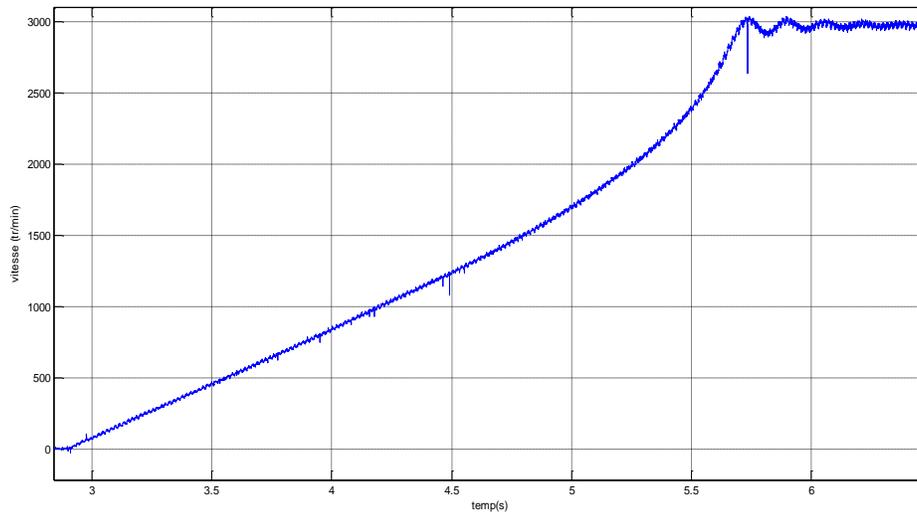


Fig.2.16.b Vitesse de rotation de la machine en tr/min lors du démarrage

Le couplage pentacle conduit à un courant plus élevé que dans les couplages étoile et pentagone. Le courant stator en régime permanent est de 6A avec un pic de 22A durant le régime transitoire. Cependant pour la vitesse de rotation de la machine on observe une constante de temps très élevée car la machine a mis 3s pour atteindre son régime permanent. Ce qui est plus lent par rapport au cas des autres couplages.

#### - Démarrage de la machine avec une phase ouverte au stator

On démarre la machine avec une phase ouverte au stator, en alimentant la machine avec une tension simple nominale de  $V=220V$ , et on relève les courants statoriques Fig.17a et la vitesse de rotation de la machine Fig.17b. Avec ce couplage la machine n'atteint pas le régime permanent avec un courant de 20A, elle n'atteint pas non plus la vitesse de 1000tr/min.

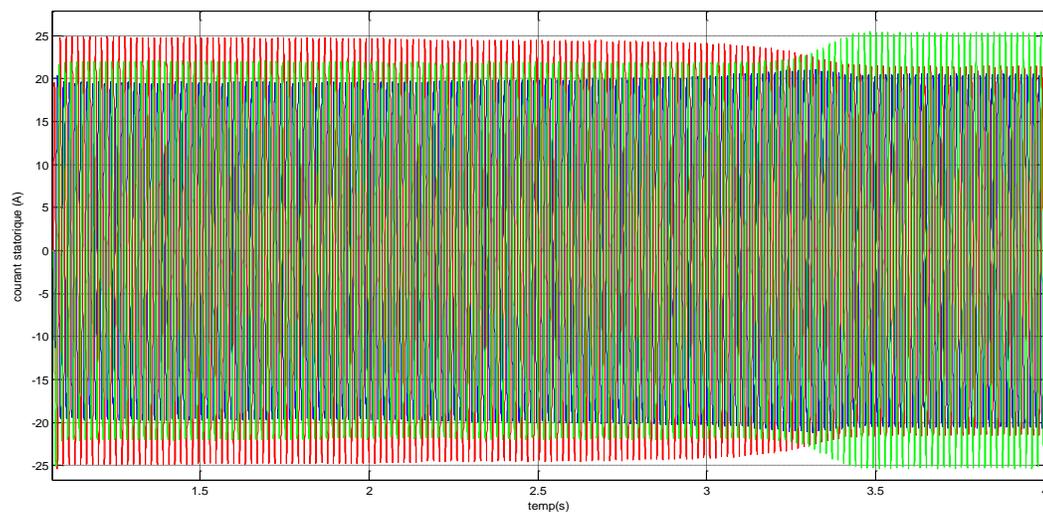


Fig.2.17.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au démarrage avec défaut d'ouverture d'une phase

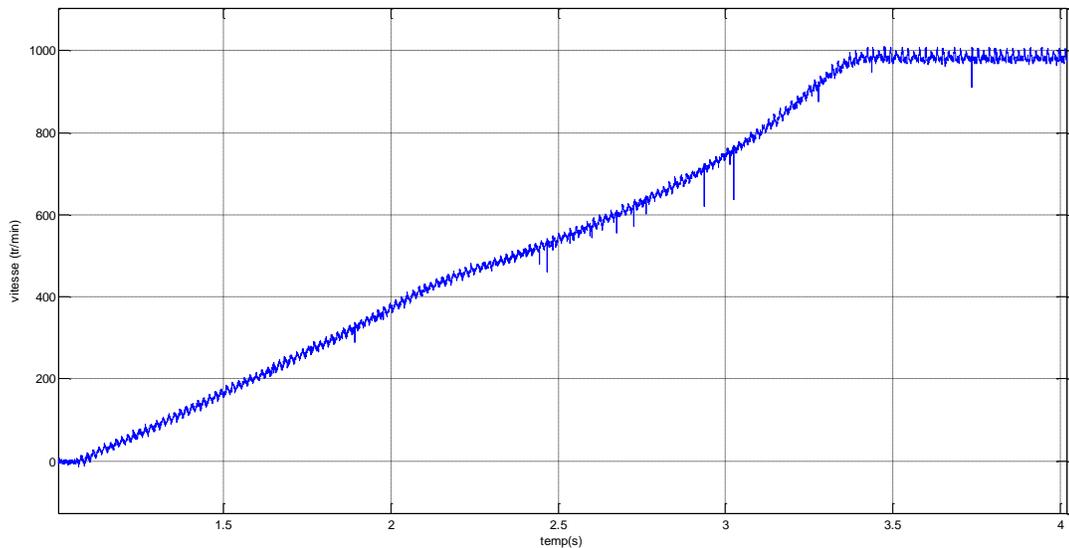


Fig.2.17.b. Vitesse de rotation de la machine en tr /min avec défaut d'ouverture d'une phase

- **Fonctionnement de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase au stator en régime permanent**

La machine asynchrone fonctionne en charge jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre une phase du stator. Puis on relève comme précédemment les courants statoriques, Fig.18a et le spectre de raies en courants Fig.18b. Le courant atteint 6,7A après le défaut dans la phase la plus proche du défaut et plus on s'éloigne du défaut plus les amplitudes des phases restent inchangées.

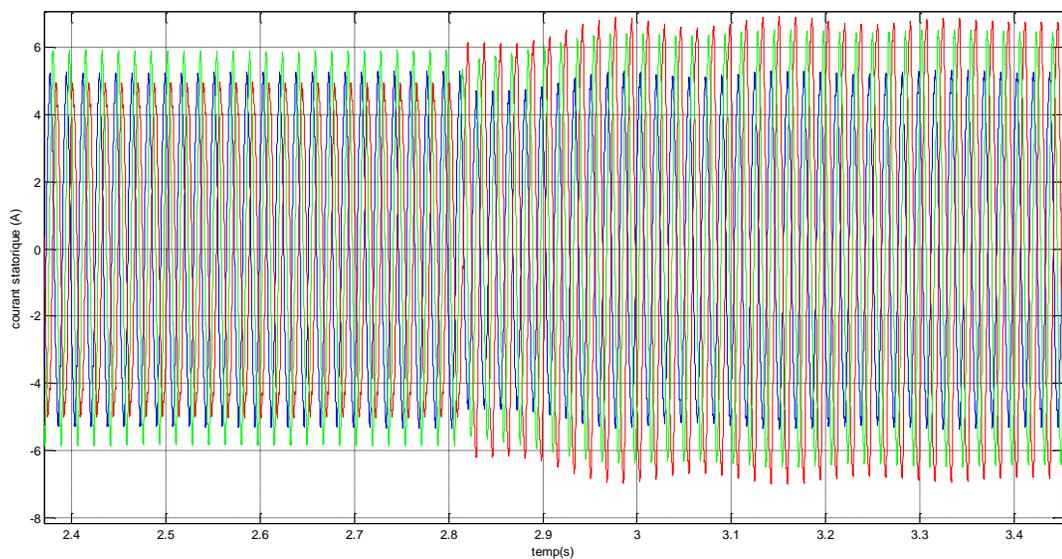


Fig.2.18.a Courants statoriques des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture d'une phase au stator

