

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'études
Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En machines Electriques
Présenté par:

BEKKARI Boubaker Seif Allah ,ZELLOUMA Aissa

Thème

**" Techniques avancées pour le diagnostic
des machines électriques "**

Soutenu le .. /09/2020. Devant le jury composé de :

Dr SERHOUD Hicham	Maitre de conférences	A Président
Dr Allal Abderrahim	Maitre de conférences	A Rapporteur
Dr BABA ELARBI Idris	Maitre de conférences	B Examineur

Année universitaire :2019/2020

REMERCEMENT

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département
. D'électrotechnique de l'université Hamma Lakhdar El oued*

*Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la
.patience pour mener ce travail à terme*

Par conséquent, nous tenons à remercier chaleureusement

*Monsieur Dr. Allal AbdeRRahim Pour le suivi continu tout au long de la
célébration de l'achèvement de ce travail, qui n'a cessé de nous donner
ses conseils et ses Observations dirigé ce travail et pour la confiance et
.l'intérêt qu'il nous a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail*

*Nous vifs remerciement vont également aux membres de jurys, pour
l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être examinateurs de notre
mémoire.*

*A ceux qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et
.aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail*

*Nous vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à
l'université.*

DEDICACE

Nous dédions ce travail à:

Pour nos mères,

Pour nos parents,

Pour nos frères

Et à tous nos amis

Boubaker Seif Allah et Aissa

المخلص:

نظرا للاستعمال الكثير للآلات اللامتزامنة خاصة منها ذات الققص السنجابي حاولنا في هذه الدراسة معرفة طرق تشخيص هذه الأخيرة حتى نصل الى التشخيص الدقيق عن للآلة وذلك بالمقارنة بين طرق التشخيص المتقدمة التي تسرع من عملية الكشف عن الاعطاب وقصد تطوير التشخيص الانبي للالة .
الكلمات المفتاحية : الآلات اللامتزامنة, الطرق الحديثة, تشخيص, الاعطاب الكهربائية .

Résumé:

En raison de l'utilisation fréquente des machines asynchrones, en particulier celles à cage d'écureuil, nous avons essayé dans cette étude de connaître la méthode de diagnostic la plus précise de la machine en faisant une étude comparative entre des méthodes de diagnostic avancées qui accélèrent le processus de détection précoce des défauts afin de faire avancer le diagnostic en temps réel de la machine.

Les mots clé: machines asynchrones, techniques avancées, diagnostic, Défauts électriques.

Abstract:

Due to the frequent use of asynchronous machines, especially those with squirrel cage, in this study we have tried to know the most accurate diagnostic method of the machine by making a comparative study between advanced diagnostic methods which speed up the process of early fault detection to advance real-time machine diagnostic.

Key Word : asynchronous machines, advanced technical, diagnostic, fault electric

Liste de figures

Fig.I.1. photo du stator d'une machine asynchrone	7
Fig.I.2. Rotor à cage d'écureuil.....	8
Fig. I.3. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	10
Fig.I.4. Proportion des défauts	13
Fig.I.5. <i>Défaut d'une barre cassée</i>	18
Fig.I.6. Rupture d'une et de deux portions d'anneaux.....	19
Fig.I.7. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	20
Fig. II.1. Principe général de diagnostic à base de modèle.....	27
Fig. II.2. Principe de la surveillance par analyse spectrale	29
Fig. II.3. Capteur de température dans une plaque à bornes.....	33
Fig. II.4. Image colorée infrarouge thermique	33
Fig. II.5. Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches.....	40
Fig .III.1. Spectre logarithmique expérimental du MCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge.....	49
Fig .III.2. Spectre logarithmique expérimental du MCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge.....	49

Fig .III.3. Spectre logarithmique expérimental du MSCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge.....	50
Fig .III.4. Spectre logarithmique expérimental du MSCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge.....	51
Fig .III.5. Spectre logarithmique expérimental du PVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge.....	52
Fig .III.6. Spectre logarithmique expérimental du PVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge.....	52
Fig .III.7. Spectre logarithmique expérimental du PVSM_{P-H} d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge...	53
Fig .III.8. Spectre logarithmique expérimental du PVSM_{P-H} d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge..	54
Fig .III.9. Spectre logarithmique expérimental du HPVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge.....	55
Fig .III.10. Spectre logarithmique expérimental du HPVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge.....	55
Fig .III.11. Courbes de sensibilité des différentes techniques avancées de diagnostic avec 4 spires statoriques court-circuitées (Résultats de simulation).....	57

Liste des Tableaux

Tableaux

Tableau.III. 1 Fréquences caractéristiques des défauts..... **48**

Tableau.III.2. Classement des techniques de diagnostic d'après leurs sensibilités expérimentales Moteur (3 kW).....**57**

Tableau A.2. Paramètres du moteur (**MAS**) (essais expérimentaux).....**70**

Liste des symboles

kW	Kilowatt
MW	Mégawatt
k	un entier positif
g	Glissement
N_r	Nombre de barres rotoriques
p	Nombre de paires de pôles
f_s	Fréquence d'alimentation
v	Entier positif
$i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$	Courant statorique de phase
$i_d(t), i_q(t)$	Courant statorique biphasées
h	Ordre harmonique temporel
f_r	Vitesse mécanique du rotor
$i_{dP-H} i_{qP-H}$	Courant statorique biphasées Park-Hilbert
ω_s	Vitesse de rotation
S_{\pm}	(RSH)
R_{\pm}	(RBFH)
E_{\pm}	(EFH)
Fe	Fréquence d'échantillonnage
Ta	Durée d'acquisition
Δf	Résolution de fréquence
Hz	Hertz
A	Signature dont l'amplitude est la plus grande (avec + ou -)
f_{cbr}	Fréquence de cassure de barre rotorique
dB	Amplitude de cassure de barre rotorique
V_n	Tension nominale
I_n	Courant nominale

ω_n

Vitesse nominale

Liste des abréviations

MAS	Machine Asynchrone
FDI	(Fault Détection and Isolation)
MCSA	(Motor Current Signature Analysis)
MMF	Force magnéto motive
TH	(Time Harmonics)
RSH	(Rotor Slot Harmonics)
RBFH	(Rotor Bar Fault Harmonics)
EFH	(Eccentricity Fault Harmonics)
FFT	(Fast Fourier Transformation)
HPVPA	(Hilbert Park's Vector Product Approach)
MSCSA	(Motor square current signature analysis)
PVSM	(Park's vector square modulus)
PVSMP-H modulus)	(Park–Hilbert Park's vector square modulus)
PVPA	(Park's Vector Product Approach)

Sommaire

Titre	Page
REMIREMENT	
DEDICACE	
Résumé	
Liste de figures	
Liste des Tableaux	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
 Chapitre I Constitution et présentation des défauts de la machine asynchrone	
.1 Introduction:.....	3
I.2 Constitution de la machine asynchrone:.....	4
I.2.1.Stator :.....	5
I.2.2 Rotor:.....	6
I.2.3 Organes mécaniques:.....	7
I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :.....	8
I.3.1 Vitesse de glissement :.....	9
I.4 Classification des défauts dans la machine asynchrone et leurs techniques de diagnostic:	11
I.4. Défaillances au stator:.....	13
I .4.1. Défauts internes et externes:.....	13
I .4.1.a. Court-circuit entre phases:.....	14

I.4.1.b. Défaut de court-circuit entre phase et le bâti:.....	14
I.4.1.c. Court-circuit entre spires :.....	15
I.4.2. Défaut d'isolant:.....	16
I.4.3 Décharge partielle:.....	16
I.5. Défaillances au rotor:.....	16
I.5.1. Ruptures de barres:.....	17
I.5.2. Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit:.....	18
I.5.3. Excentricité statique et dynamique:.....	18
I.6. Défaillance d'ordre mécanique:.....	20
I.6.1. Défaillance de l'arbre:.....	20
I.6.2. Défaillance des roulements à billes:.....	20
I.6.3 .Défaillance des flasques:.....	21
I.7.Conclusion:.....	21

Chapitre II:techniques avancées de diagnostic des Machines Asynchrones MAS

II.1. Introduction:.....	23
II.2. Fiabilité du diagnostic:.....	23
II.3. Etat de l'art des méthodes de diagnostic:.....	24
II.3.1. Différents types de maintenance:.....	24
II.3.2. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone:	24
II.3.2.1 Détection à partir des méthodes internes (connaissance a priori):.....	25
II.3.2.2 Détection à partir des méthodes externes (sans connaissance a priori):.....	27
II.3.2.2.1 Analyse des signaux vibratoires:.....	29

II.3.2.2.2 Analyse du couple électromagnétique:.....	29
II.3.2.2.3 Analyse du flux:.....	30
II.3.2.2.4 Analyse du vecteur de Park:.....	30
II.3.2.2.5. Diagnostic par les analyses chimiques:.....	31
II.3.2.2.6.analyse de la température : La Thermographie:.....	32
II.3.2.2.7. Analyse des courants statoriques:.....	33
II.4. Principe de diagnostic de défaut:.....	33
II.4.1. Redondance physique (matérielle):.....	33
II.4.2. Redondance analytique:.....	33
II .5. Harmoniques de courant de stator dans le moteur à induction:....	34
II .6. Théorie de la transformée de Hilbert:.....	36
II.7. Les approches de diagnostic des défauts les plus utilisées:.....	37
II.7.1. Détection de défaut à l'aide de l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA):.....	37
II.7.2.Analyse de la signature du courant carré du moteur MSCSA:.....	39
II.7.3. Méthode Park-Hilbert (PVSM _{P-H}):.....	41
II.7.4. Approche du produit vectoriel de Park (PVPA):.....	41
II .8.Conclusion:.....	42

Chapitre III: ETUDE COMPARATIVES DES TECHNIQUES

AVANCEES DE DIAGNOSTIC DE LA MAS

III.1. Introduction :.....	44
III.2.1. Description de l'outil d'extraction du signal:.....	45
III.2. 2. Paramètre et régime de fonctionnement du moteur utilisé:.....	45
III.3. Etude comparative d'après le spectre logarithmique:.....	46

III.3.1 Discussion des résultats expérimentaux:.....	46
III.3.2. Analyse comparative des résultats expérimentaux:.....	55
.Remarque:.....	57
III-4. Conclusion:.....	58
CONCLUSION GENERALE:.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:.....	61
Annexe 1:.....	69

INTRODUCTION GENERALE:

Dans les secteurs industriels, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables, car une quelconque défaillance peut mener un à dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des techniques de diagnostic. La problématique du diagnostic est en effet liée à celle de la maintenance, or celle-ci fait intervenir des facteurs économiques (coût de la maintenance par rapport au gain espéré), des facteurs humains (qualification, formation du personnel) et des facteurs industriels difficiles à évaluer [DID 04]. Le diagnostic des défaillances des systèmes industriels lorsqu'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Sa vocation première est de détecter et puis de localiser une possible défaillance des matériels.

Le travail proposé porte sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées. Ces dernières, de part leur robustesse, leur simplicité de construction et leur faible coût d'achat, sont largement utilisées en milieu industriel. Leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective, permettant en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations [CAS 03].

Tant dans le domaine du diagnostic que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer de modèles capables de représenter le comportement du système en présence de déséquilibres structurels. La mise au point d'une procédure de diagnostic pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui

doivent être résolus. L'un de ces problèmes est celui de la synthèse de modèles décrivant le comportement de la machine [KHA 09]. Ceci non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour décrire le plus précisément possible le comportement de la machine. Pour cela, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèles de type circuit, modèles multi-enroulements) pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente les techniques avancées pour le diagnostic des machines électrique.

Nous avons divisé ce mémoire en trois chapitres qui comprenaient les suivants:

Le **premier chapitre** présente les différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines électriques. Une étude bibliographique sur les différents types de défauts (électriques mécaniques,...) pouvant se produire dans les machines électriques est présentée ainsi que les méthodes de surveillance d'apparition de ces défauts. Dans le but de ne pas alourdir les chapitres.

Le **second chapitre** est consacré aux aux différentes techniques et méthodes employées dans le domaine de surveillance et de diagnostic.tout en mettant en avant les techniques de diagnostic avancées accompagnant la modernité de la machine..

Au **troisième chapitre** ,Nous avons mené une étude afin de faire une comparaison entre les différentes technologies avancées.et classement des techniques de diagnostic d'après leurs sensibilités expérimentales par l'effet court-circuit statorique.

Chapitre I:

Constitution et présentation des défauts de la machine asynchrone

Introduction:

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience.

C'est dans cette optique que cette thèse est orientée. Elle s'intéresse, en effet au développement des techniques et méthodes de surveillance et de diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence les défauts de stator, du rotor et le défaut de roulement.

L'objectif de ce premier chapitre est d'effectuer quelques rappels élémentaires sur les éléments de constitution de la machine asynchrone. A ce propos, nous nous intéressons à la réalisation des enroulements statoriques et des encoches rotoriques, nous effectuons ensuite une

présentation des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces éléments, en citant leurs causes et effets sur le comportement de la machine. Finalement nous rappelons brièvement les techniques de base couramment utilisées pour la détection des divers défauts.

