

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane Mira Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option: Électromécanique

Thème :

TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES
DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR
ASYNCHRONE

Réalisé par :

- KHEMCHANE Nour
- TIZZAOUI Arezki

Promotrice:

- M^{me} AZEZ Zina

Promotion: 2016-2017

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à madame AZEZ Zina pour les conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'elle nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également les membres de juré d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université de Béjaia, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère, pour son soutien et sa confiance, que Dieu, lui procure santé et longue vie.

A mon défunt père, parti à l'éternité, mais qui a été toujours présent dans mon cœur, je lui rends un grand hommage.

A ma grand-mère et a tout mes oncles

A toute ma famille

A tout mes amis (es) et collègues

A tous ceux que j'aime

Nour

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, pour leur soutien et leur confiance, que Dieu, leur procure santé et longue vie.

A mes frères

A mes sœurs

A mes grands parents

A toute ma famille

A tout mes amis (es) et collègues

A tous ceux que j'aime

Arezki

SOMMAIRE

Introduction	1
---------------------------	----------

Chapitre I. Maintenance et diagnostic

1. Introduction	3
2. Terminologie relative au maintenance et diagnostic	4
2.1 La maintenance	4
2.1.1 Définition de la maintenance	4
2.2 Maintenabilité	4
2.3 La maintenance et la vie de matériel	4
3. Les différentes formes de maintenance	4
3.1. Les concepts	4
3.2 Les méthodes	5
3.2.1 La maintenance corrective	6
3.2.2 La maintenance préventive	7
3.2.2.1 La maintenance préventive systématique	7
3.2.2.2 La maintenance préventive conditionnelle	8
4. Niveaux de maintenance	8
5. Les opérations de maintenance	11
5.1 Les opérations de maintenance corrective	11
5.1.1 Le dépannage	11
5.1.2 La réparation	11
5.2 Les opérations de maintenance préventive	12
5.2.1 Les inspections	12
5.2.2 visites	12
5.2.3 contrôles	12
6. Diagnostic et surveillance	12
6.1 Diagnostic	12
6.2 Défaut (panne, défaillance)	12
6.3 Disponibilité	12
6.4 Sécurité	13
6.5 Qualité	13
6.6 Fiabilité	13
6.6.1 Définition	13
6.6.2 Types de Fiabilité	13
6.7 Défaillance	13
6.7.1 Définition	13
6.7.2 Classification de la défaillance	14
7. Conclusion	15

Chapitre II. Conception de la machine asynchrone

1. Introduction	16
2. Machine asynchrone	16
2.1 Historique	16
2.2 Constitution du moteur asynchrone	17
2.2.1 La carcasse	17
2.2.2 Le stator (inducteur)	17

2.2.3 Le rotor (induit)	18
2.2.4 L'arbre	19
2.2.5 Les ventilateurs	19
2.2.6 Le circuit magnétique	19
2.2.7 Les enroulements	20
3. Type de bobinage appliqué	21
3.1 Bobinage statorique	21
3.2 Bobinage rotorique	21
4. Caractéristiques	22
4.1 Fonctionnement à vide	22
4.2 Fonctionnement en charge	22
5. Conclusion	23

Chapitre III. Les défauts dans les moteurs asynchrones

1. Introduction	24
2. Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	24
2.1 Défauts internes et externes	24
2.2 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone	26
2.2.1 Causes des défauts	27
2.2.2 Principaux défauts	28
2.2.2.1 Défauts statoriques	29
2.2.2.2 Défauts rotoriques	30
3. Défauts dans les enroulements statoriques	30
4. Les défauts de courts-circuits statoriques	31
4.1 court-circuit dans une phase	32
4.1.1 Court-circuit spire- neutre	32
4.1.2 Court-circuit au milieu de la phase	32
4.2 Court-circuit entre phases différentes	33
5. Techniques du diagnostic	34
5.1 Approche signal	34
5.1.1 Analyse des grandeurs électriques mesurables	34
5.1.2 Surveillance des fluctuations de la vitesse	35
5.1.3 Surveillance du couple électromagnétique	35
5.1.4 Surveillance du champ magnétique	35
5.2 Approche système	35
6. Conclusion	36