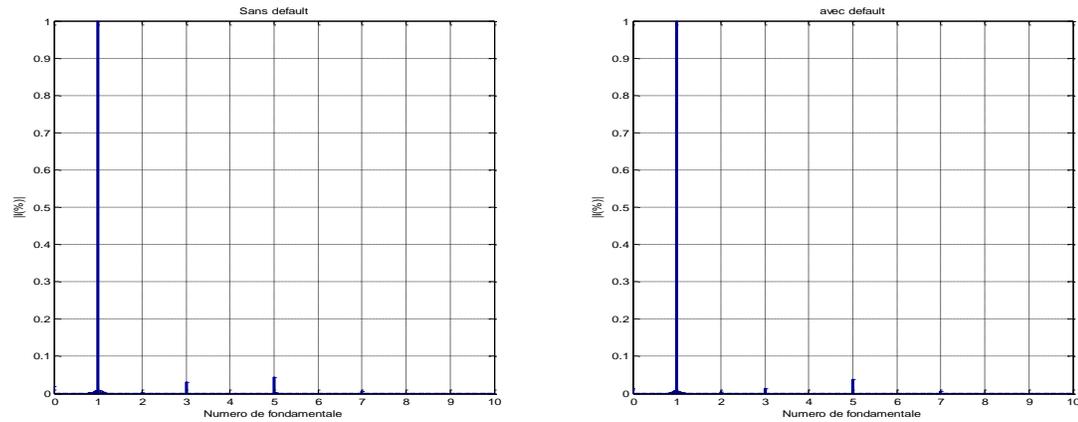


Fig.2.18.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture d'une phase au stator

### - Ouverture de deux phases en régime permanent

La machine démarre jusqu'à atteindre le régime permanent puis en ouvre deux phases au stator en même temps. Relève les courants statoriques Fig.19a et le spectre de raies en courant Fig.2.19.b. Le courant atteint 10A après le défaut avec une petite différence entre les phases à cause du déséquilibre, la vitesse reste toujours inchangée. Le couplage pentacle donne des courants plus importants (jusqu'à 2 fois la valeur du courant en étoile).

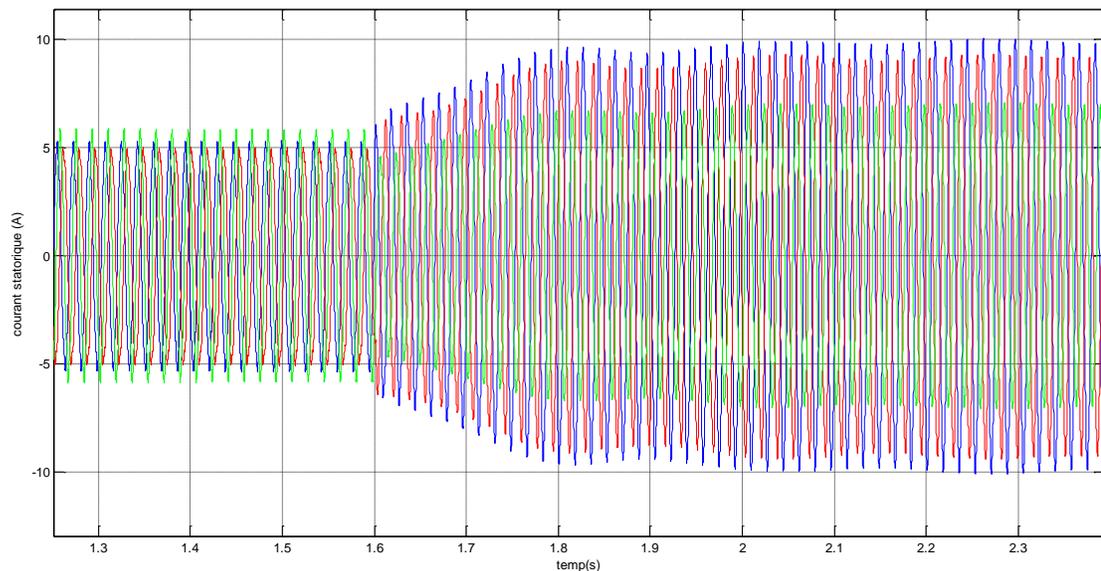


Fig.2.19.a Courants statorique des phases (a) et (b) et (c) au moment du défaut d'ouverture de deux phases

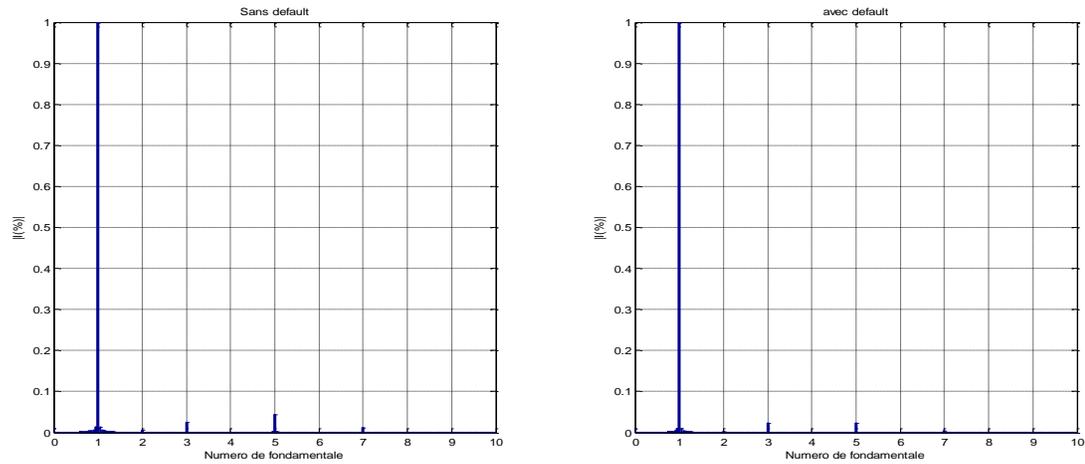


Fig.2.19.b Spectre de raies en courant avant et après défaut d'ouverture de deux phases au stator

### II.3 Conclusion

On observe bien que durant un défaut les courants statoriques ont tendance à augmenter que ce soit dans le cas d'un démarrage ou durant un fonctionnement. On remarque que la phase la plus proche du défaut subit une plus grande variation en amplitude ce qui fait que le défaut a moins d'influence sur la phase la plus éloignée par rapport au défaut.

L'application de l'analyse spectrale sur le signal du courant statorique avec défaut d'ouverture de deux phases au stator montre la disparition de la troisième harmonique vu que le signal tend vers celui d'un système triphasé.

# **III. Chapitre 3**

**Simulation du fonctionnement de la machine asynchrone  
pentaphasée avec et sans défauts**

### III.1 Introduction

L'expérimentation en laboratoire est une étape obligatoire pour valider un prototype mais la simulation numérique est une approche de comparaison entre résultats dans la plupart des cas en sciences de l'ingénieur. Elle apporte des explications aux phénomènes étudiés pour mieux comprendre et prévoir des perspectives futures. Le logiciel MATLAB joue un grand rôle dans les simulations numériques. Il possède une large base de données tout en incluant l'outil SIMULINK pour les simulations en électrotechnique.

Le premier objectif dans ce chapitre est la présentation du modèle mathématique de la machine asynchrone défini dans un référentiel biphasé, à partir du référentiel pentaphasé. Le second objectif visé est l'identification des paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone pentaphasée utilisant les tests classiques.