Constitution de la machine asynchrone:

La machine asynchrone à cage est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor . Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux mêmes. La machine asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Le flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique est produit à partir de l'induction. Les circuits magnétiques statorique et rotorique sont réalisés par un empilement de tôles ferromagnétiques fines et découpées.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Il est réalisé par la mise en série et parallèle de spires élémentaires. L'organisation des spires est faite en fonction de la vitesse, du couple et des tensions d'alimentation désirées de la machine . Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. La résistance électrique de ces barres est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles. Les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'une barre rotorique à l'autre. Si ce type de réalisation ne permet pas véritablement d'obtenir une distribution sinusoïdale de courant à sa surface, il est par contre extrêmement robuste, peu coûteux, et donc très répandu . [KHA 12]

Stator :

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendantes. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. Le bobinage en lui-même nécessite toute une étude. [FAT 14]

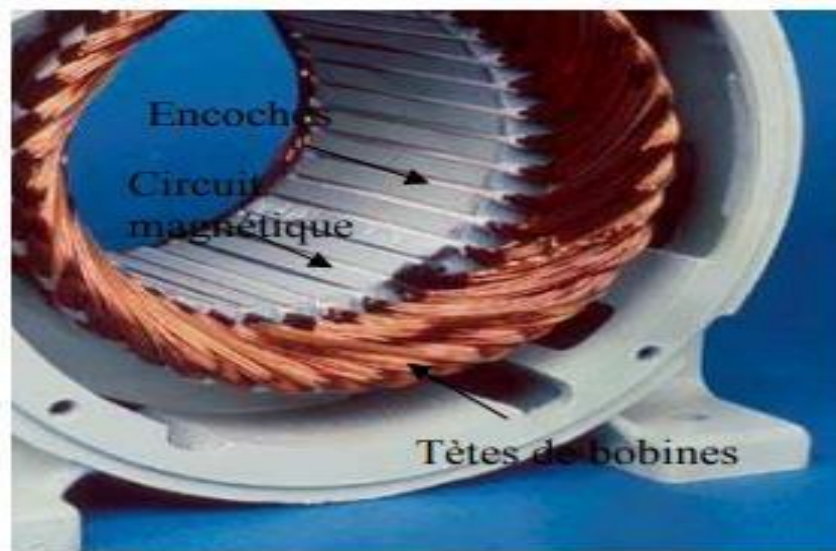


Fig.I.1. photo du stator d'une machine asynchrone [OND 06]

Rotor:

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très

peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. [BAC 02]

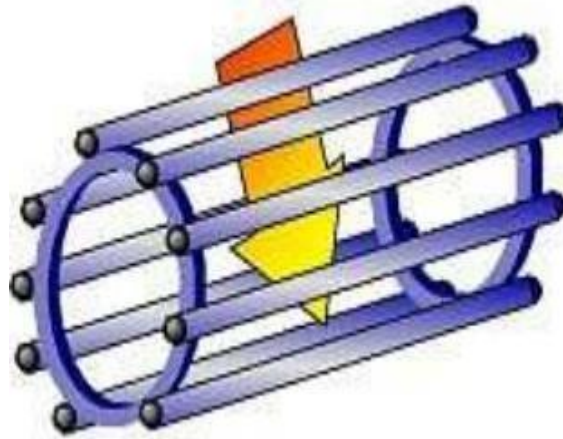


Fig.I.2. Rotor à cage d'écureuil

Organes mécaniques:

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demiaccouplement.

Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement

est fonction des plusieurs efforts :

** Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique

radiale,...etc.).

** Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.

** Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire).

Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries

des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour

les machines de petite et moyenne puissances.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer à un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...etc). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [OND 06]

Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω_s aux enroulements statoriques, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est

possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme Ω_s . Elle est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \text{ (tr/min)}$$

Ou f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

p : le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure I.4), le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [Laa 09]

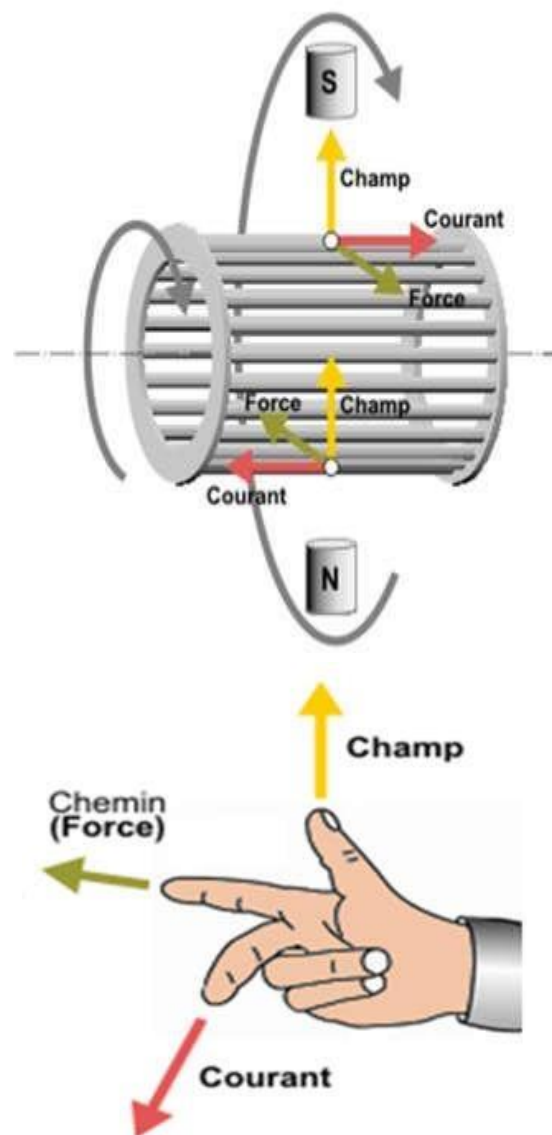


Fig. I.3. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [LAA 16]

I.3.1 Vitesse de glissement :

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse n tours par minute, soit Ω_r radians par seconde. La force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme n_s tours par minute. La vitesse Ω_r est généralement inférieure à Ω_s , on définit le glissement g ou la variation relative des vitesses par la formule suivante

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$$

n_r vitesse de rotation du rotor [tr/min],

n_s vitesse de rotation de synchronisme [tr/min],

Ω_r vitesse angulaire réelle de la machine [rd/s],

Ω_s vitesse de synchronisme [rd/s],

Si la vitesse Ω_r du rotor est égale à la vitesse Ω_s du champ tournant statorique alors, le rotor est fixe par rapport au champ statorique. Dans ce cas, il n'y a pas de mouvement relatif par rapport au rotor ($g=0$), les forces électromotrices induites et les courants rotoriques dans les bobinages du rotor sont nuls ainsi que leur pulsation ou par conséquent leur fréquence.

La vitesse du rotor est nulle (rotor bloqué, $g=1$) alors, le moteur se comporte dans ce cas comme un simple transformateur triphasé ayant un secondaire en court-circuit.

Dans le cas où $0 < g < 1$, le champ statorique induit dans les conducteurs du rotor des forces électromotrices et des courants de pulsation $g \cdot \omega_s$. L'interaction entre le champ d'induction, qui se déplace

à la vitesse $g \cdot \omega_s/p$ par rapport au rotor, et les courants de pulsation $g \cdot \omega_s$ induits dans celui-ci génère un couple dirigé dans le sens de la rotation de la machine

Classification des défauts dans la machine asynchrone et leurs techniques de diagnostic:

Au cours de sa durée de vie, la machine asynchrone est bien souvent soumise à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à un certain nombre de défaillances. Ces défaillances peuvent évidemment concerner les différents sous systèmes des entraînements électriques à savoir la mécanique proprement dite (arbre de transmission, réducteurs...) et les convertisseurs statiques associés. Dans cette partie, nous présentons les différents types de défauts apparaissant dans la machine asynchrone. Ces défaillances peuvent être d'origine diverses :

- mécaniques : mauvaise fabrication, vibrations de la machine, forces électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
- électriques : dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- thermiques : pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.
- environnementales : humidité, ozone, poussière

Ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être :

- un déséquilibre des courants de lignes et des tensions ;
- une augmentation des oscillations du couple ;
- une diminution du couple moyen ;

- une augmentation des pertes ;
- un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de système industriel sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kw à 200kw) a donné les résultats suivants (Fig.I.4)

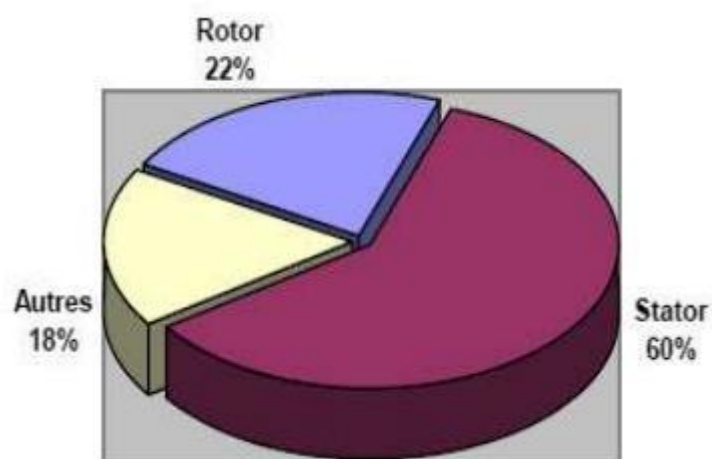


Fig.I.4. Proportion des défauts [PHU 07].

D'autres parts, les mêmes études montrent qu'en 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à, 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants pendant cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est établie comme suit :

Enroulements stator	51%	Tôles stator
9%		
Défauts au rotor	22%	Roulements
8%		10%
	Autres	

Une autre étude statistique faite sur des machines asynchrones de grande puissance (100KW à 1MW) a donné les résultats suivants:

Enroulements stator	13%	Couplage mécanique
4%		
Défauts au rotor	8%	Roulements
41%		
Autres	34%	

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ce type de machines ; ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ceux –ci exigent une maintenance mécanique accrue. [NAC 09]

Défaillances au stator:

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique, électrique, mécanique ou environnemental.

I .4.1. Défauts internes et externes:

Il existe deux types de défauts principaux : internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures 2 et 3. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...) alors que les défauts

externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine. D'après les organigrammes Figure 2 et Figure 3 les origines des défauts sont diverses : thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques. [LEB 06].

I .4.1.a. Court-circuit entre phases:

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage. [VAS 09]

I .4.1.b. Défaut de court-circuit entre phase et le bâti:

Le bâti a généralement un potentiel flottant. Mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel. Sauf que le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre,

concernant la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. Donc il est nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels par exemple). En présence de ce défaut, la tension de la phase concernée ne change pas mais le courant augmente à cause de la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température qui provoque un défaut d'isolement dans l'enroulement. De plus, ce défaut génère une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [SOU 12].

I .4.1.c. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires est un défaut fréquent, cette défaillance est causée par un défaut d'isolement dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation de courant statorique dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude dans les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifié les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquent une augmentation de la température au niveau de bobinage qui provoque une dégradation accélérer d'isolant, Ainsi, enchaînement des défauts. Mais le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [MOU 19].

I.4.2. Défaut d'isolant:

Ce type de défaut engendre des phénomènes thermiques qui se traduisent par l'augmentation de la température des différents constituants du moteur. Les différentes causes pour ce type de défaut sont:

- Dégradation de l'isolant à la fabrication ;
- Tension supérieure à la limite admise par le matériau d'isolation ;
- Courant élevé dû à un court-circuit, une surcharge ou à un défaut du convertisseur ;
- Vibrations mécaniques ;
- Vieillessement naturel des isolants ;
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

I.4.3 Décharge partielle:

Ce phénomène naturel dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteur et la masse s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesure classiques car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants.

[NAC 09]

Défaillances au rotor:

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse

de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [ABL 09]

Ruptures de barres:

Ces défauts apparaissent au niveau du rotor. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une barre 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, en plus, des défauts mécaniques. [SAL 12]



Fig.I.5. *Défaut d'une barre cassée.*

Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit:

Les cassures d'une portion d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou 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 de courant peuvent entraîner leur cassure. La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres.

Suite à l'apparition de ces défauts, la machine continue à fonctionner, il est donc très difficile de détecter ces défaillances si la machine est en régime de défauts. [BOU 01] .

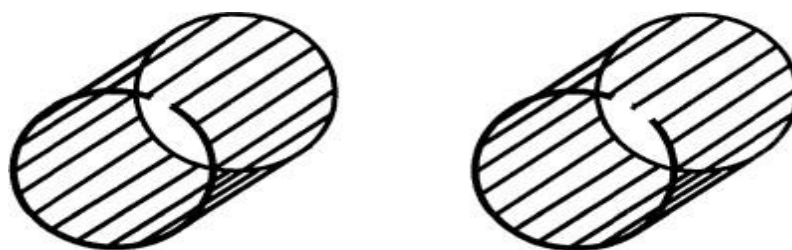


Fig.I.6. Rupture d'une et de deux portions d'anneaux

Excentricité statique et dynamique:

La machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de

l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication [CAS 03].

Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

l'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage 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, statique et dynamique.

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Fig.I.7. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui peut engendrer une dégradation de son isolant.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquences des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements. [KHA 12]

Défaillance d'ordre mécanique:

Les défaillances d'ordre mécaniques sont en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que rencontre la machine asynchrone . Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur tels que le défaut de balourd et de désalignement [SAM 16]

Défaillance de l'arbre:

L'arbre de la machine peut laisser apparaître 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 un arrêt immédiat de la machine asynchrone Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [TAB 02].

Défaillance des roulements à billes:

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau dès l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des

courants électriques peuvent circuler au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se solidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce genre de défaillances. [SAM 16]

I.6.3 .Défaillance des flasques:

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [ABD 17].