Chapitre IV. Techniques et Méthodes de diagnostic du défaut statorique

1. Introduction	37
2. Techniques de calcul de la composante inverse du défaut statorique	37
2.1 Introduction	37
2.2 Système triphasé déséquilibré et pollué	38
2.3 Validation expérimentale	39
3. Analyse spectrale du vecteur courant	41
3.1 Transformée de Fourier discrète du vecteur courant	41
3.2 Validation expérimentale	43
4. Algorithme de Goertzel	44
4.1 Validation expérimentale	45
5. Analyse par la démodulation synchrone du vecteur courant	46

5.1 Démodulation analogique	47
5.1.1 Validation expérimentale	47
6. Etude Comparative	48
7. Conclusion	49
Conclusion générale.....	50

Symboles liés aux paramètres électriques et Magnétiques

i_1, i_2, i_3	: Système de courant triphasé.
α, β	: Un repère de coordonnées fixe.
d, q	: Un repère de coordonnées tournantes
W	: La matrice de rotation.
N	: Nombre d'échantillons.
Δt	: Pas d'échantillonnage temporel.
f	: La fréquence
Δf	: Incrémentation fréquentielle (résolution spectrale).
f_{\max}	: Fréquence maximale du signal.
FFT	: La transformée de Fourier rapide.
DFT	: La transformée de Fourier discrète.
\bar{i}_d	: Vecteur d'espace de séquence direct.
\bar{i}_i	: Vecteur d'espace de séquence inverse.
P	: Nombre de paire de pôles.
Z	: La transformée en Z .
$H_K(z)$: La fonction de transfert de l'algorithme de Goertzel.
s	: Glissement
g	: Glissement
T	: Durée d'observation
\hat{I}	: Composante fondamentale à deux fois la fréquence statorique
\tilde{I}	: Composante alternative due aux harmoniques ;
\bar{I}_{-1}	: Composante continue correspondant à la composante inverse
h	: Composante harmonique.
K	: Le rang d'harmonique.
$a = e^{j2\pi/3}$: Opérateur \square définie une rotation de $2\pi/3$ dans le sens contraire des aiguilles d'une montre
\bar{i}_s	: Le vecteur des courants statoriques.
i_{d-1}	: La composante de séquence directe après le filtrage.
i_{q-1}	: La composante de séquence direct après le filtrage.
Ω_s	: Vitesse de rotation du champ magnétique tournant en rad.s^{-1} .

Ω :	Vitesse de rotation du rotor en rad.s^{-1} .
n_s :	Vitesse de rotation du champ tournant (tours.s^{-1}).
n :	Vitesse de rotation du rotor (tours.s^{-1}).
ϕ :	Phase statorique.
RII :	Réponse impulsionnelle infinie.