Ainsi donc nous présentons l'identification des paramètres du modèle de machine asynchrone pentaphasée à cage avec couplage en étoile. Les résultats de la simulation réalisés sous environnement (MATLAB/SIMULINK) d'une machine asynchrone pentaphasée fonctionnent à l'état sain et avec défauts sont également présentés à la fin de ce chapitre et comparés à ceux obtenus expérimentalement pour un cas d'alimentation en montage étoile.

Les données fournies par les constructeurs des machines électriques ne sont pas suffisantes pour connaître tous les paramètres électriques et mécaniques de ces machines. C'est la raison pour laquelle nous avons recouru à certaines méthodes pour la détermination de ces paramètres. De plus, les paramètres identifiés dépendent des points de fonctionnement (température, saturation) et peuvent être différents des paramètres de construction.

Les méthodes d'identification paramétriques appliquées au moteur asynchrone peuvent être basées sur des tests classiques ou sur des tests avec signaux d'excitation persistante (cas des séquences binaires ou ternaires pseudo-aléatoires).

Cependant, la méthode classique est la plus adéquate car elle se rapporte au modèle de Park défini avec des paramètres inductifs et résistifs que l'on doit identifier au préalable par des tests expérimentaux.

Parmi ces méthodes de détermination des paramètres de la machine asynchrone à cage nous citons la méthode des tests classiques, autrement dit, les tests à vide et en court-circuit que nous exposons dans ce chapitre après avoir rappelé le schéma équivalent de la machine asynchrone à cage pentaphasée.

### III.2 Identification paramétrique d'une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil

#### - Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent

Les équations en tension de la machine, pour toute séquence "k" représentée dans le référentiel stator, sont données dans les références [3] et [5] :

$$V_{sk} = (R_s + j\omega_s I_s)I_{sk} + j\omega_s L_{mk}(I_{sk} + I_{rk}) \quad (3.1)$$

$$0 = [R_{rk} + j(\omega_s - k\omega_r)I_{rk}]I_{rk} + j(\omega_s - k\omega_r)L_{mk}(I_{sk} + I_{rk}) \quad (3.2)$$

Où  $k = 1$  et  $3$  représente l'harmonique fondamental et l'harmonique trois du circuit équivalent

Le glissement  $S_k$  est défini par :

$$S_k = 1 - \frac{k\omega_r}{\omega_s} \quad k=1, 3 \quad (3.3)$$

Le schéma équivalent en régime permanent pour la séquence  $k$  est représenté à la Fig.(3.1)

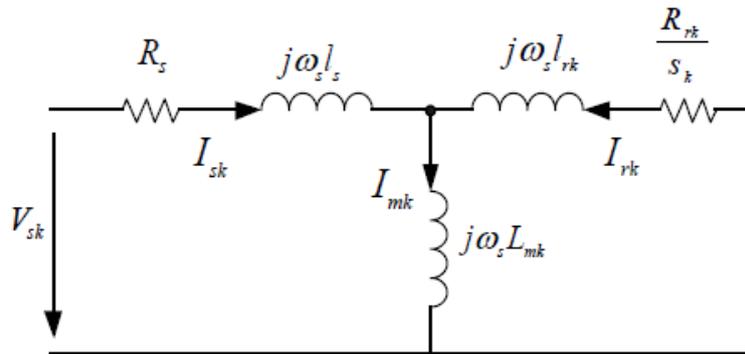


Fig.3.1 Schéma équivalent en régime permanent pour la séquence "k" [20]

#### - Détermination des paramètres électriques et mécaniques

La technique d'identification proposée est basée sur les tests conventionnels de rotor bloqué et à vide. Le test du rotor bloqué peut être efficacement utilisé pour donner une estimation approximative de l'impédance totale de la machine, tandis que l'inductance à vide obtenu à partir du test à vide représente la somme de l'inductance de magnétisation de la machine et l'inductance de fuite du stator.

$R_s, R_r$  : Résistances statorique et rotorique

$X_s = \omega_s l_s, X_{rk} = \omega_s l_{rk}$  : Réactances statorique et rotorique

$X_{mk} = \omega_s l_{mk}$  : Réactance magnétisante

#### - Tests en courant continu (mesure de résistance d'une phase statorique)

Ce test permet de calculer la résistance d'un enroulement autrement dit la résistance  $R_s$ . On met les 5 bobines du stator en parallèle puis on alimente par un courant continu variable afin de prendre quelques mesures. Les valeurs sont indiquées dans le tableau 1.

$V_{ab}$ (V)	0.4	1.05	1.5	1.85	2.1
$I_a$ (A)	1.2	3.6	5	6	7

Tableau 1 : courants et tensions continus

La valeur de la résistance ainsi obtenue est :  $V_{ab} = \frac{R_s}{5} I_a d$  où  $R_s = \frac{5V_{ab}}{I_a}$

Après calcul de la valeur moyenne de la résistance, on trouve  $R_s = 1.53 \Omega$

- **Test à vide**

Dans ce cas, la machine est alimentée à sa tension et fréquence nominale, et fonctionne à vide. Il existe cependant un couple résistant de très faible valeur équivalent aux pertes mécaniques dues aux frottements et à la ventilation.

Le glissement n'est pas tout à fait nul, les courants rotoriques sont négligeables et le flux dans l'entrefer est créé par le stator seul. On peut écrire alors que  $S_k = 0$  et,

$$V_s = V_{s0}$$

$$I_r \cong 0$$

$$I_s = I_{s0} \cong I_m$$

A partir du schéma équivalent de la Fig.(3.2) et de l'expression  $I_r \cong 0$ , nous obtenons le nouveau schéma équivalent suivant :

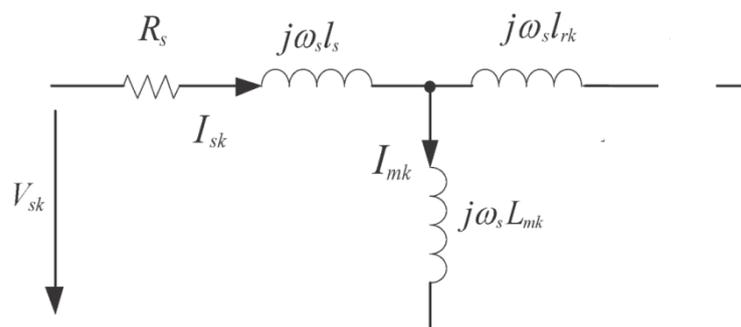


Fig.3.2 Schéma équivalent en tenant compte du courant rotorique négligeable

Les résultats issus des tests sont présentés dans le tableau suivant :

• **Pour la séquence 1**

$V_a$ (V)	215	207	196.9	187.5	177.7
$I_a$ (A)	2.6	2.51	2.41	2.23	2.06
$P_a$ (W)	16	15	21	20	27
$S_a$ (VA)	559	519.57	474.53	418.13	366.06
$Q_a$ (Var)	558.8	519.35	474.07	417.65	365.06

Tableau 2.a : résultats de l'essai à vide pour la première séquence

• **Pour la séquence 3**

$V_a$ (V)	31.4	35	40	43.5	45
$I_a$ (A)	3.02	3.4	3.85	4.26	4.4

Tableau 2.b : résultats de l'essai à vide la troisième séquence

D'après le schéma équivalent pour le test à vide, on peut écrire :

$$Z_{0k} = R_s + j(\omega_s l_s + \omega_s l_{mk}) = \frac{V_a}{I_a} \quad (3.4)$$

L'inductance à vide de chaque plan de séquence peut alors être estimée en utilisant la relation :

$$L_{s1} = \frac{1}{\omega_s} \sqrt{Z_{01}^2 - R_s} = l_s + l_{m1} \quad (3.5)$$

$$L_{s3} = \frac{1}{\omega_s} \sqrt{Z_{03}^2 - R_s} = l_s + l_{m3} \quad (3.6)$$

Cette inductance à vide se rapproche de la somme de l'inductance magnétisante et l'inductance de fuite statorique.

D'où  $\begin{cases} L_{s1} = 0.265692 \text{ H} \\ L_{s3} = 0.032451 \text{ H} \end{cases}$

- **Test à rotor bloqué**

Nous pouvons effectuer ce test à tension réduite et à fréquence nominale pour le cas de ce type de machines. Le rotor étant bloqué (vitesse nulle)  $S_k = 1$ , on alimente le moteur progressivement (à partir d'une tension initiale nulle) jusqu'à  $I \cong I_n$  et on relève les grandeurs mesurées : la tension  $V_{cc}$ , le courant absorbé  $I_{cc}$ , la puissance active  $P_{cc}$  ainsi que la puissance réactive  $Q_{cc}$ .