I .7.Conclusion:

Ce chapitre, a été consacré à la représentation des défauts pouvant se produire sur la machine asynchrone. Dans un premier temps, après avoir rappelé succinctement les éléments de constitution de la machine asynchrone, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition. Ensuite nous avons brièvement rappelé quelques de diagnostic utilisées pour la détection des défauts. Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser différents techniques diagnostic de la machine asynchrone.

Chapitre II:

Techniques avancées de diagnostic
des Machines Asynchrones MAS

Introduction:

Le diagnostic est une composante principale d'un module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

.Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous arborons sur les différentes approches de diagnostic est leurs domaines d'applications, avec un aperçu des types de méthodes de diagnostic en général applicables dans les cadres scientifiques.

Fiabilité du diagnostic:

Le diagnostic sera souvent facilité si l'expert dispose :

- de la fiche cinématique de la machine, d'un historique des pannes et des modifications apportées à la machine depuis sa mise en service.

- de l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature vibratoire initiale de l'installation considérée en bon état et leurs profils d'évolution. La signature initiale apporte dans ce cas à l'expert les éléments de référence qui lui permettront de statuer sur l'importance et la gravité des évolutions. L'établissement de la signature initiale d'une installation doit donc faire l'objet du plus grand soin et faire appel aux mêmes techniques et méthodologies d'investigation que le diagnostic . Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic mais sont rarement disponibles, tout au moins sous une forme facile à exploiter. Comme la fiabilité du diagnostic

repose avant tout sur l'identification de toutes les images vibratoires contenues dans les signaux délivrés par les capteurs, le traitement du signal joue un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase de l'identification systématique de toutes les images vibratoires nécessite de suivre une démarche rigoureuse en méthodologie.[Nac 09].

Etat de l'art des méthodes de diagnostic:

Différents types de maintenance:

Les différents types de maintenance utilisés dans les applications industrielles dépendent principalement du niveau de criticité du système considéré. Plus la criticité est importante, plus les moyens et donc le coût associé seront élevés [Phu 07]. On distingue :

- La maintenance préventive. Celle-ci consiste à changer les systèmes à date fixe prédéterminée. Le coût associé est important.
- La maintenance corrective. L'évaluation du système est réalisée fréquemment grâce à une instrumentation supplémentaire. Notons que plus cette évaluation est fréquente plus les coûts d'immobilisation du système seront réduits. C'est dans le cadre de la maintenance corrective que l'utilisation de méthodes de diagnostic devient fondamentale. En effet, plus le diagnostic sera précis, plus l'intervention sera courte.
- La maintenance prédictive. L'intervention est effectuée avant l'apparition des défauts.

Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone:

Durant les deux précédentes décennies, des recherches ont été menées sur la façon dont on pourrait détecter une défaillance et d'y comprendre la

relation cause à effet, permettant ainsi d'améliorer la fiabilité du moteur asynchrone. La recherche des signatures ou indicateurs de défauts a pour but de caractériser le fonctionnement du système en identifiant le type et l'origine de chacun de ces défauts, ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalie survenant aux différents niveaux de processus et avoir une chaîne de production de plus en plus sûre. Il existe plusieurs méthodes de détection et de diagnostic, le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système mais aussi la complexité de ce système. [Abb 16]

Détection à partir des méthodes internes (connaissance a priori): [Abb 16]

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus. Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle de défaut. Nous pouvons citer trois approches qui peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- .. La surveillance par les observateurs.
- .. La surveillance par la méthode des résidus.
- .. La surveillance par estimation paramétrique.

Le principe général de ces méthodes est illustré par la **Fig. II.1.**

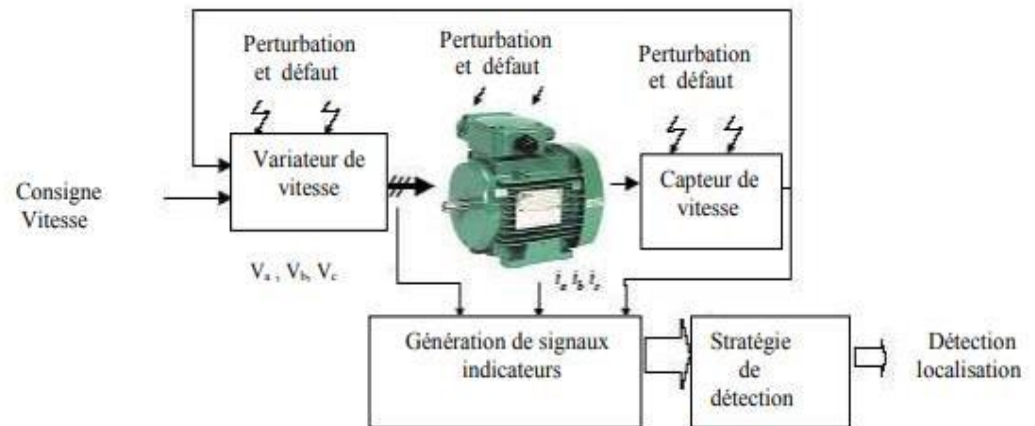


Fig. II.1. Principe général de diagnostic à base de modèle [Bac 02]

Les observateurs sont généralement utilisés dans la synthèse des lois de commande des machines à induction. Ils sont choisis et calculés en fonction du critère de stabilité et de performances. Un défaut se traduisant par la rupture des hypothèses d'équilibre du modèle, il peut se révéler dans la rupture des grandeurs observées par rapport aux grandeurs mesurées, la comparaison de la sortie réelle avec la sortie observée peut donc fournir des informations exploitables pour la détection et la localisation des défauts.

Comme pour les observateurs, la méthode des résidus consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller [Bac 02]. Ce modèle est de manière générale constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbation, entrée inconnue) et variables connues (consigne, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient.

Concernant la détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des

paramètres physiques au cours de fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence des défauts. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux de système étudié. Les paramètres peuvent aussi être identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le filtre de Kalman [Ond 06] . En tant qu'un algorithme l'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances (en fonction de la température) ou encore la variation des inductances (en fonction du niveau de saturation). Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance correspondant au type de défaut que l'on voudra détecter [Did 04].

Détection à partir des méthodes externes (sans connaissance a priori): [Abb 16]

Ces méthodes se basent sur l'analyse spectrale des signaux ou des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement telle que les courants, le couple estimé et les flux. Le principe de ces méthodes repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain et défaillant du procédé . La première étape est basée sur la connaissance du système sain (par mesure ou par modèles numériques). La deuxième étape consiste ensuite en une création « artificielle» de défaut (à nouveau par modèle numérique).

La signature du défaut, c'est à-dire sa répercussion sur certaines grandeurs, est alors identifiée. Une observation est ensuite réalisée sur un convertisseur réel [Phu 07]. Une analyse est portée sur les grandeurs (approche traitement du signal) consistant en la reconnaissance de

signatures de défauts déjà connues. Nous nous intéressons aux méthodes reposant sur l'analyse fréquentielle par mesure des grandeurs suivantes :

.. La surveillance des vibrations avec des capteurs de vibrations (accéléromètres...)

.. La surveillance du couple électromagnétique. ..

.. La surveillance du flux.

L'analyse du courant de phase avec la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis) parce que les machines sont généralement équipées d'un capteur de courant ;

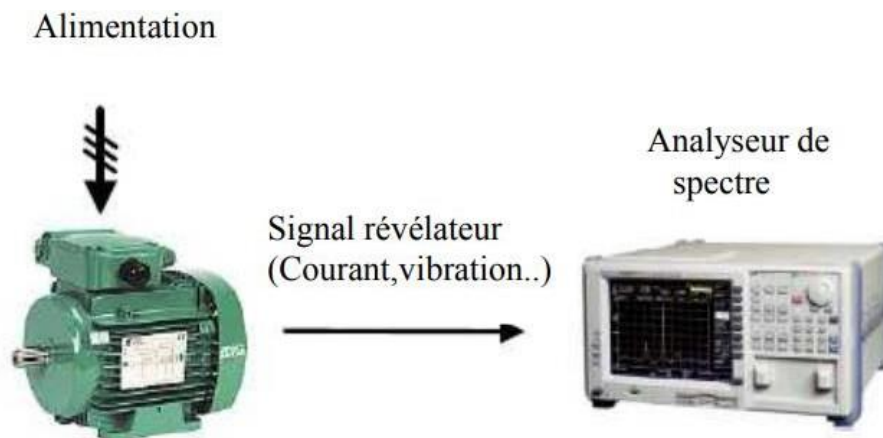


Fig. II.2.Principe de la surveillance par analyse spectrale [Bachir,02]

Les grandeurs mesurées sont analysées du point de vue spectrale. En effet, en ce qui concerne la détection de la présence d'un défaut dans la machine asynchrone, les méthodes de diagnostic sont classiquement basées sur l'analyse fréquentielle des signaux en utilisant une transformée de Fourier .En effet, une comparaison de l'amplitude des composantes signataires de défaut avec un seuil de référence (seuil calculé lorsque la machine est saine) est utilisée pour détecter la présence d'une anomalie.

Analyse des signaux vibratoires:

L'analyse vibratoire de la machine peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales . Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés [CAS 03]. Cependant cette analyse comporte les inconvénients dus au problème d'accessibilité et des difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut. De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux

[CHE 14]

Analyse du couple électromagnétique:

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, le spectre fréquentiel du couple électromagnétique laisse apparaître des composantes supplémentaires. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Les oscillations du couple provoquées par certains défauts rotoriques peuvent servir à détecter ceux-ci

[OND 06]. Il a été montré par une analyse théorique et des essais comment le spectre du couple se trouve modifié lorsqu'un des deux

anneaux d'une cage est cassé. Les fréquences d'encoches présentées dans le spectre du couple sont données par [CAS 03]

Analyse du flux:

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statorique sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts.

[CHE 14]

Analyse du vecteur de Park:

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park [DID 04]. En fonction des courants de phases $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$, les courants de Park $i_d(t)$, $i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux relations suivantes:

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t)$$

En présence d'une barre cassée, le courant absorbé par le moteur asynchrone contient des composantes latérales de part et d'autre de sa composante fondamentale dont les fréquences sont données par la relation:

$$(1 \pm 2kg). f_s$$

Ces composantes seront, par conséquent, aussi présentes dans les courants de Park $i_d(t)$, $i_q(t)$. Dans ces conditions, il est très simple de montrer que le spectre du module $\sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2}$ contient une composante continue générée par la composante fondamentale du courant statorique plus des composantes de fréquence $2kg. f_s$. De cette façon, le spectre des courants de Park, en éliminant préalablement la composante continue, ne contiendra que les composantes spécifiques au défaut de la machine [BOU 01]. Il sera alors plus facile de détecter ces composantes et de diagnostiquer la présence d'un défaut rotorique. [DID 04]

Diagnostic par les analyses chimiques

La plus part des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec échangeur de chaleur refroidi à l'eau, la dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [BES 13].

analyse de la température : La Thermographie:

Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts, (**Fig. II.3.**). En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, (**Fig. II.4.**) [BAZ 16]

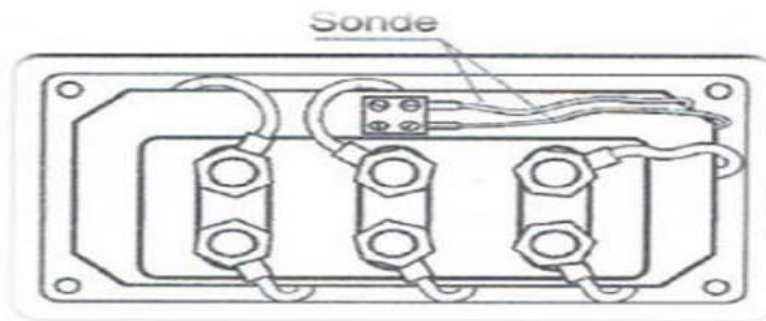
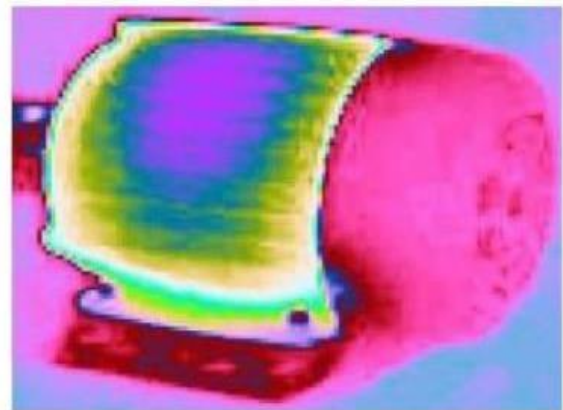


Fig. II.3. Capteur de température dans une plaque à bornes [BAZ 16]



(a) moteur sain



(b) moteur en défaut avec 40% court-circuit de la bobine d'une phase

Fig. II.4. Image colorée infrarouge thermique [BAZ 16]

Analyse des courants statoriques:

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre résultant contient des renseignements sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone. Dans cette analyse fréquentielle, il est préférable de faire une étude globale sur les courants, car un défaut au rotor est visible sur le spectre des trois courants de lignes.[NAC 09]

Principe de diagnostic de défaut:

Redondance physique (matérielle):

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeur et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a une faute ou non. Elle entraîne un coût important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter [KHE 15].

Redondance analytique:

Son rôle est d'exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces dernières peuvent s'exprimer sous la forme de relation analytique liant les variables connues (relation entrée/sortie ou sortie/sortie). Le diagnostic utilisant la redondance analytique consiste à vérifier si les relations analytiques sont égales à zéro en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller [CHR 01] ,[PAT 91] .