Liste des figures

Fig. I.1 : les méthodes de maintenance.....	6
Fig. I.2 : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps.....	14
Fig. II.1 : Photo de deux stators terminés.....	17
Fig. II.2: Rotor de la machine asynchrone.....	18
Fig. II.3 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	20
Fig. II.4: Photo d'une machine asynchrone de 5,5KV avec le stator et le rotor qui la Constituent	22
Fig. III.1 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	25
Fig. III.2 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	25
Fig. III.3 : Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.....	27
Fig. III.4 : Facteurs aggravant le défaut.	28
Fig. III.5 : Répartition des défauts.....	29
Fig. III.6 : Répartition des défauts stator.....	29
Fig. III.7 : Répartition des défauts rotoriques.....	30
Fig. III.8 : Représentation des différents défauts statoriques possible.....	31
Fig. III.9 : Courants statoriques du défaut de courts-circuits interspires- neutre.....	32
Fig. III.10 : Courants statoriques du défaut de courts-circuits au milieu de la bobine.....	33
Fig. III.11 : Courants statoriques du défaut de courts-circuits entre phases différentes.....	33
Fig. IV.1 : Vecteur courant statorique pour un moteur sain alimenté par une tension idéal.....	39
Fig. IV.2 : Vecteur courant statorique pour un moteur ayant un court-circuit entre spires d'une phase statorique de 30%.....	40
Fig. IV.3 : Vecteur courant sain (a) et déséquilibré (b)	40
Fig. IV.4 : Exemple de spectre d'un vecteur d'espace de courants déséquilibrés.....	41
Fig. IV. 5: Spectre du vecteur courant statorique sain.....	43
Fig. IV.6: Spectre du vecteur courant statorique déséquilibré de 30%.....	44
Fig. IV.7 : Représentation graphique de la fonction de transfert de l'algorithme de Goertzel.....	45
Fig. IV.8 : Extraction de la composante inverse de déséquilibre par l'algorithme de Goertzel.....	45
Fig. IV.9: Démodulation analogique du vecteur courants statorique.....	47
Fig. IV.10: Extraction de la composante inverse par la démodulation analogique du vecteur statorique.....	47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux de maintenance (norme AFNOR).....11
Tableau. 1 : Tableau comparatif des différentes techniques.48

Introduction générale

Introduction générale

Les industriels sont de plus en plus confrontés à la sûreté de fonctionnement des outils de production. Cette demande en termes de sûreté est motivée par des impératifs de production et se trouve actuellement au niveau des cahiers de charges imposés par les industriels à leurs fournisseurs. Ce n'est plus seulement le produit qui est vendu mais l'assurance d'un taux de disponibilité garanti.

Ces contraintes imposées par le marché nécessitent un changement dans la politique de la maintenance. Celle-ci qui était principalement corrective dans les applications standard et préventive dans les applications critiques.

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défaillances: il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Les systèmes de surveillance et de diagnostic peuvent être mis en œuvre en cours d'exploitation (en ligne) ou pendant les phases normales d'arrêt d'exploitation (hors ligne). En cours d'exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative. En arrêt d'exploitation, l'objectif est d'évaluer le degré de vieillissement de certains éléments, de décider d'une opération de maintenance préventive ou curative.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasé à cage d'écureuil. La croissance de ce type de machines électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tout les domaines industriels.

C'est dans cette optique que ce mémoire est orienté. Il s'intéresse, en effet, à la surveillance et au diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence les défauts statorique. Elle s'appuie sur des compétences dans les domaines des machines électriques et de traitement du signal.

Notre premier objectif en abordant ce mémoire était la compréhension et l'analyse des défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Alors que la recherche et le développement d'outils de surveillance et de diagnostic des défauts fut notre second objectif et qui a été abordé avec soin dans le dernier chapitre.

Le 1^{er} chapitre est essentiellement consacré à la maintenance cette dernière qui a pour but d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production à un coût optimal dans de bonnes conditions de qualité et de sécurité.

Le 2^{ème} chapitre traite la constitution de la machine asynchrone en ferant un rappelle sur les éléments de constitution de cette machine et leurs principe de fonctionnement qui nous facilitent la compréhension de différente type de défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones, ces derniers sont traités dans le 3^{ème} chapitre.

Le 3^{ème} chapitre est contribue sur l'étude des différents types de défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone, l'accent à été mis sur les défauts statoriques et en particulier les défauts de court-circuit en vu d'un diagnostic de la machine asynchrone.

Le 4^{ème} chapitre analyse les différentes techniques de diagnostic en ligne du défaut statorique, une étude comparative a été établie entre ces différentes techniques. Le point commun de toutes ces méthodes et techniques est l'analyse du courant statorique: soit par le spectre via la transformée de Fourier; soit par l'algorithme de Goertzel; soit par la démodulation synchrone analogique.