Dans ce test où les courants rotoriques sont importants, la branche de magnétisation est négligée. On obtient le schéma de la Fig.(3.3).

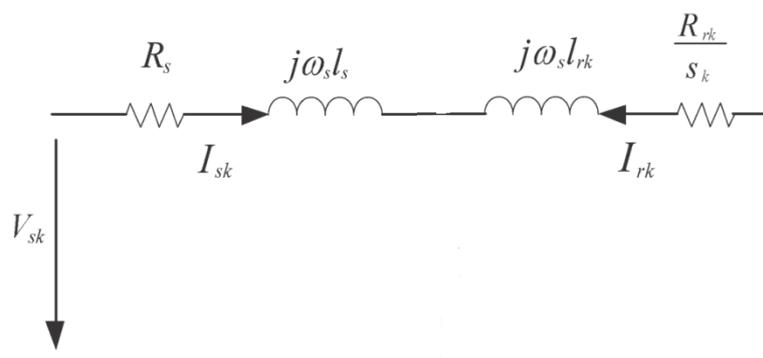


Fig.3.3 Schéma équivalent de la machine asynchrone lors du test à rotor bloqué

- **Séquence 1**

$V_{cc}(\text{V})$	$I_{cc}(\text{A})$	$P_{cc}(\text{W})$	$S_{cc}(\text{VA})$	$Q_{cc}(\text{Var})$
25.94	8.1	142	303	268

Tableau 3.a : résultats de l'essai à rotor bloqué pour la première séquence

- **Séquence 3**

$V_{cc}(V)$	$I_{cc}(A)$	$P_{cc}(W)$	$S_{cc}(VA)$	$Q_{cc}(Var)$
12.69	4.06	26	52.52	46

Tableau 3.b : résultats de l'essai à rotor bloqué pour la troisième séquence

D'après le schéma équivalent par phase on trouve :

$$\begin{cases} P_{cc} = (R_s + R_{rk})I_{cc}^2 \\ Q_{cc} = (\omega_s l_s + \omega_s l_{rk})I_{cc}^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

On considère les réactances de fuite stator et rotor comme égales, c'est-à-dire  $X_s = X_r \Rightarrow l_s = l_r$

D'où

$$l_s = l_r = \frac{1}{2\omega_s} \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R_{rk})^2} \quad \text{et } R_{rk} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - R_s \quad (3.8)$$

$$\text{avec } Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (3.9)$$

- **Résultats de l'identification des Paramètres électriques**

- **Séquence 1**

$R_s(\Omega)$	$R_r$	$L_s$	$L_r$	$l_s$	$l_r$	$l_m$
1.53	0.6343	0.265692	0.265692	0.003759	0.003759	0.261933

Tableau 4.a : résultats des paramètres électriques de la machine asynchrone pour la première séquence

- **Séquence 3**

$R_s(\Omega)$	$R_{r3}$	$L_s$	$L_{r3}$	$l_{s3}$	$l_{r3}$	$l_{m3}$
1.53	0.35	0.031	0.030	0.016	0.015	0.015

Tableau 4.b : résultats des paramètres électriques de la machine asynchrone pour la troisième séquence

- **Résultats de l'identification des paramètres mécaniques**

- **Test de ralentissement**

Le principe de la méthode consiste à faire fonctionner la machine à vitesse nominale  $\omega_n$  puis à couper l'alimentation du stator. La vitesse diminue progressivement sous l'effet des pertes mécaniques ( $-f\Omega^2$ ).

Nous obtenons :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - fr. \Omega \text{ avec } C_r = 0 \quad (3.10)$$

A l'arrêt le couple du moteur est  $C_{em} = 0$ , donc  $j \frac{d\Omega}{dt} = -fr. \Omega$

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = -\frac{fr}{J} dt \rightarrow \int \frac{d\Omega}{\Omega} = -\frac{fr}{J} \int dt \rightarrow \ln \Omega_1 - \ln \Omega_2 = -\frac{fr}{J} (t_1 - t_2) \quad / \quad \Omega = \frac{2\pi}{60} N \quad (3.11)$$

D'où :

$$\frac{fr}{J} = \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{t_1 - t_2} \quad (3.12)$$

La constante de temps mécanique est  $T_m = \frac{J}{f}$

D'après la Fig.(3.4) et le tracé de la tangente, on peut déterminer la constante de temps mécanique telle que :

$$T_m = \frac{J}{f_r} = 10,35s$$

Le frottement  $f_r$  est estimée à  $0.003 \text{ N.m.Rad/s}$  d'où la valeur du moment d'inertie

$$J = 0.03105 \text{ kg.m}^2$$

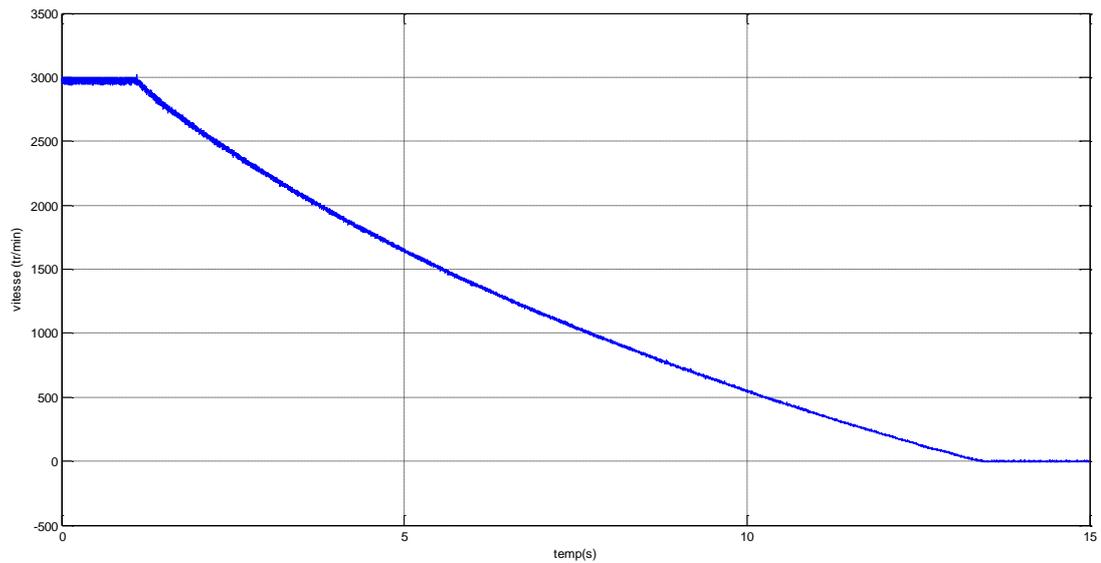


Fig.3.4 Temps d'arrêt de la machine après avoir coupé l'alimentation (14.25s)

### III.3 Modèle général de la machine asynchrone pentaphasée

#### - Hypothèses simplificatrices

Pour étudier le comportement de la machine asynchrone pentaphasée en régime dynamique et permanent, il est nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [19] :

- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale ;
- Entrefer uniforme ;
- La machine est de constitution symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'effet de l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés.