II .5. Harmoniques de courant de stator dans le moteur à induction:

Le champ d'entrefer d'un moteur à induction alimenté par une forme d'onde d'alimentation en tension sinusoïdale comprend une large gamme d'harmoniques spatiales différentes

[BOU 01].

L'analyse suivante suppose que ces harmoniques de flux d'entrefer résultent de l'interaction de la perméance d'entrefer avec ondes de force magnéto motive harmonique (MMF) .Sachant que seules les harmoniques dues à les entailles sont considérées ici (harmoniques de fente du rotor). Dans [BOU 01], les harmoniques des fentes du rotor (RSH) générés dans le courant de ligne de stator sont présentés pour une machine saine à des fréquences

données :

$$f_{RSH}(k, s) = |(1 \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g)) f_s|_{r_i, 2, 3}$$

Où, k : est un entier positif, "1" est une harmonique fondamentale , g : est le glissement, N_r : Nombre de barres rotoriques, p : est le nombre de paires de pôles, f_s : Fréquence d'alimentation .

Pour un enroulement de stator formé de trois bobines identiques et alimenté par un système de tension équilibrée, un doit trouver, seuls les courants (induits par induction), le rang est impair, et n'est pas un multiple de Trois. Par conséquent, nous notons que seule la RSH qui est sa commande appartient à l'ensemble suivant peut être détecté [BOU 01]:

$$G = \{((\frac{kN_r}{p} \pm 1)_{k-1, 2, 3, r}) \cap (6v \pm 1)_{v-1, 2, 3, \dots}\}$$

v : est un entier positif

Par contre, et dans la pratique, il y a toujours un certain déséquilibre statorique des différents origines (problèmes de tension d'alimentation ou asymétrie résiduelle dans les enroulements statoriques ou neutre connexion); dans ce cas, toutes les harmoniques, même celles ayant un rang multiple de trois seront présent dans le spectre du courant statorique. Enfin, nous pouvons voir que pour un fonctionnement sain, le courant statorique d'une cage de moteur à induction se compose de deux séries d'harmoniques [ALL 16]:

1- Une série d'harmoniques du temps (TH) de fréquence:

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s$$

2- Une série d'harmoniques de fentes de rotor (RSH) de fréquence:

$$f_{RSH}(h, k, g) = (h \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g)) f_s \text{ | ou } S^\pm = | (hf_s \pm kN_r f_r)$$

Où, $h=1,3,5, \dots$ est l'ordre harmonique temporel.

Et dans la pratique, nous avons également d'autres harmoniques appelées (Rotor Bar Fault Harmonics) (RBFH), en raison des asymétries inhérentes à la cage du rotor. Par contre, on remarque l'excentricité Harmoniques de défaut (EFH) en raison du niveau inhérent d'excentricité mixte. Nous pouvons voir que pendant un fonctionnement sain, le courant statorique d'une cage de moteur à induction se compose de deux autres série d'harmoniques donnée par [SAH 14]- [SAH 10]- [ZOU 10]- [KEC 13]:

3- Une série d'harmoniques de défaut de barre de rotor ((RBFH) de fréquence

$$f_{RBFH}(h, k, g) = |(h \pm 2kg)f_s| \text{ ou } R^\pm = |(h \pm 2kg)f_s|$$

4- Une série d'harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) de fréquence

$$f_{EFH}(h, k, g) = |(h \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g)) f_s| \text{ | ou } E^\pm = |(hf_s \pm kN_r f_r)|$$

Où: $f_r = (\frac{N_r}{p}(1 - g))f_s$: est la vitesse mécanique du rotor.

II .6. Théorie de la transformée de Hilbert:

La transformée de Hilbert est un opérateur linéaire qui prend un signal $s(t)$ et produit une transformée $H(t)$ dans le même domaine. L'opérateur peut être considéré comme une convolution dans le domaine temporel définie par l'équation suivante [ALL 17]:

$$\tilde{S}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

La forme complexe du signal est connue sous le nom de signal analytique. Le complexe unique la représentation d'un signal réel $s(t)$ est donnée par [AHA 12]:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{S}(t)_{\text{Re}} + j\tilde{S}(t)_{\text{Im}}$$

En utilisant le théorème de la valeur moyenne, nous pouvons évaluer [AHA 12]:

$$\tilde{S}(t) = \frac{1}{\pi t} \otimes S(t)$$

Par conséquent, la transformée de Hilbert est obtenue si le signal d'origine, $s(t)$, est convolué avec si le signal est de la forme, $a(t) \cdot \cos\phi(t)$. Qui est comme un vrai signal et peut être écrit comme [AHA 12]:

$$\begin{aligned} \tilde{S}(t) = \tilde{S}(t)_{\text{Re}} + j\tilde{S}(t)_{\text{Im}} &= a(t)\cos \Phi(t) + jH[a(t)\cos \Phi(t)] \\ \text{Ou, } S(t) &= a(t)[\cos \Phi(t) + j\sin \Phi(t)] \\ \text{Ou, } S(t) &= a(t)e^{j\Phi(t)} \end{aligned}$$

La transformée de Hilbert produit une série chronologique complexe. L'enveloppe, qui est la magnitude de cette série chronologique complexe, est une représentation de l'estimation de la modulation contenue dans le signal dû aux bandes latérales (l'amplitude instantanée $a(t)$), tel que défini par l'équation suivante [BAC 12]:

$$a(t) = \sqrt{\tilde{S}(t)_{\text{Re}}^2 + \tilde{S}(t)_{\text{Im}}^2}$$

La fonction de modulation de phase (phase instantanée) $\Phi(t)$ est exprimée comme [BAC 12]:

$$\Phi(t) = \arctan \frac{\tilde{s}(t)_{\text{Im}}}{\tilde{s}(t)_{\text{Re}}}$$

Les approches de diagnostic des défauts les plus utilisées:

Détection de défaut à l'aide de l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA):

Mathématiquement, l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA) est définie par le équations précédentes .

La transformée de Hilbert d'un courant statorique, appelé signal analytique, est donnée par le expression suivante [SAH 14].[SAH 10]:

$$i_{sa}(t) \Rightarrow i_{sa}(t) = i_{\text{Re}}(t) + j i_{\text{Im}}(t)$$

L'amplitude instantanée selon l'équation (22), d'un courant statorique est obtenue par l'équation ci-dessous [SAH 14].[SAH 10]:

$$|i_{sa}(t)| = \sqrt{i_{\text{Re}}(t)^2 + j j_{\text{Im}}(t)^2}$$

Cette approche se construit donc principalement sur les étapes suivantes:

- 1) Détermination de l'amplitude instantanée pour chaque courant

statorique: $|i_{sa}(t)|$, $|i_{sb}(t)|$ et $|i_{sc}(t)|$

2) Calcul des composants suivants: i_{dP-H} et i_{qP-H}

$$i_{dP-H} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) |\tilde{i}_{sa}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) |\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) |\tilde{i}_{sc}(t)|$$

$$i_{qP-H} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) |\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) |\tilde{i}_{sc}(t)|$$

3) Enfin, l'approche produit vectorielle (HPVPA) de Hilbert Park est obtenue par Analyse d'expression FFT:

$$HPVPA = i_{dP-H} \times i_{qP-H}$$

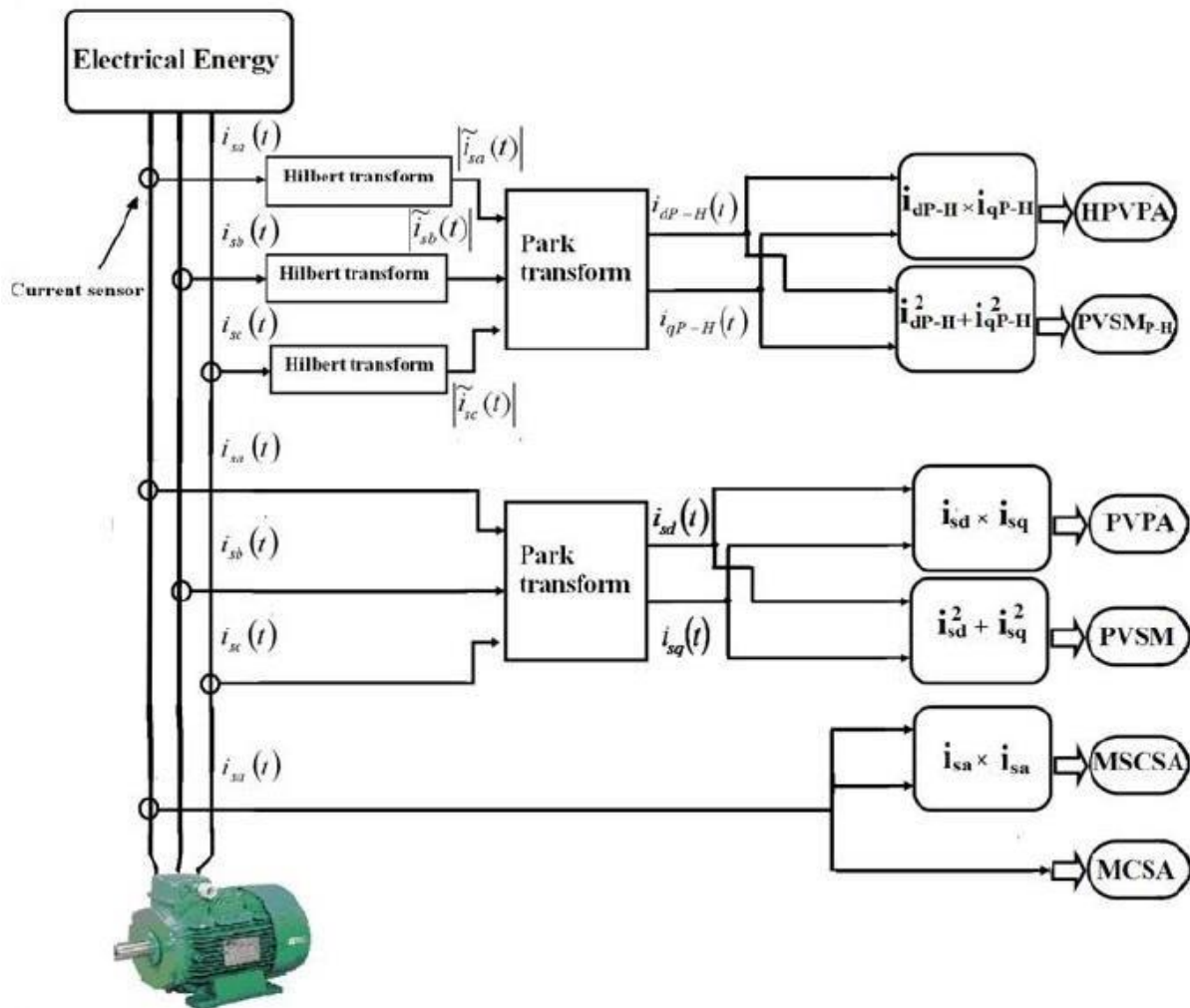


Fig. II.5. Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches

Analyse de la signature du courant carré du moteur

MSCSA:

L'approche MCSA utilise l'analyse spectrale d'un courant de phase de stator de moteur. La proposition L'approche repose principalement sur l'analyse spectrale du courant de phase du stator carré. Dans ce approche proposée MSCSA, pour un moteur sain le spectre du courant carré a un

composante fondamentale à la fréquence $2 f_s = \frac{2\omega_s}{2\pi}$ avec un composant DC, [PIR 12]:

$$MSCSA = i_{sa}^2(t)$$

Le calcul analytique est simplifié et seules les harmoniques dont l'amplitude est important sera de prendre en considération. Donc, les

harmoniques: $\hat{I}_{R-k}^{\pm}, \hat{I}_{E-k}^{\pm}, \hat{I}_{R-k}^{\pm}, \hat{I}_{S\pm k}^{\pm}$

sera négligé et $\hat{I}_{S\pm k}^{\pm}, \hat{I}_{E\pm k}^{\pm}$

Par conséquent, nous calculons successivement et séparément les expressions suivantes

$$a) h = 1, TH = f_s, k = 1R^{\pm} = (1 \pm 2s)f_s$$

$$b) h = 1, TH = f_s, k = 1S^{\pm} = |f_s \pm N_r f_r|$$

$$c) h = 1, TH = f_s, k = 1E^{\pm} = |f_s \pm k f_r|$$

$$\begin{aligned} & \hat{i}_{sa}(t)_{healthy} \\ & = \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) + \hat{I}_{R-k} \cos(2\pi(1 - 2s)f_s t) + \hat{I}_{R+k} \cos(2\pi(1 \\ & + 2s)f_s t) \end{aligned}$$

Le courant de phase carré instantané est donné par [11] et après remplacement dans son équation , nous trouvons notre expression suivante:

$$\begin{aligned}
 MSCSA = i_{sa}^2(t)_{healthy} &= \left(\frac{\hat{I}_{TH1}^2}{2} + \frac{\hat{I}_{R-k}^2}{2} + \frac{\hat{I}_{R+k}^2}{2} \right) \\
 &+ \left(\frac{\hat{I}_{TH1}^2}{2} + \hat{I}_{R-k} \hat{I}_{R+k} \right) \cos(2\pi(2f_s)t) + (\hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R-k} + \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R+k}) \cos(2\pi s(2f_s)t) \\
 &+ \hat{I}_{R-k} \hat{I}_{R+k} \cos(2\pi s(4f_s)t) + \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R-k} \cos(2\pi(1-s)(2f_s)t) \\
 &+ \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R+k} \cos(2\pi(1+s)(2f_s)t) + \frac{\hat{I}_{R-k}^2}{2} \cos(2\pi(1-2s)(2f_s)t) \\
 &+ \frac{\hat{I}_{R+k}^2}{2} \cos(2\pi(1+2s)(2f_s)t)
 \end{aligned}$$