Chapitre I

Maintenance et diagnostic

1. Introduction

Ce chapitre apporte une description de la fonction maintenance, ses différentes formes et ses différents niveaux qui nous permettra une compréhension exhaustive de ce concept.

L'objectif de notre étude consiste à la définition d'une forme de maintenance traitant les aspects de surveillance et de diagnostic des machines asynchrones.

Actuellement, les impératifs de fiabilité et de productivité des installations nécessitent l'intégration d'un système de détection et de diagnostic des défaillances pour éviter et prévenir les pannes et les arrêts intempestifs.

L'entreprise est condamnée à s'adapter aux progrès technologiques et à se doter de nouvelles technologies pour qu'elle reste compétitive sur le marché. L'acquisition de ces technologies nécessite de nouveaux matériels et des investissements importants dont l'amortissement doit être assuré. Tout arrêt de production dû à une défaillance imprévue du matériel devient donc trop onéreux pour l'entreprise.

L'entreprise doit donc adopter une stratégie de maintenance ayant pour objectif le maintien du matériel dans un état assurant la production voulue au coût optimal.

2. Terminologie relative au maintenance et diagnostic

2.1 La maintenance

2.1.1 Définition de la maintenance

AFNOR (Association Française de Normalisation) par la norme NF EN 13306 (avril 2001) définit la maintenance comme étant l'ensemble des actions techniques, administratives et management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal

2.2 Maintenabilité

La maintenabilité est une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge.

La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage. Par active, on entend qu'on ne comptera pas les temps morts non imputables à la conception du système, tels que les délais de réponse des dépanneurs, les durées d'attente des pièces de rechange ou les temps passés à la rédaction des pièces administratives, car ces temps dépendent de l'organisation et de l'efficacité du service de maintenance et non de la conception du système.

2.3 La maintenance et la vie de matériel

Les actions de maintenance commencent bien avant le jour de la première défaillance d'un matériel. En fait, elles commencent dès la conception du matériel pour permettre :

- ✓ de faciliter les interventions de maintenance (améliorer la maintenabilité).
- ✓ d'avoir une bonne fiabilité (aptitude à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné) et assurer la disponibilité du matériel (aptitude à être opérationnel).

3. Les différentes formes de maintenance

3.1 Les concepts

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

- ✓ **Les événements qui sont à l'origine de l'action :** Les événements qui sont à l'origine de l'action : référence à un échancier, la subordination à un type d'événement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.....), l'apparition d'une défaillance.

- ✓ **Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées :** maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.
- ✓ **Les opérations de maintenance proprement dites :** inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
- ✓ **Les activités connexes :** maintenance d'amélioration, rénovation reconstruction, modernisation, travaux neufs sécurité, etc.

Cette réflexion terminologique et conceptuelle représente une base de référence pour :

- ✓ l'utilisation d'un langage commun pour toutes les parties (conception, production, prestataires de service, etc....)
- ✓ la mise en place de systèmes informatisés de gestion de la maintenance.

3.2 Les méthodes

Le choix entre la méthode maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des direction politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques du matériels, le comportement du matériel en exploitation, les condition d'application de chaque méthode, les coût de maintenance et les coût de perte production.

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF EN 13306 les méthodes de maintenance :