#### III.3.1 Équations en tension au stator et au rotor

- Pour le stator :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d[\psi_S]}{dt} \quad (3.13)$$

Avec :

$$[V_S] = [V_{S1} V_{S2} V_{S3} V_{S4} V_{S5}]^t \quad (3.14a)$$

$$[I_S] = [I_{S1} I_{S2} I_{S3} I_{S4} I_{S5}]^t \quad (3.14b)$$

$$[\psi_S] = [\psi_{S1} \psi_{S2} \psi_{S3} \psi_{S4} \psi_{S5}]^t \quad (3.14c)$$

- Pour le rotor :

$$0 = [R_r] [I_r] + \frac{d[\psi_r]}{dt} \quad (3.15)$$

Où :

$$[I_r] = [I_{r1} I_{r2} I_{r3} I_{r4} I_{r5}]^t \quad (3.16)$$

$$[\psi_r] = [\psi_{r1} \psi_{r2} \psi_{r4} \psi_{r5}]^t \psi_{r3} \quad (3.17)$$

$[R_S]$  et  $[R_r]$  sont respectivement la matrice résistance stator et la matrice résistance rotor.

$$[R_S] = \begin{pmatrix} R_S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_S \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

### III.3.2 3.2.1. Équations de flux au stator et au rotor

Les flux sont exprimés en fonction des courants par :

$$[\psi_S] = [L_{SS}][I_S] + [M_{Sr}][I_r] \quad (3.19)$$

$$[\psi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_S] \quad (3.20)$$

En remplaçant les expressions des flux dans les équations de tension, on trouve :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}([L_{SS}][I_S] + [M_{Sr}][I_r]) \quad (3.21)$$

$$0 = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_S]) \quad (3.22)$$

Avec

$$[L_{SS}] = L_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

et

$$[L_{rr}] = I_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{mr} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{8\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{8\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{6\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{8\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{8\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{8\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

avec

$[L_{ss}]$  et  $[L_{rr}]$  représentent respectivement les matrices d'inductances totales stator et rotor.

$M$ : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

### III.3.3 3.2.2 Équation mécanique

L'équation mécanique est exprimée par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F\Omega \quad (3.26)$$

avec

$J$ : Moment d'inertie de la machine

$C_{em}$ : Couple électromagnétique

$C_r$ : Couple résistant (couple de la charge)

$\Omega$ : Vitesse angulaire de rotation

$F$ : Coefficient de frottements

## III.4 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée dans le repère (d, q)

Les équations de tension et du couple décrivent le comportement dynamique d'un moteur asynchrone variant avec le temps. De telles équations conduisent à la complexité lors de la résolution des équations différentielles. Un changement de variable dépendant du temps en invariant dans le temps peut être utilisé pour minimiser la complexité des équations de tension de la machine en raison du mouvement du circuit électrique. Grâce à cette technique, un enroulement polyphasé peut être réduit à un ensemble d'enroulements biphasés (d-q) qui sont en quadrature l'un

par rapport à l'autre. En d'autres termes, les variables de stator et de rotor (liaisons de tension, de courant et de flux) d'un moteur asynchrone sont transférées à une référence arbitraire.

### III.4.1 Transformation de Park

Cette transformation permet le passage d'un système pentaphasée de composantes (a, b, c, d, e) à un autre système biphasée équivalent (d, q). Elle est donnée par  $T(\theta)$ , où  $\theta$  est l'angle de rotation du rotor par rapport aux axes de référence.

$$F_{dq1dq3} = T(\theta)F_{abcde}$$

Où,

$$[T(\theta)] = \frac{2}{5} \begin{pmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & -\sin(2\alpha) & -\sin(3\alpha) & -\sin(4\alpha) \\ 1 & \cos(3\alpha) & \cos(6\alpha) & \cos(9\alpha) & \cos(12\alpha) \\ 0 & -\sin(3\alpha) & -\sin(6\alpha) & -\sin(9\alpha) & -\sin(12\alpha) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{2\pi}{5}$$

Le comportement dynamique de base de la machine à induction à cinq phases peut être décrit par les équations suivantes dans un repère de référence (d, q), [18]. La représentation du modèle est donnée à la Fig.3.5.

On choisit un référentiel lié au champ tournant et en appliquant la transformation de Park aux équations des tensions, et aux équations de flux, nous obtenons le système d'équation suivant :

#### - Équations en tensions

Pour le stator, les équations en tension sont :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_s i_{ds1} + \frac{d\psi_{ds1}}{dt} - \omega_e \psi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_s i_{qs1} + \frac{d\psi_{qs1}}{dt} + \omega_e \psi_{ds1} \end{cases} \quad (3.28)$$

$$\begin{cases} V_{ds3} = R_s i_{ds3} + \frac{d\psi_{ds3}}{dt} - 3 \omega_e \psi_{qs3} \\ V_{qs3} = R_s i_{qs3} + \frac{d\psi_{qs3}}{dt} + 3 \omega_e \psi_{ds3} \end{cases} \quad (3.29)$$

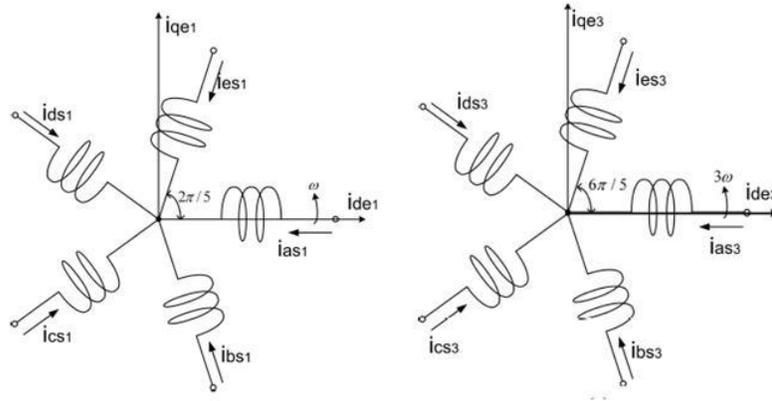


Fig.3.5 représentation du modèle

Pour le rotor, les équations en tension sont :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (3.30)$$

#### - Expressions des flux

Pour le stator, les expressions des flux sont :

$$\begin{cases} \psi_{ds1} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs1} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds3} = L_{s3} i_{ds} + 3 L_{m3} i_{dr} \\ \psi_{qs3} = L_{s3} i_{qs} + 3 L_{m3} i_{qr} \end{cases} \quad (3.32)$$

avec :  $L_{sk} = L_{lsk} + L_{mk}$ ,  $k=1, 3$

où,

$L_{ls}$  : Inductance propre statorique

$L_m$  : Inductance de magnétisation

Pour le rotor, les expressions des flux sont :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (3.33)$$

avec :  $L_r = L_{lr} + L_m$

où,

$L_{lr}$  : Inductance propre rotorique

- **Équation du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique s'exprime par :

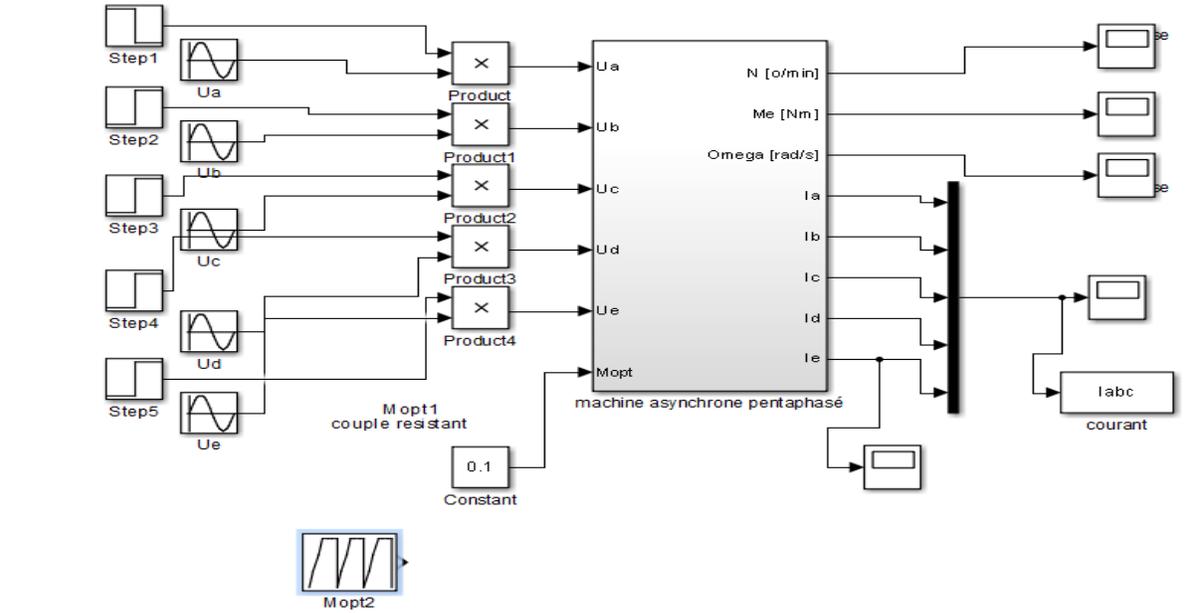
$$C_e = pL_{M1}(i_{qs1}i_{dr1} - i_{ds1}i_{qr1}) + 3pL_{M3}(i_{qs3}i_{dr3} - i_{ds3}i_{qr3}) \quad (3.34)$$