L'équation 31 montre une composante CC, une composante de fréquence $s \cdot 2f$ et des composantes harmoniques à fréquences $(1 \pm ks)2f_s$, $(1 \pm 2ks)2f_s$

Le spectre de ce courant carré, présenté qui présenté dans la figure 5, contient des composants supplémentaires à des fréquence $2skf_s$ [11,28]

Méthode Park-Hilbert (PVSM_{P-H}):

Mathématiquement, la méthode de Park-Hilbert est définie par les équations. et utilisé par [8-10] mais l'Eq. (27) est modifié par l'expression suivante :

$$PVSM_{P-H} = \left(\sqrt{i_{dP-H}^2 + i_{qP-H}^2} \right)^2$$

Approche du produit vectoriel de Park (PVPA):

Notre dernier article [13, 14] dans lequel nous avons utilisé "l'approche du produit vectoriel de Park (PVPA) pour diagnostic des moteurs à induction »est principalement basé sur le produit de i_d avec le courant i_q (voir Fig. 1):

$$PVPA = i_{sd}(t) \cdot i_{sq}(t)$$

Nous simplifierons le calcul analytique et nous ne prendrons en considération que

Harmoniques de défaut d'excentricité avec:

$$i_{sd}(t)_{healthy} = \frac{\sqrt{6}}{2} (I_{TH1} \sin(2\pi f_s t) + I_{E-1} \sin(2\pi(f_s - f_r)t) + I_{E+1} \sin(2\pi(f_s + f_r)t))$$

$$i_{sq}(t)_{healthy} = \frac{\sqrt{6}}{2} (I_{TH1} \cos(2\pi f_s t) + I_{E-1} \cos(2\pi(f_s - f_r)t) + I_{E+1} \cos(2\pi(f_s + f_r)t))$$

Dans cette situation, le PVPA est donné par:

$$i_{sd}(t) \cdot i_{sq}(t) = \frac{3}{4} \hat{I}_{TH1}^2 \sin(2\pi(2f_s)t) + \frac{3}{4} \hat{I}_{E-1}^2 \sin(2\pi(2(f_s - f_r))t) + \frac{3}{4} \hat{I}_{E+1}^2 \sin(2\pi(2(f_s + f_r))t) - \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{E-1} \sin(2\pi(2f_s - f_r)t) + \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{E+1} \sin(2\pi(2f_s + f_r)t) + \frac{3}{2} \hat{I}_{E-1} \hat{I}_{E+1} \sin(2\pi(2f_r)t) + \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} (\hat{I}_{E-1} - \hat{I}_{E+1}) \sin(2\pi(f_r)t)$$

Eq. (44) a une composante à la fréquence $2f_s$, des composantes de bande latérale à $(2f_s \pm f_r)$ et $2(f_s \pm f_r)$ et les composants supplémentaires en f_r , $2f_r$. Fig. 7 présente le spectre des PVPA et ces harmoniques avec $f_r = f_s((1 - s)/p)$ / est une fréquence du rotor et p est un nombre de paires de pôles.

II .8.Conclusion:

Le monde des machines électriques a connu un développement rapide en termes de diagnostic des défauts et pannes. Dans ce chapitre, nous avons abordé de nombreux principes et méthodes de diagnostic des défauts et pannes des machines électriques asynchrones, en particulier les plus avancées.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons une comparaison entre des techniques de diagnostic avancées sous certaines conditions.

Chapitre III:

**ETUDE COMPARATIVES DES
TECHNIQUES
AVANCEES DE DIAGNOSTIC
DE LA MAS**

Introduction :

Malgré les qualités des machines asynchrones, elles peuvent parfois présenter au stator et / ou rotor différents types de défauts provoquant un vieillissement prématuré. La recherche des signatures ou indicateurs de ces défauts a pour but de caractériser le fonctionnement de la machine en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts, ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalie survenant aux différents niveaux de la machine [Cas03]. Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle sont cependant différents, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles spécifiquement dédiés à la simulation des défauts .L'objectif de cette partie est l'élaboration d'un modèle de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence de défaut de court-circuit entre-spines sur la même phase du stator, ce défaut peut apparaitre soit au niveau des têtes de bobines (croisement des faisceaux) soit dans les encoches, ce qui entraine une diminution de nombre de spires de la bobine.

Nous présenterons, dans ce chapitre, une étude comparative, par l'analyse spectrale des signaux temporels dans le domaine fréquentiel, en utilisant la transformée de Fourier rapide « Fast Fourier Transformation » (FFT), qui est utilisée depuis des décennies pour la détection des anomalies surtout dans les ME :principalement les courts-circuits entre spires statoriques. Ces nouvelles techniques d'analyse spectrale est, en particulier, utilisée dans les ME, alimentées directement par le réseau électrique, et qui fonctionnent en régime permanent [MAG 06], [ALL 10].

III.2.1. Description de l'outil d'extraction du signal:

Les différents défauts qui affectent la MAS vont donner naissance à une influence sur les signaux issus de cette ME par la modulation de leurs amplitudes aux fréquences caractéristiques de ces défauts. Il faut prendre avec soin une résolution très satisfaisante pour faire paraître clairement les différentes raies additionnelles les bandes latérales pour pouvoir analyser aisément et diagnostiquer notre ME [RAZ 03],[ALL 10].

A titre d'exemple, nous allons faire des essais avec notre banc expérimental qui a un MAS avec deux barres cassées en pleine charge puis en faible charge .

On va choisir pour cela, une fréquence d'échantillonnage : $F_e = 1000$ Hz, une durée d'acquisition de $T_a \approx 10$ secondes, ce qui implique que le nombre total d'échantillonnage ($N_e = F_e * T_a$) : la résolution de nos résultats est égale donc $\Delta f = F_e / N_e = 0.1$ Hz.

2. Paramètre et régime de fonctionnement du moteur utilisé:

Le moteur utilisé, est triphasé, 3 kW, 50 Hz, 2 pôles, à cage d'écurieuil avec 28 bars au rotor et 360 spires en série par phase **(voir'annexe).Laboratoire génie électrique université Biskra**

Les Fig .III.1 - Fig .III.10, montrent l'évolution des signatures et leurs amplitudes et leurs fréquences spécifiques des différentes approches en fonction de l'état du moteur et en prenant:

- 1) – Défaut statorique: - les courts-circuits entre 4 spires d'un enroulement statorique
- 2) - Moteur sous différentes conditions de fonctionnement :
 - à faible charge (25%) avec $g = 0,014$
 - à pleine charge (100%) avec $g = 0,034$.

Etude comparative d'après le spectre logarithmique:

III.3.1 Discussion des résultats expérimentaux:

La **Fig .III.1** nous présente le spectre **MCSA** et nous permet de voir clairement les fréquences spécifiques des signatures pour chaque type de défauts données dans la partie théorique de ce présent travail qui confirme l'exactitude des équations mathématiques.

D'autre part, les **Fig .III.1 - Fig .III.10** nous permettent de voir aussi les signatures caractéristiques des différents défauts de diverses techniques récentes déjà utilisées, représentées ci-dessus.

Pour montrer la sensibilité des nouvelles approches ou méthodes **l'une par rapport aux autres** techniques, nous avons fait une étude comparative entre les différentes approches afin de savoir : quelle

approche jouit-elle de la meilleure sensibilité ? Les différentes techniques sont présentées dans la **Fig .III.1 - Fig .III.10**.

Afin de faire une bonne comparaison entre ces approches, nous devons aussi choisir les fréquences spécifiques de signatures dont l'amplitude est la plus grande. Les fréquences des signatures caractéristiques des défauts statoriques sont donnés dans **Tab. III.1** qui suit:

Tableau.III. 1 Fréquences caractéristiques des défauts

Approches	Défaut statorique Court-circuit entre spires
PVPA 2016	$2f_s \pm f_r$ a
HPVPA 2019	f_r
PVSM_{P-H}	f_r
MSCSA 2013	$2f_s \pm f_r$ a
MCSA	$f_s \pm f_r$ a

a : on prend la signature dont l'amplitude est la plus grande (avec + ou -)

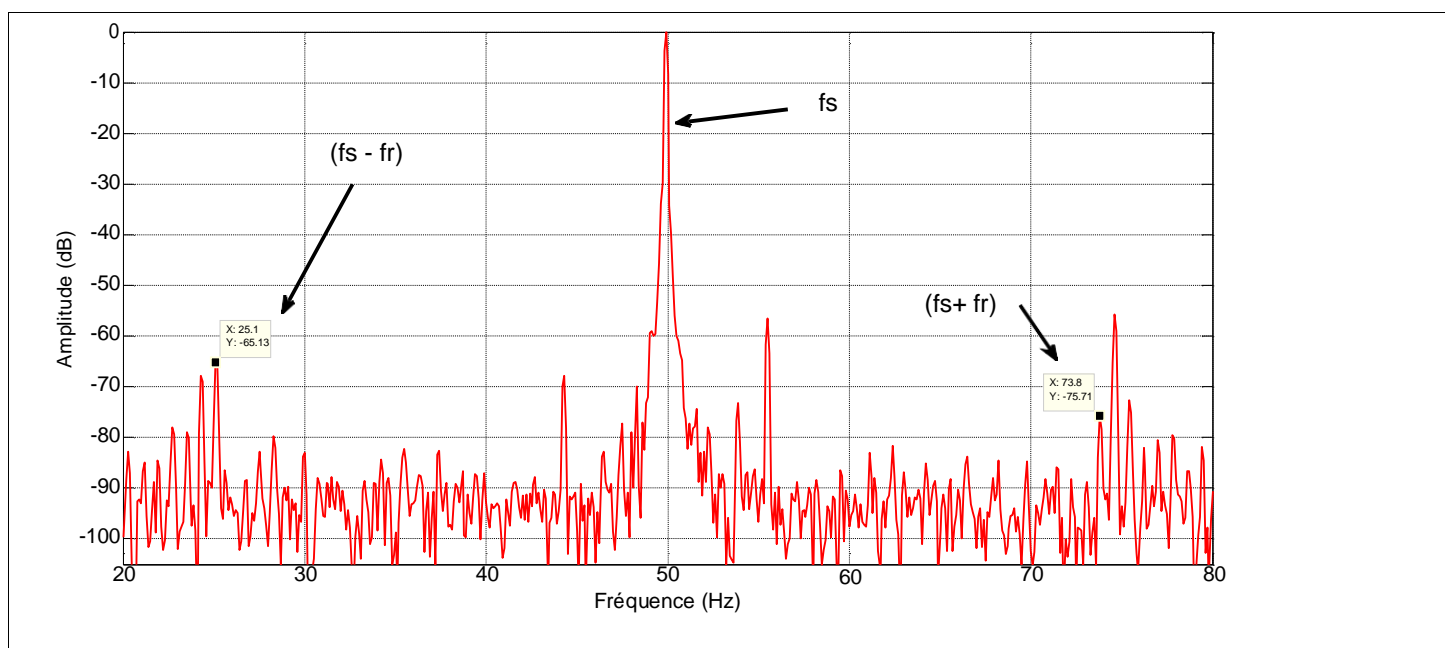


Fig .III.1. Spectre logarithmique expérimental du MCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge.