avec  $P$  : Le nombre de pôles

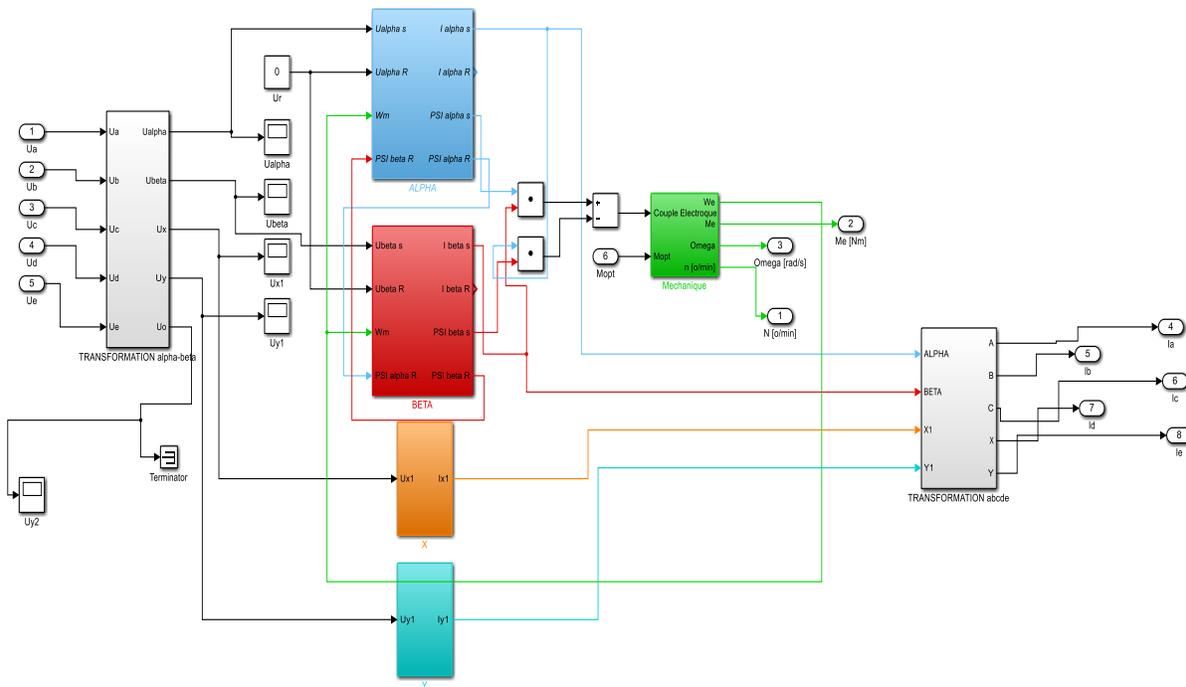
$$L_{Mk} = 5 * \frac{L_{mk}}{2}, k = 1, 3$$

### III.5 Simulation du système transformateur pentaphasé-machine asynchrone pentaphasée

Le modèle mathématique donné dans ce chapitre 3 est implémenté sous l'environnement MATLAB / SIMULINK représenté par le schéma de la Fig.3.6:



(a)



(b)

Fig.3.6 Schéma pour la simulation du modèle de la machine asynchrone à cage pentaphasée

- **Résultats de simulation et Discussions**

Les résultats de la simulation obtenus à partir du logiciel MATLAB / Simulink sont illustrés aux Figs.(3.7 ). Le comportement typique de la machine asynchrone pentaphasée est observé. On effectue les simulations de la machine asynchrone pentaphasée à l'état sain (à vide ou en charge) et avec la présence des défauts.

- **Simulation du fonctionnement de la machine à l'état sain**

Les paramètres du moteur utilisés pour la simulation sont ceux identifiés précédemment. Les figures suivantes montrent respectivement l'évolution de la vitesse de rotation ainsi que les courants statoriques lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

- **Fonctionnement à vide**

La machine est à vide c'est à dire que le couple résistant est nulle  $C_r = 0$

**a/ Vitesse rotorique**

La variation de la vitesse du rotor pendant le démarrage et jusqu'au régime permanent est illustrée à la Fig.3.7 Le petit dépassement dans la réponse en vitesse est observé.

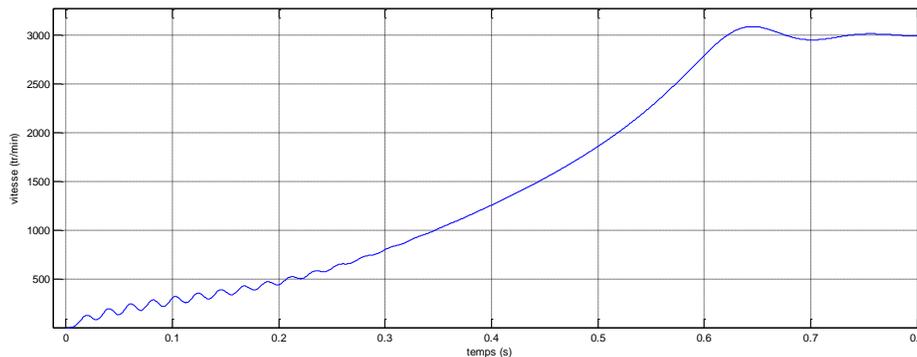


Fig.3.7 Vitesse rotorique en tour/min en fonctionnement à vide

**b/ Courants statoriques**

Lors du démarrage de la machine, un courant élevé durant la phase transitoire circule dans le moteur, puis diminue fortement à mesure que la machine atteint le régime permanent. Le courant à l'état stable à vide et constant dans le stator est observé, comme illustré à la Fig.(3.8).

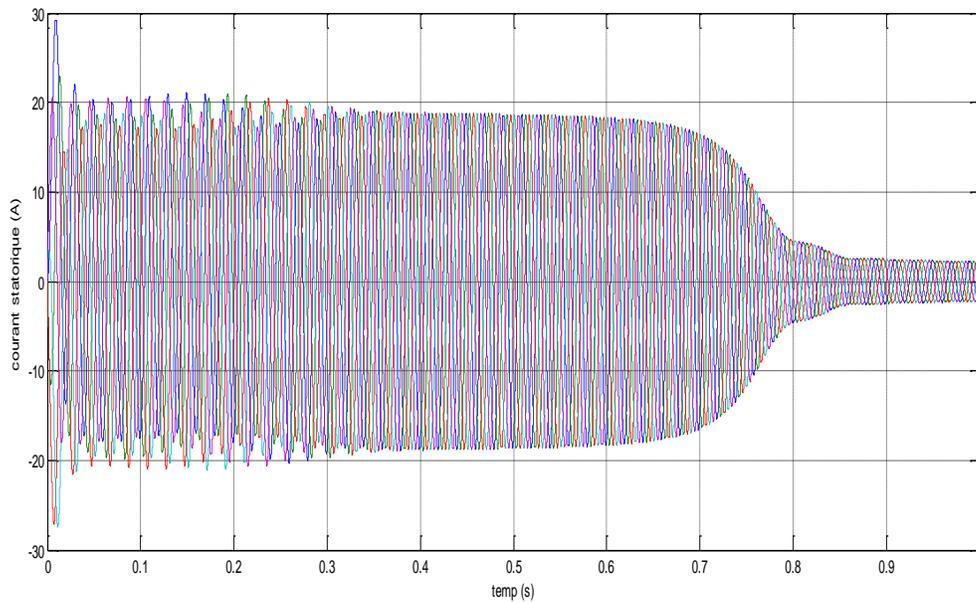


Fig.3.8 Les courants statoriques simulés à vide

- **Fonctionnement en charge**

On ajoute à  $t=1s$  un couple résistant de 10 N.m

**a/ Vitesse rotorique**

La variation de la vitesse du rotor pendant le démarrage et jusqu'au régime permanent est illustrée à la Fig.(3.9). Une légère diminution dans vitesse est observée lors de l'ajout de la charge à l'instant  $t=1s$ , comme illustré à la même figure.

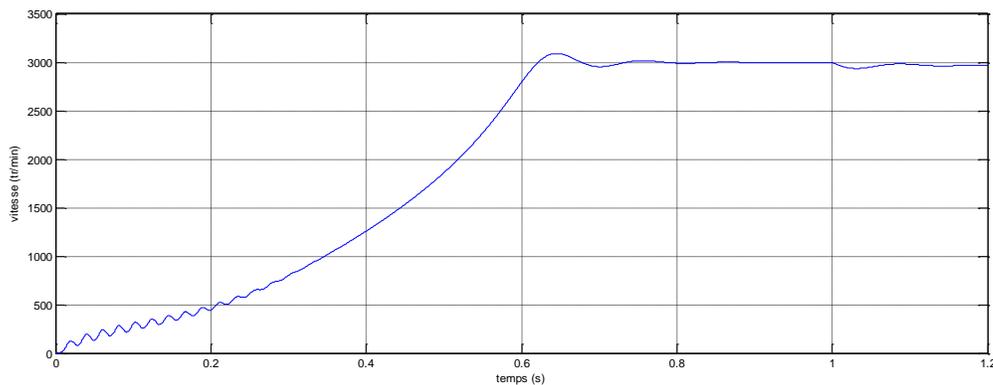


Fig.(3.9). Vitesse rotorique (tour/min) pour un fonctionnement en charge

### b/ Courants statoriques

La Figure (3.10) montre une augmentation du courant à partir de l'instant  $t=1s$  à cause de l'ajout d'une charge.

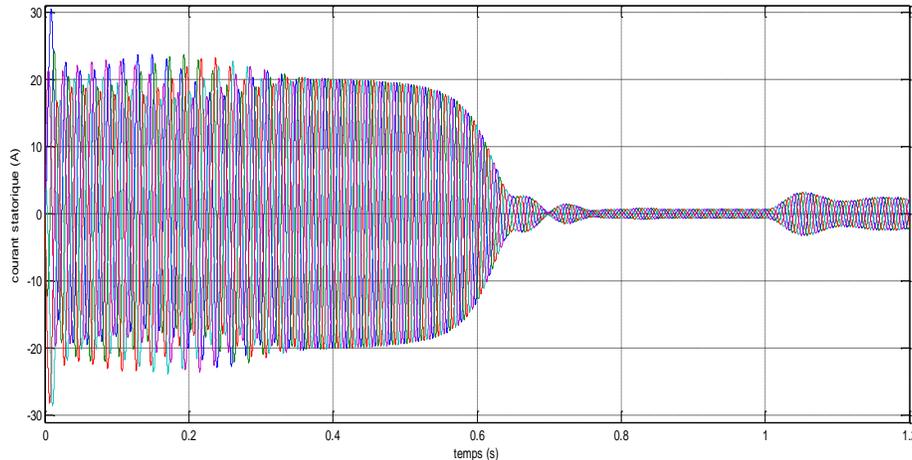


Fig.3.10 Courants statoriques simulés en charge

- *Simulation du fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée avec défauts*

On effectue la simulation du fonctionnement de la machine asynchrone en présence du défaut. Deux types de défaut peuvent être pris en considération, à savoir :

- Soit le démarrage de la machine avec une phase ouverte jusqu'au régime permanent
- Soit on ouvre une phase après le démarrage de la machine saine.

- *Simulation d'un défaut au démarrage*

On effectue la simulation d'un démarrage de la machine avec ouverture de la phase A.

### a/ Vitesse rotorique

La Figure (3.11) montre que le transitoire est un peu long par rapport au démarrage de la machine saine et la valeur de la vitesse qui diminue légèrement.

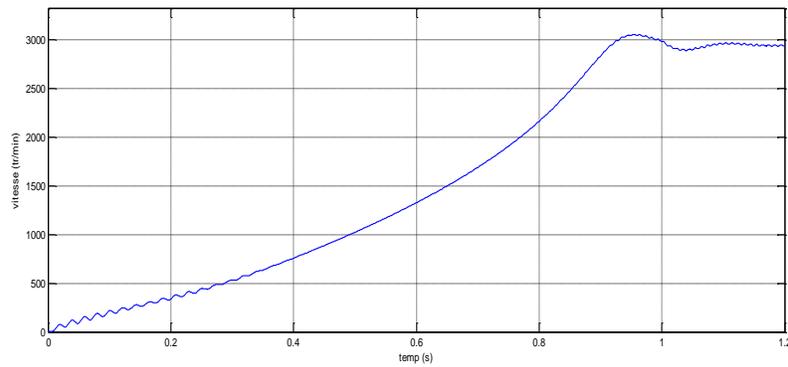


Fig.3.11 Vitesse rotative en tour/min au démarrage (ouverture d'une phase)

### b/ Courants statoriques

La Figure (3.12) montre une augmentation du courant que ce soit en transitoire ou en régime permanent par rapport au démarrage de la machine saine avec, cependant, une différence entre l'amplitude de chaque phase. Les phases les plus proches du défaut subissent le plus de variation.

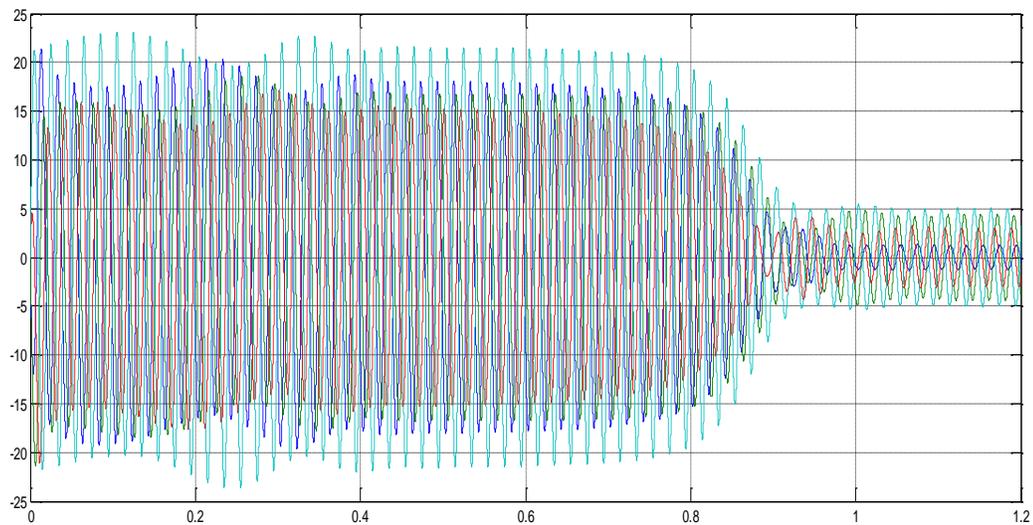


Fig.(3.12). Courants statoriques simulés au démarrage (ouverture d'une phase)

#### - *Simulation d'un défaut en régime permanent*

- **Overture d'une phase au stator**

En régime permanent, on provoque un défaut par l'ouverture dans la première phase à l'instant  $t=1.2s$ , et on obtient les résultats suivants :

### a/ Vitesse rotorique

La vitesse reste constante autour du 3000 tr/min même après le défaut, comme le montre la Fig.(3.13).

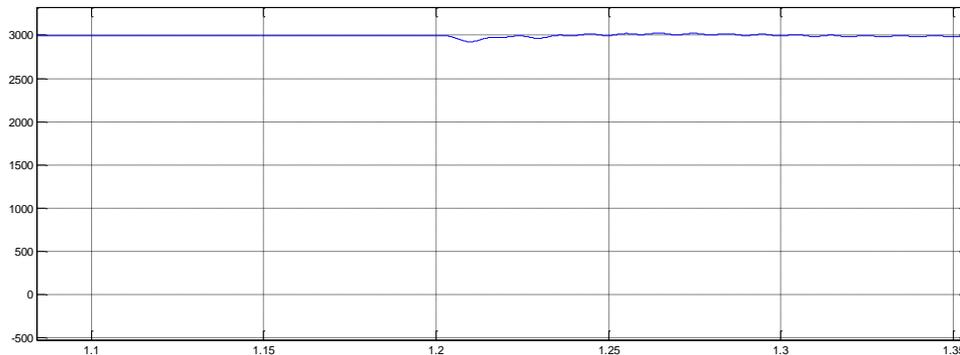


Fig.3.13 Vitesse rotorique en tour/min en régime permanent (après ouverture d'une phase)

### b/ Courants statoriques

La Figure (3.14) montre un déséquilibre après l'apparition du défaut dans les quatre phases.