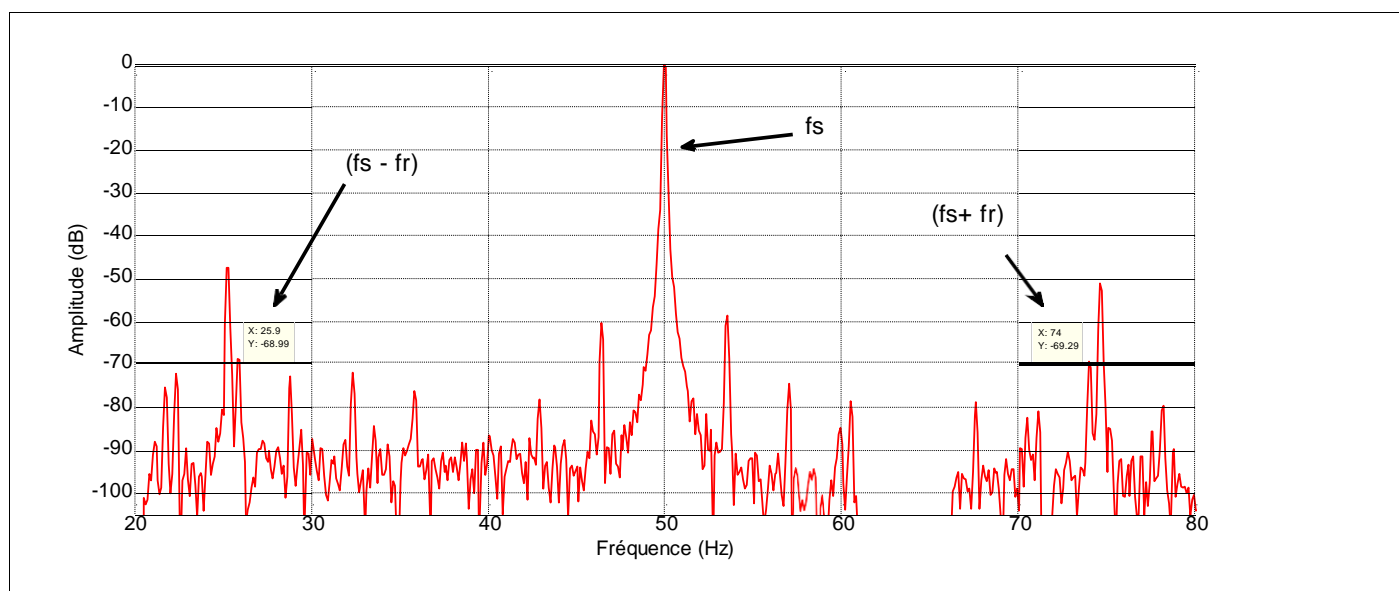


Fig .III.2. Spectre logarithmique expérimental du MCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge

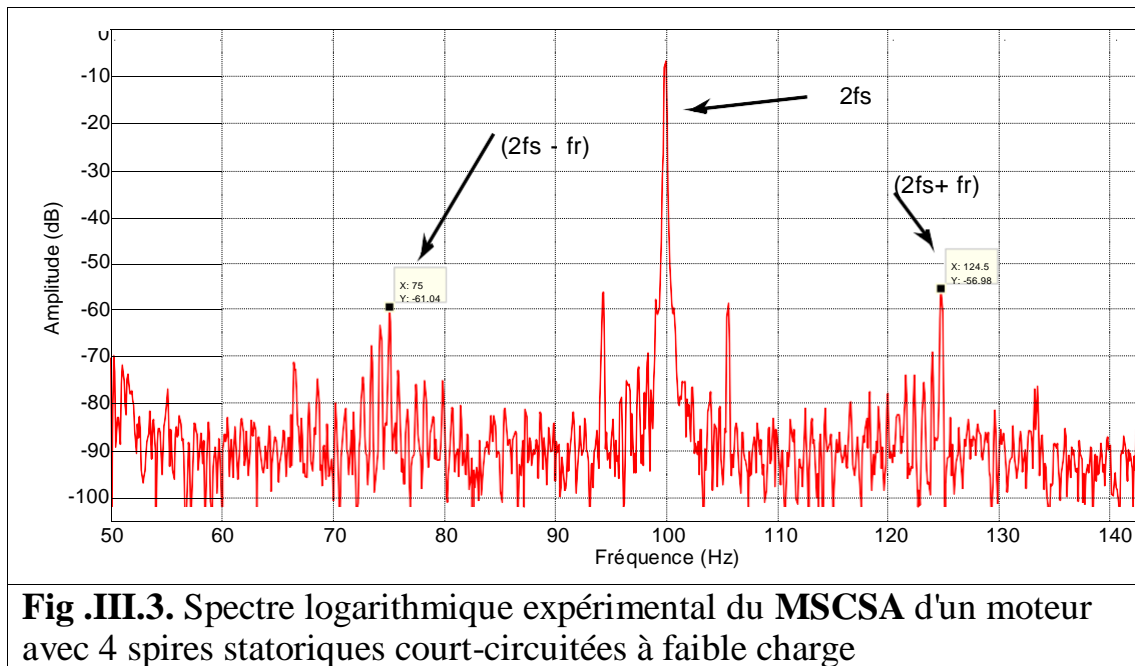
D'après le **Tab. III.1** et la **Fig.III.1**, la fréquence de la signature de **MCSA** dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à $f_s \pm f_r$,

* **A faible charge** le glissement vaut $g = 0.014$, la fréquence dont la signature est: $f_{ccs} = 25.1 \text{ Hz}$

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: **-65.13 dB**

* A **pleine charge**, le glissement égale $g=0.034$, la fréquence vaut : $f_{ccs} = 25.9 \text{ Hz}$, la fréquence trouvée selon la **Fig.III.2** :

- avec 4 spires statoriques court-circuitées : **-68.99dB**



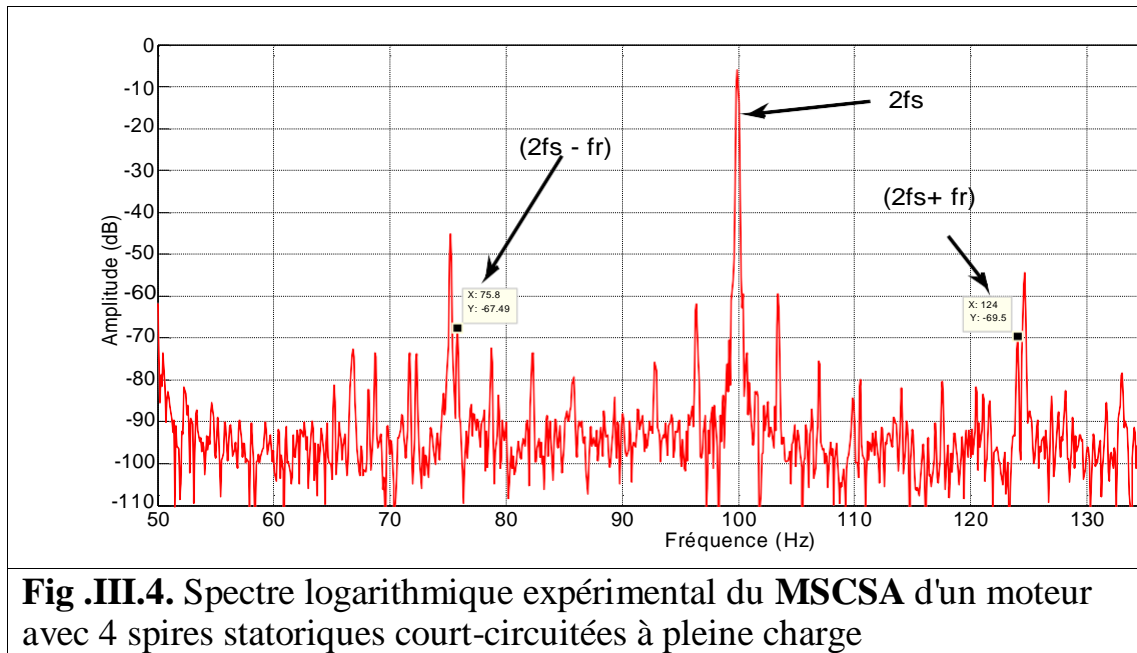


Fig .III.4. Spectre logarithmique expérimental du MSCSA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge

D'après **Tab. III.1** et la **Fig.III.3** la fréquence de la signature de MSCSA dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à $2f_s \pm f_r$

*

A faible charge le glissement vaut $s = 0.014$, la fréquence théorique : $f_{ccs} = 124.5$ Hz, la fréquence analytique de simulation selon la **Fig.III.3**: $f_{c.b.s} = 99.3$ Hz avec de 0.1 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -56.98 dB

* A pleine charge le glissement vaut $s = 0.034$, la fréquence théorique calculée : $f_{ccs} = 75.8$ Hz, la fréquence analytique de simulation selon la **Fig.III.4**: $f_{c.b.s} = 96.25/96.26$ Hz avec de 0.05/0.06 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -67.49 dB

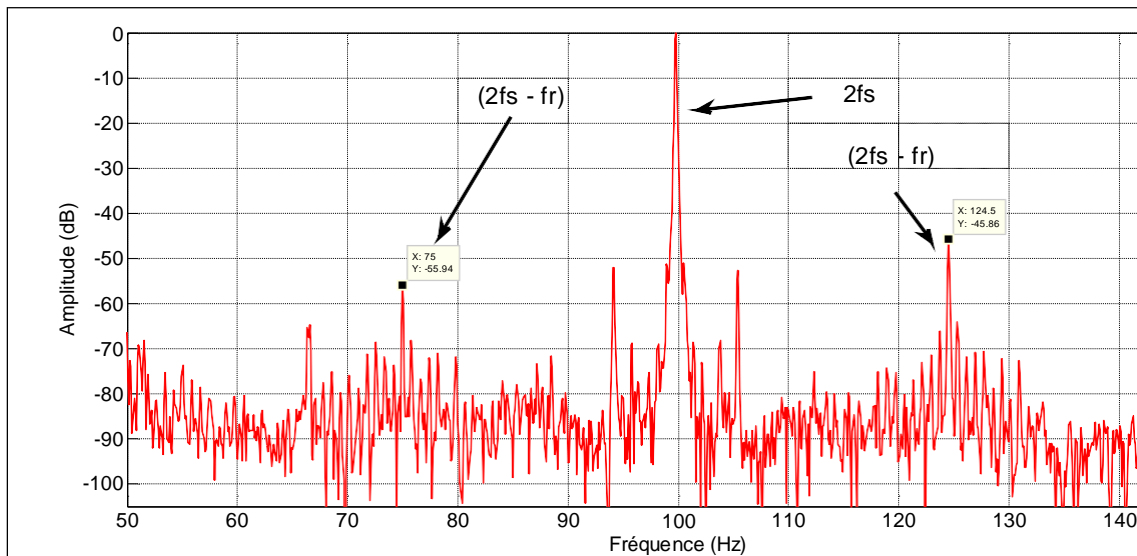


Fig.III.5. Spectre logarithmique expérimental du PVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge

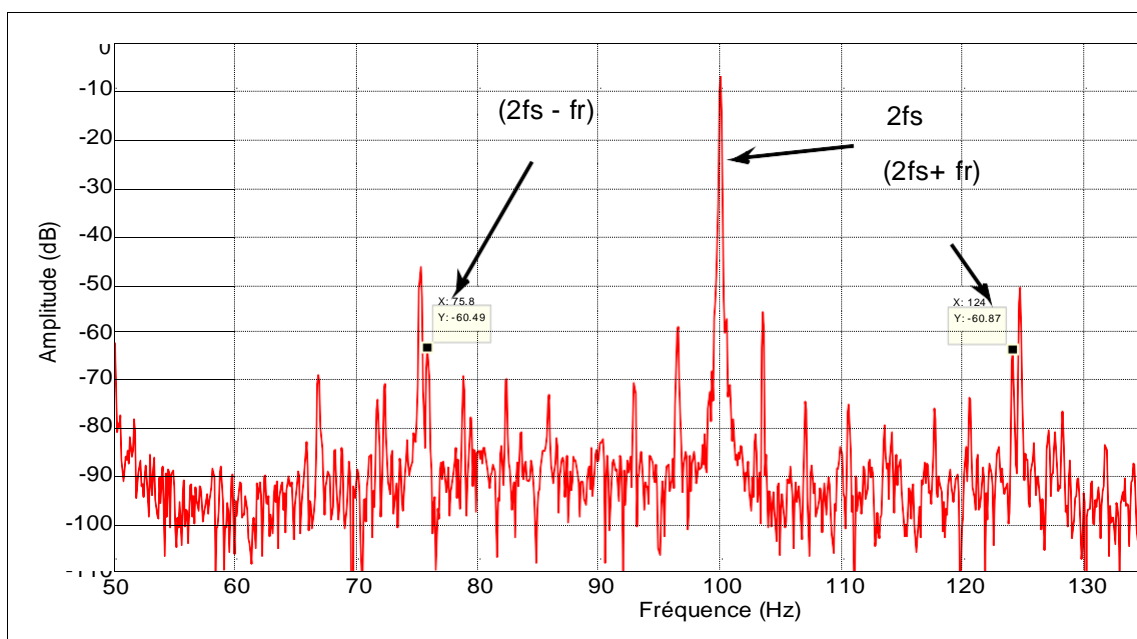


Fig .III.6. Spectre logarithmique expérimental du PVPA d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge

D'après **Tab. III.1** et la **Fig.III.5** la fréquence de la signature de PVPA dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à $2f_s \pm f_r$

*

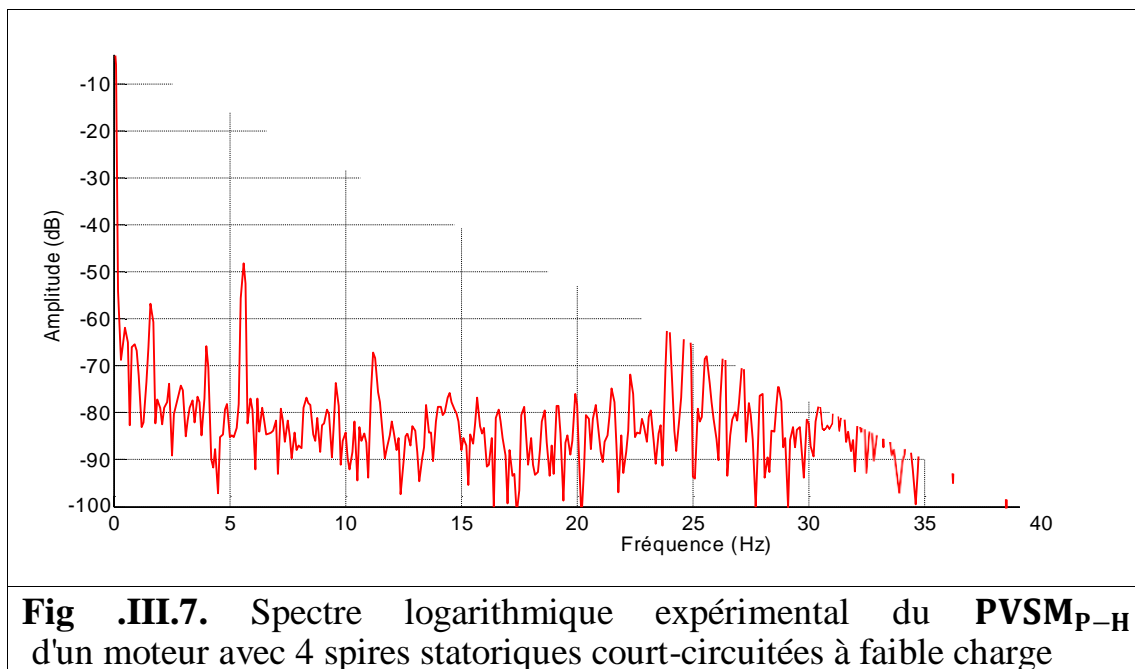
A faible charge le glissement vaut à l'état sain $s = 0.014$, la fréquence théoriquement calculée : $f_{ccs} = 124.5$ Hz, la fréquence analytique de la simulation selon la **Fig.III.5**: $f_{c.b.s} = 99.3 / 99.31$ Hz presque'elles sont