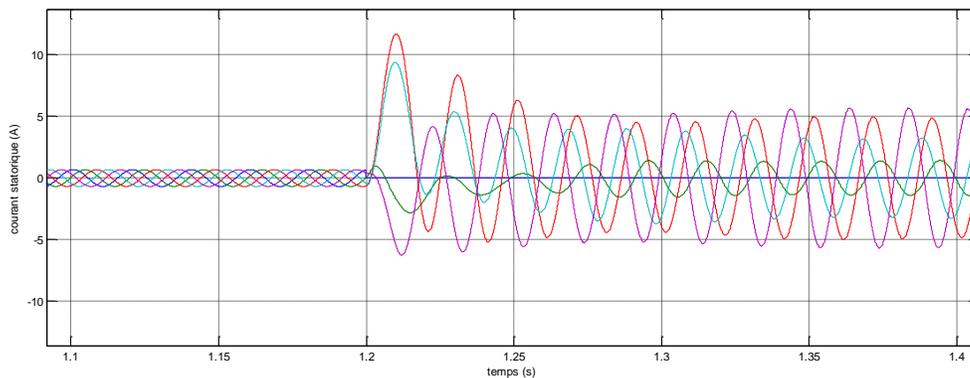


Fig.(3.14). Courants statoriques simulés en régime permanent (avec ouverture d'une phase)

## III.6 Conclusion

Le modèle représentant une mise en équations de la machine asynchrone pentaphasée dont l'ordre est élevée, contient deux écritures, l'une due à l'harmonique fondamental et l'autre à celui d'ordre trois.

L'échauffement et la saturation conduisent à la non linéarité rendant le système complexe ; c'est pourquoi il convient de passer à un référentiel (d, q) dont l'ordre du modèle est bas. Ce modèle est adapté à la commande et à l'identification des paramètres de la machine pentaphasée. Nous avons également étudié le comportement de la machine asynchrone pentaphasée pendant les différentes conditions de fonctionnement d'abord à l'état sain et ensuite avec défaut, pour un couplage étoile, sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cette étude a été validée par la comparaison avec les résultats expérimentaux.

---

## *Conclusion Générale*

---

Aujourd'hui, la machine polyphasée trouve sa place dans le développement technologique suite aux exigences effrénées du monde industriel. En effet, l'utilisation des machines polyphasées ( $m > 3$ ) s'impose, de plus en plus, vu la supériorité de leurs performances par rapport aux machines triphasées. Cependant, parmi toutes les machines polyphasées, c'est la machine pentaphasée qui est appelée au plus grand développement.

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire consiste en le diagnostic de défauts d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par un transformateur pentaphasé asymétrique. La machine pentaphasée que nous avons étudiée a été réalisée en même temps que le transformateur pentaphasé par le Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'École nationale Polytechnique.

Nous avons élaboré le modèle mathématique de la machine asynchrone pentaphasée dans sa base naturelle et la base de découplage, et nous avons constaté que l'étude de cette machine s'effectue par l'intermédiaire de deux études de machines simples dans le repère d-q. L'une étant une machine principale liée à l'harmonique fondamental, et l'autre secondaire liée au 3eme harmonique.

Ensuite nous avons présenté les différents essais sur la machine avec les trois couplages applicables à une machine pentaphasée. Nous avons observé que l'application d'un défaut statorique à la machine asynchrone pentaphasée induit un déséquilibre entre les phases de cette dernière et que les phases les plus proches du défaut tendent à donner un courant plus élevé. Nous avons également observé qu'avec une phase ouverte la machine ne démarre qu'avec un couplage pentagone et un couplage étoile à neutre relié à tension nominale. Lors de l'apparition des défauts en cas de fonctionnement à l'état permanent la machine asynchrone pentaphasée continue à tourner à une vitesse proche du synchronisme, contrairement à la machine triphasée conventionnelle qui s'arrête si elle rencontre de tels défauts.

Nous avons conclu également que le meilleur couplage dans une machine asynchrone pentaphasée est le couplage pentagone puisque le déséquilibre, provoqué par l'ouverture des phases, est minimum, et est plus stable que les autres couplages. Le couplage pentacle est le plus dangereux car les courants statoriques sont plus élevés.

Enfin, nous avons abordé la détermination des différents paramètres de la machine liée au fondamental et au 3eme harmonique, en utilisant les méthodes classiques. Ces paramètres sont exploités dans une simulation avec le modèle déjà élaboré pour une validation des résultats.

---

### Références Bibliographiques

---

- [1] F.Benabida, M.Ouadah Diagnostic de défaut au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. p 1, PFE Électrotechnique : Alger, École Nationale Polytechnique : juin 2006
- [2] Jose A. Riveros, Federico Barrero, Senior Member, IEEE, Emil Levi, Mario J.Durán, Sergio Toral, and Martin Jones“Variable-Speed Five-Phase Induction Motor Drive Based on Predictive Torque Control“IEEE transactions on Industrial Electronics, August 2013
- [3] G. Didier. Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèsedoctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. Octobre 2004
- [4] M. Bernard, « Historique des machines électromagnétiques et plus particulières des machines à réluctance variable » Revue 3E. In°3, pp. 3–8, Juin 1995.
- [5] D. Hadiouche, H. Razik, A. Rezzoug, «Modeling of a double-star induction motor with an arbitrary shift angle between its three phase windings », EPE-PEMC2000, Kosice.
- [6] T. Boumegoura. Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic. ThèseDoctorat, Écolecentrale de Lyon. Mars 2001.
- [7] E. Schaeffer. Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts. Thèse de Doctorat. Université De Nantes 1999.
- [8] S. Bachir. Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation Paramétrique. ThèseDoctorat. Université de Poitiers,Décembre 2002.
- [9] J. Penman, H. G. Sedding, W. T. Fink. Detection and location of interturn's short circuits in the stator windings of operating motors. IEEE Transactions On Energy Conversion, vol.9, no4, dec.1994.
- [10] M. Haidour. Diagnostic de la machine asynchrone. PFE, École Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2005
- [11] A. H. Bonnett. Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5):pp.1435-1448, September/ October 2000.
- [12] J. Povinelli, F. Bangura, Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data

Mining and Time-Stepping Coupled FE–State-Space Techniques. IEEE Transactions on Industry Applications Vol.39, N°. 4, July/August 2003

- [13] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott & M. W. Madden, Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 03, N°.04, pp. 873 - 879, December 1988.
- [14] B. Yazici. “An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken rotor bars and bearing faults in motors using stator current” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35: pp.442-452, Mar./Apr. 1999.
- [15] W. J. Wang. Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. J. Sound Vib., Vol. 192(5) : pp.927-939, 1996.
- [16] B. Raison. Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France 2000.
- [17] H, Benbouzid. Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Rotor Resistance Sensorless Estimation. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, no. 1, March 2000
- [18] E. Y. Chow & A. S. Willsky, Analytical redundancy and the design of robust pp. failure detection systems, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 29, no. 07, 603-614, 1984.
- [19] H.A. Tolyat, S.P. Waiker, et T.A. lipo « analysis and simulation the five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of an gap ». MMF. IEEE Transactions on Industry Application April 1998
- [20] Ayman S. Abdel-Khalik, *Senior Member, IEEE*, Mohamed I. Daoud, Shehab Ahmed, *Senior Member, IEEE*, Ahmed A. Elserougi, *Senior Member, IEEE*, and Ahmed M. Massoud, *Senior Member, IEEE* ” Parameter Identification of Five-Phase Induction Machines With Single Layer Windings ” IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 10, October 2014