égales avec de 0.1/0.11 Hz d'incertitude. Le défaut cause souvent un léger chargement du glissement.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -45.86 dB

* A pleine charge $s = 0.034$, la fréquence calculée : $f_{ccs} = 75.8$ Hz, la fréquence de la simulation selon la **Fig.III.6**: $f_{c.b.s} = 96.25/96.26$ Hz avec de 0.05/0.06 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -60.49 dB



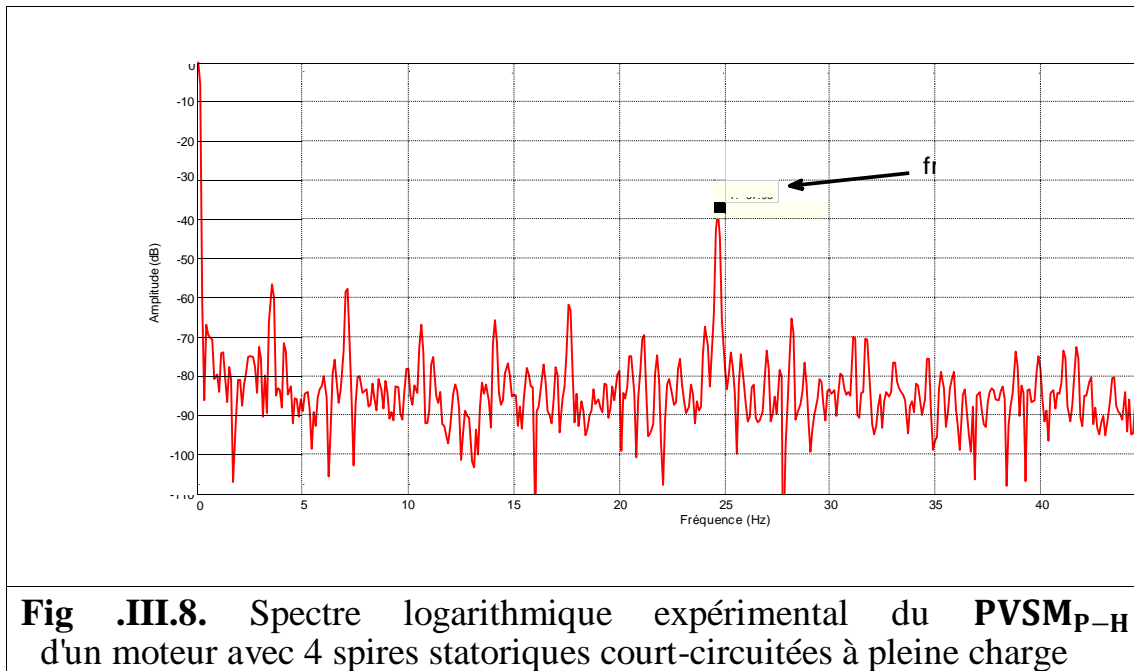


Fig .III.8. Spectre logarithmique expérimental du $PVSM_{P-H}$ d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge

D'après la **Fig.III.7** et le **Tab. III.1**, la fréquence de la signature de $PVSM_{P-H}$ dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à f_r

* A faible charge $s = 0.014$, la fréquence théoriquement calculée :
 $f_{c.b.t} = 24.7$ Hz, la fréquence analytique de simulation selon la **Fig.III.7**:
 $f_{c.b.s} = 150.7$ Hz presque elles sont égales avec de 0.1 Hz d'incertitude

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -50.65 dB

* A pleine charge $s = 0.034$, la fréquence calculée : $f_{ccs} = 24.7$ Hz, la fréquence de la simulation selon la **Fig.III.8**: $f_{c.b.s} = 153.8$ Hz avec de 0.0 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -37.93 dB

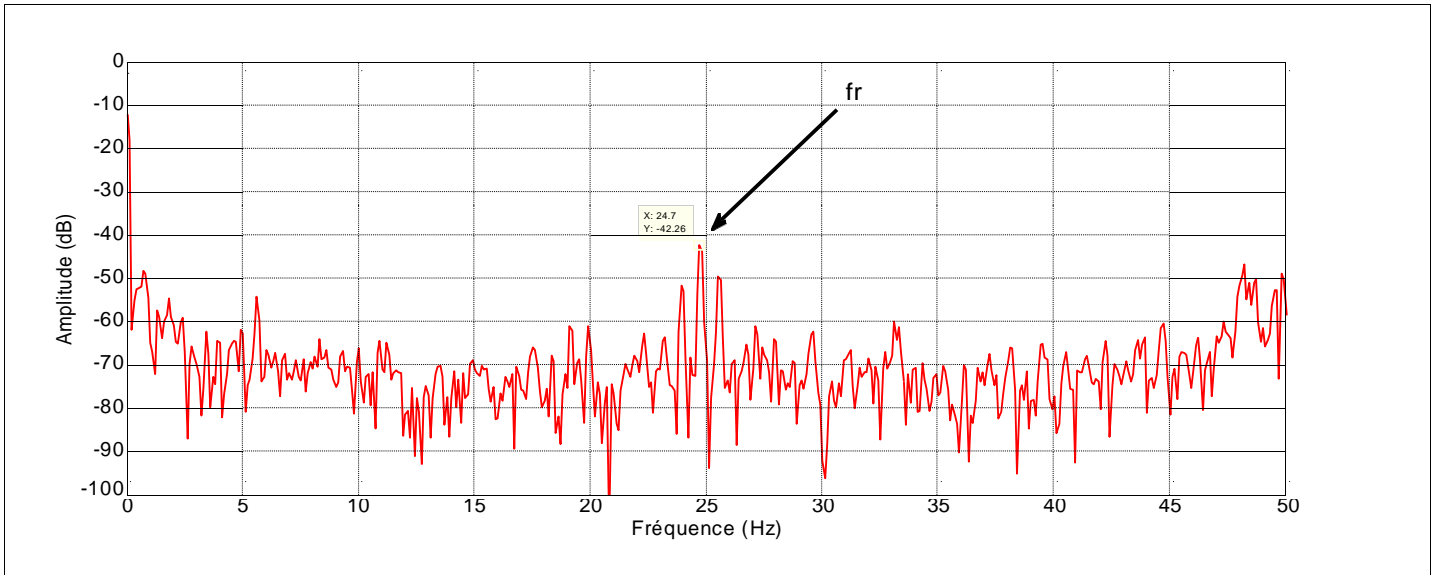


Fig .III.9. Spectre logarithmique expérimental du **HPVPA** d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à faible charge

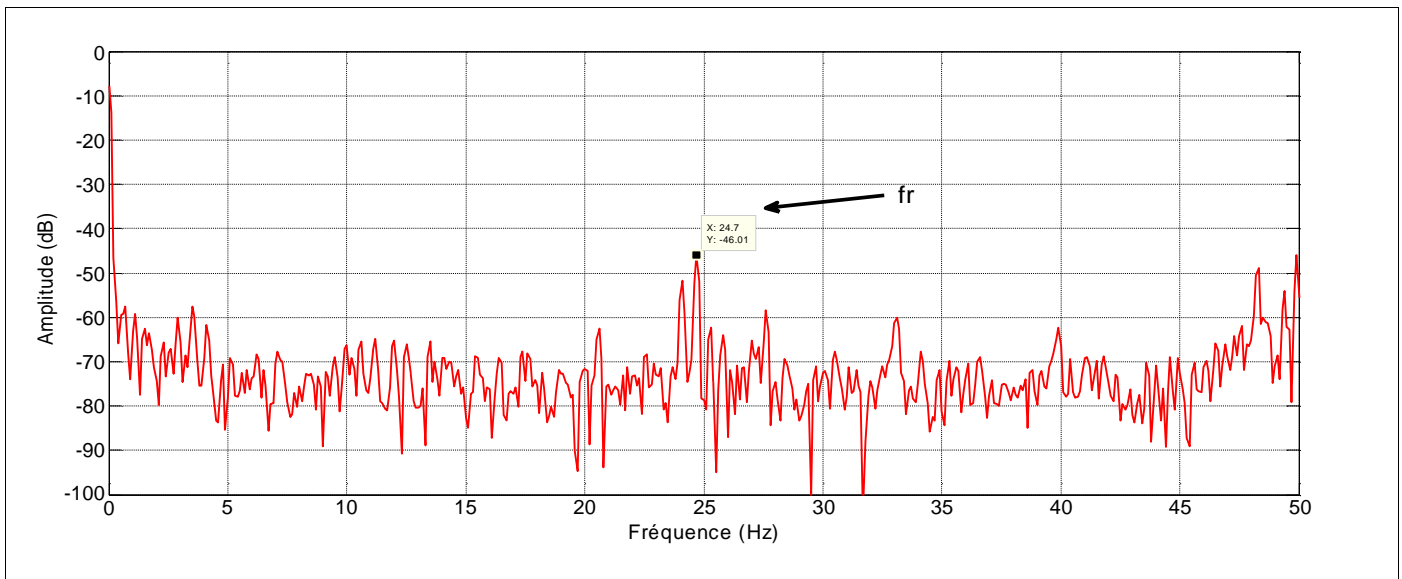


Fig .III.10. Spectre logarithmique expérimental du **HPVPA** d'un moteur avec 4 spires statoriques court-circuitées à pleine charge

D'après **Tab. III.1** et la **Fig.III.9** la fréquence de la signature de **HPVPA** dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à f_r

* A faible charge le glissement vaut à l'état sain $s = 0.014$, la fréquence théorique calculée de la signature : $f_{cbt} = 24.7$ Hz, la fréquence analytique

de simulation selon la **Fig. III.9**: $f_{cbs} = 199.3$ Hz presque'elles sont égales avec de 0.1 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -42.26 dB

* A pleine charge et à l'état sain le glissement égale $s = 0.034$, la fréquence théorique : $f_{cbt} = 24.7$ Hz, la fréquence trouvée de simulation selon la **Fig.III.10**: $f_{cbs} = 196.3$ Hz ; il n'y a pas un grand changement avec de 0.1 Hz d'incertitude.

- avec 4 spires statoriques court-circuitées: -46.01dB

III.3.2. Analyse comparative des résultats expérimentaux

Après avoir obtenu tous les signatures spécifiques des différentes approches de divers défauts de la MAS ,en choisissant les signatures dont l'amplitude est la plus grande, nous dressons des graphes illustratives qui montrent la sensibilité de chaque méthode pour chaque type de défaut.

Le Fig .III.11. nous montrent clairement ce travail de comparaison entre ces différentes techniques réalisées précédemment.

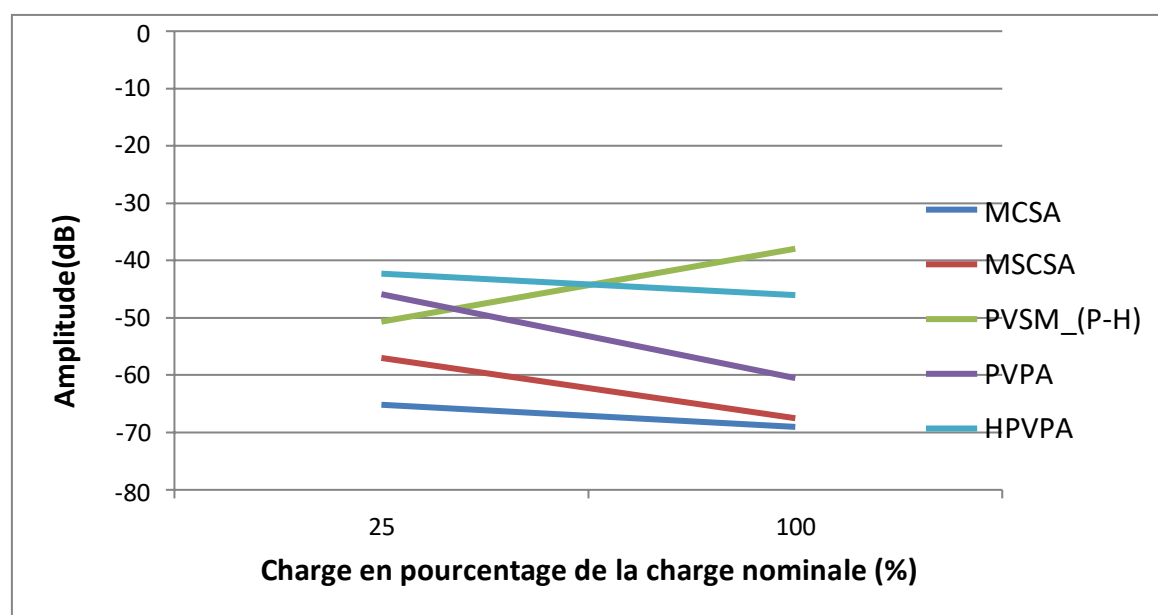


Fig .III.11. Courbes de sensibilité des différentes techniques avancées de diagnostic avec 4 spires statoriques court-circuitées (Résultats de simulation).

Techniques De Diagnostic	Défaut statorique (avec 4 spires statoriques court-circuitées)		Classement des techniques avancées de diagnostic
	faible charge	pleine charge	
PVPA	2	3	3
MSCSA	4	4	4
MCSA	5	5	5
PVSM _{P-H}	3	1	2
HPVPA	1	2	1

Tableau.III.2. Classement des techniques de diagnostic d’après leurs sensibilités expérimentales Moteur (3 kW).

Remarque:

Après notre étude, nous avons conclu que la sensibilité en pleine charge (charge nominale) domine celle à faible charge.

Après notre étude de techniques de diagnostic par des différentes méthodes (PVPA, MSCSA, MCSA, HPVPA, **PVSM_{P-H}**) pour défaut statorique (avec 4 spires statoriques court-circuitées) dans deux états, faible charge et pleine charge.

Grâce à Courbes de sensibilité des différentes techniques avancées de diagnostic avec 4 spires statoriques court-circuitées (Résultats de simulation). où nous trouvons l'approche **HPVPA** position 1 puis **PVSM_{P-H}** position 2, Donc les méthodes PVPA puis MSCSA ont successivement la première puis la deuxième position de sensibilité.

Enfin, nous avons déjà mis la main sur une méthode unique HPVPA dont la sensibilité absolument domine toutes les autres techniques modernes, qui ont été classées, selon leur sensibilité, successivement PVSMP-H, PVPA, MSCSA et MCSA.

Les enquêtes liées à la machine à induction ont rapporté qu'un grand pourcentage de leurs défauts, qui sont causés par des défauts d'enroulement du stator.

III-4. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons une étude comparative des techniques de diagnostic avancées.

Cette comparaison est faite en utilisant le spectre logarithmique, dans un premier temps, à partir des résultats expérimentaux avec un moteur de 3 kW dans deux états, faible charge et pleine charge.

nous avons trouvé techniques avancées HPVPA dans les premières positions de sensibilité. Les autres résultats expérimentaux du classement final montrent selon le Tab.III.2 nous avons observé que les méthodes PVSM_{P-H} puis PVPA ont également la successivement la deuxième puis la troisième position, et MSCSA la quatrième position

Enfin la méthode MCSA a une sensibilité médiocre pour les défauts statoriques puisqu'elle occupe la cinquième position mais elle jouit d'une excellente sensibilité pour les défauts rotoriques d'après d'autres études faites. Cette étude nous montre.

CONCLUSION GENERALE

Les machines électriques sont considérées comme le principal moteur des industries, comme entémoigne la renaissance des pays européens, qui suivent toujours le rythme des développements des grands pays.

Les problèmes auxquels sont confrontés les investisseurs dans l'industrie, en particulier dans le domaine de la programmation et de la réparation des défauts, accordent une grande importance aux travailleurs de ce domaine, car l'esprit doit contrôler quelque chose qui a été fabriqué par eux, de sorte que les ingénieurs et les chercheurs ont commencé à démanteler les caractéristiques de la machine à travers des théories physiques qui travaillent pour contrôler la machine. Ces sciences ont amené même les grands pays à attacher la plus haute importance à la création de laboratoires de recherche à un rythme industriel orienté vers l'investissement humain, ce qui a fait l'élément humain apprend la nécessité de fabriquer cette machine, en particulier dans le domaine industriel.

L'évolution du développement dans le monde industrialisé a mis tout le monde en concurrence dans le domaine de l'industrie, car elle cherche à développer la machine dans sa modernité encore plus rigide et résistante aux conditions naturelles résultant d'une mauvaise utilisation de la main-d'oeuvre ou de phénomènes naturels tels que les températures élevées, la poussière sur les vents et la pluie qui peuvent s'infiltrer sur les chantiers. Fournir des moyens de prévention et de sécurité pour le composant humain d'une part et la machine elle-même, en plus de connaître les défauts constatés dans les pièces de la machine et de travailler sur le développement de méthodes de diagnostic allant des méthodes classiques aux méthodes avancées coûtant des êtres humains

dangereux en plus du contrôle à distance et d'une connaissance précise de la qualité des dommages et du traitement rapide par peur des dommages D'autres. Tout cela nous a incités à nous efforcer de fournir un exemple concret afin de contribuer à l'enrichissement de la recherche scientifique pour trouver la meilleure technique avancée récemment proposée pour le diagnostic de ces machines, telle que : HPVPA (2019) PVPA(2016) PVSMP-H (2014) , MSCSA(2013) , et la méthode classique MCSA pour les défauts statotoriques.

Cette étude nous a permis de comparer des méthodes techniques avancées. Cette comparaison est faite en utilisant le spectre logarithmique, dans un premier temps, à partir des résultats expérimentaux avec un moteur de 3 kW dans deux états, faible charge et pleine charge.

nous avons trouvé techniques avancées HPVPA dans les premières positions de sensibilité. Les autres résultats expérimentaux du classement final montrent selon le Tab.III.2 nous avons observé que les méthodes $PVSM_{P-H}$ puis PVPA ont également la successivement la deuxième puis la troisième position ,et MSCSA la quatrième position

Enfin la méthode MCSA a une sensibilité médiocre pour les défauts statoriques puisqu'elle occupe la cinquième position mais elle jouit d'une excellente sensibilité pour les défauts rotoriques d'après d'autres études faites.Cette étude nous montre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**ABB 16**] Abbas rachid Bouaboud Hassiba «Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d'anneaux de court-circuit», Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2016.

[**ABD 17**] C.ABDELGHANI "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic", Thèse de Doctorat, *Université des Sciences et de la Technologie d'Oran* Mohamed-Boudiaf El Mnaouar, 2017.

[**ABL 09**] Abla Bouguerne " Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones " Thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE, 2009.

[**AHA 12**] S. K. AHAMED, M. MITRA , S. SENGUPTA ,et AL., "Identification of mass-unbalance in rotor of an induction motor through envelope analysis of motor starting current at no load", *Revue du Journal of Engineering Science and Technology*, Vol 5 (No.1), 2012 ,p 83-89 .

[**ALL 12**] A. ALLAL , B. CHETATE , D. BENATTOUS , "The Instantaneous Power Approach for Rotor Cage Fault Diagnosis in Induction Motor", 6 ème symposium sur les hydrocarbures et la chimie ISHC6, 2012, (Zeralda, Alger).

[ALL 10] ALLAL ABDERRAHIM «Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Thèse de Magister en Electrotechnique Univ FERHAT ABBAS –SETIF 2010.

[ALL 16]A. ALLAL, B. CHETATE , "A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads", Frontières de l'énergie, Vol 10 (No.2),2016, P 176-191.DOI: 10.1007/s11708-015-0386-2

[ALL 17] A. ALLAL, "Nouvelles méthodes et techniques de diagnostic des machines asynchrones à rotor en cage d'écureuil (New methods and diagnostic techniques asynchronous machines of squirrel cage rotor)) ", Thèse de doctorat en sciences, université de Boumerdes, Algérie, 2017 (en français).

[ALL 19] ALLAL A et CHETATE B, "High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product", J. Fundam. Appl. Sci., 2019, 11(2), 994-1022.

[BAC 12]K. BACHA, S. BEN SALEM, A. CHAARI , "An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors" , Systèmes d'alimentation électrique et d'énergie,Vol 43 (No.1),2012, p1006–1016.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.056>

[BAC 02] Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.

[BAD 17] K. Badreddine., "Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction,"Mémoire de master, Université de Annaba, 2017.

[BAZ 16] BAZI SMAIL, " Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Ingénieur d'État en Électrotechnique de, Université de Batna 2016.

[BES 13] NOUREDDINE BESSOUS, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones", magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.

[BOU 01] T. Boumegora « Recherche des signatures électromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2001.

[CAS 03] Roland casimir ,92 « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes »

[CHE 14] H. Cherif., " Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes," Mémoire de magister, Université de Biskra, 2014

[CHR 01] C. Christophe, "Surveillance des systèmes non linéaires: Application aux machines électriques." 2001.

[PAT 91] R. J. Patton, "Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy," *Comput. Control Eng. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 127–136, 1991.

[DID 04] Gaetan Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances.» Thèse de doctorat, université de Henry Poincaré, Nancy-I, 2004

[FAT 14] B. Fatma, "Contribution à la modélisation et la commande de la machine asynchrone :application au diagnostic des défauts statorique", Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, juin 2014.

[IBR 09] A. Ibrahim, `` Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée`` Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.

[KEC 13] R. KECHIDA A. MENACER, , H. TALHAOUI , " Approach signal for rotor fault detection in induction Motors", *Journal d'analyse et de prévention des pannes*, Vol 13 (No.3), 2013,p346-352.

[KHA 09] A. Khatir, Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2009.

[**KHA 12**] Khaled YAHIA. Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Signal. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.2012.

[**KHE 15**] khenfer Riad « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » thèse de Docteur en Sciences Université Ferhat Abbes - Setif-1.le 05 Mars 2015.

[**LAA 16**] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.

[**LEB 06**] Monsieur Abdesselam LEBAROUD .Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables. Université de Constantine. TH_ESE de doctorat .2006.

[**MAG 06**] A.MAGHRAOUI, A.DEBOUCHA, “Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage”. Diplôme Ingénieur d’Etat en Electromécanique UNIVERSITE DE M’SILA (Algerie) 2006.

[**MOU 19**] Saihi Mouad . Application de l’analyse par composante principale(ACP) en vue du diagnostic des machines asynchrones. Thèse de Master. Université Larbi Ben M’hidi - Oum El Bouaghi -.2019.

[NAC 09] YASSA Nacera, Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux. Thèse de Master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 09 Mai 2009.

[OND 06] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.

[PHU 07] Bui Viet Phuong, « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide. » Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 2007

[PIR 12]V. F. PIRES, M. KADIVONGA , J. F. MARTINS ,et AL.
 ",Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis" , Measurement, Vol 46 (No.2), 2013, p 942–948.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10>

[RAZ 03] H. RAZIK et G. DIDIER, "On the Monitoring of the Defects of Squirrel Cage Induction Motors" Article accepté pour présentation en 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy 0-7803-7967-5/03/\$17.00 ©2003 IEEE

[SAH 05] M. SAHRAOUI A. GHOGGAL, A. ABOUBOU, S. E. ZOUZOU, " Modèle Mathématique Dédie a la Simulation des Courts-Circuits Entre Spires des Enroulements Statoriques dans les Moteurs à

Induction", 2ème Séminaire National sur les Systèmes Electromécaniques, (SNSEM'05), Octobre 2005, Université Mohamed Khider,(Biskra- Algérie). p 1-10.

[SAH 10] M. SAHRAOUI , S. E. ZOUZOU, A. GHOGGAL ,et AL. , "A new method to detect inter-turn short- circuit in induction motors",19eme Conférence internationale sur la machine électrique (ICEM, 2010), septembre 2010, (Rome, Italie), IEEE, 2010 ,p1-6.

<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607854>

[SAH 14] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, S. GUEDIDI , et AL. , "Detection of inter-turn shortcircuit in induction motors using Park– Hilbert method", International Journal of System Assurance Engineering and Management , Vol 5 (No.3),2014,p 337-351.

DOI: 10.1007/s13198-013-0173-6

[SAHR 10] SAHRAOUI MOHAMED, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse De Doctorat en Science En Electrotechnique Université Biskra. Algerie.2010.

[SAL 12] BOUSBIA SALAH Mohamed , DJERIBIAI Ayoub , BOUAZIZ Salim" IDENTIFICATION DES MACHINES ASYNCHRONES PAR LA METHODE SSFR EN VUE DE LEURS DIAGNOSTIC " Thèse D'INGENIEUR D'ETAT , UNIVERSITE DE M' S ILA,2012.

[SAM 16] KERFALI SAMIR. Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone. Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.2016.

[SOU 12] Youcef SOUFI Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique TH_ESE de doctorat Université Badji Mokhtar ANNABA juin 2012

[TAB 02] M.E. Tabbache ``Détection des défauts mécaniques par l'analyse des Signaux d'alimentation des moteurs asynchrones``
Thèse de doctorat, Nancy, Juillet 2002

[VAS 09] B. Vaseghi ``Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut``Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009

[ZOU 10] S. E. ZOUZOU. , M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, et AL.
, "Detection of inter- turn short-circuit and broken rotor bars in induction motors using the partial relative indexes: application on the MCSA", 19 éme., Conférence internationale sur la machine électrique (ICEM, 2010), septembre 2010, (Rome, Italie), IEEE, 2010 ,p 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607874>

Annexe 1

Pour nos résultats expérimentaux, nous avons utilisé une machine dans le Laboratoire génie électrique université Biskra avec ses caractéristiques détaillées sont données comme suit:

Tableau A.2. Paramètres du moteur (MAS) (essais expérimentaux)

Symbôles	Paramètres	Valeurs
V_n	Tension nominale	230/380 V
I_n	Courant nominale	6.40A
ω_n	Vitesse nominale	1430tr/min
N_r	Nombre de barres rotoriques	28
p	Nombre de paire de pôle	2
f_s	Fréquence d'alimentation	50 HZ