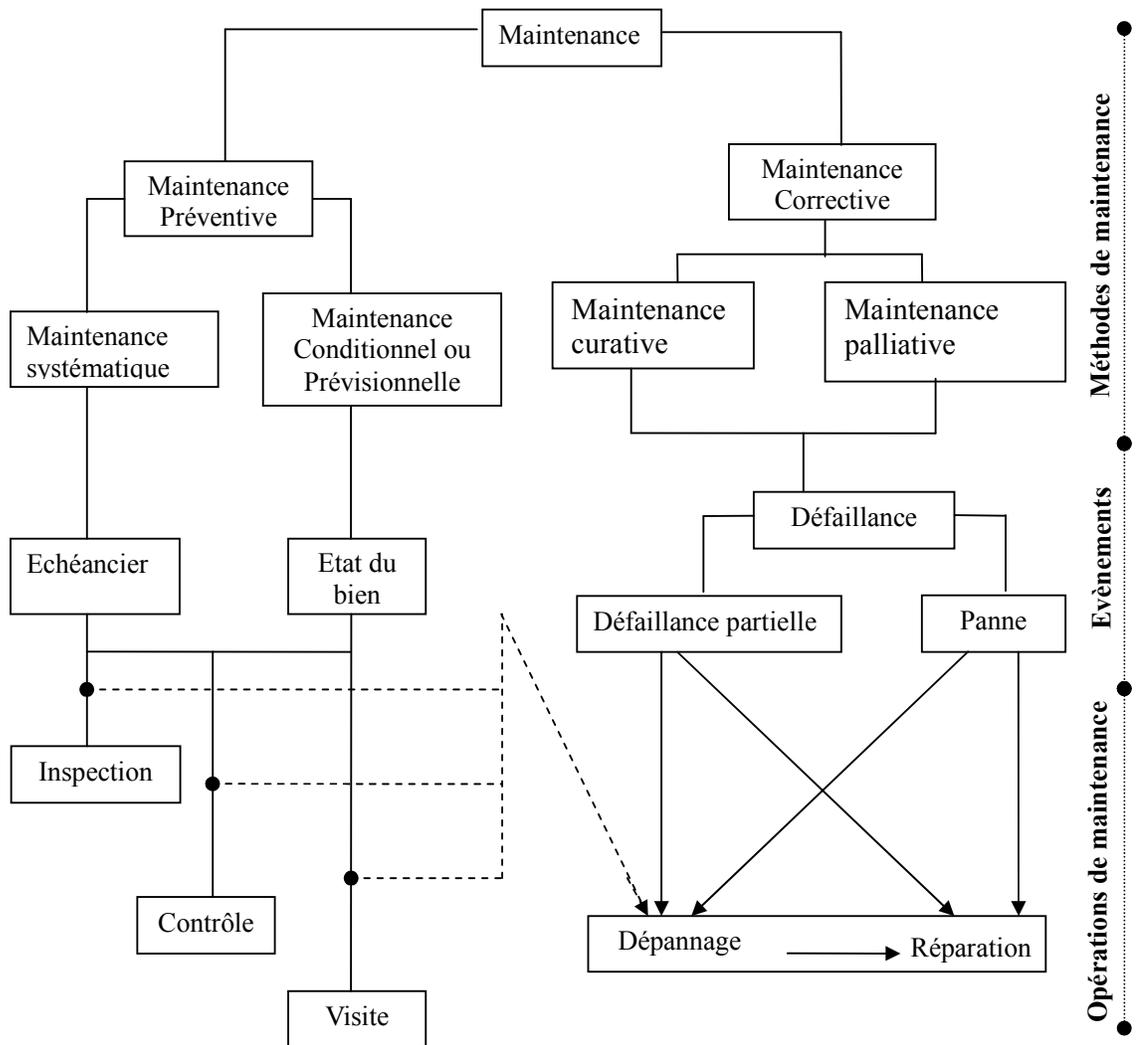


Figure I.1 : Les méthodes de maintenance.

3.2.1 Maintenance corrective :

La maintenance est exécutée après défaillance et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

- **Maintenance curative** : ayant pour objet de rétablir un bien état spécifique ou de lui permettre d’accomplir une fonction requise
- **Maintenance palliative** : activité de maintenance corrective destinée à permettre à bien accomplir provisoirement tout ou partie d’une fonction requise

3.2.2 Maintenance préventive :

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou de la dégradation d'un service rendu.

➤ Buts de la maintenance préventive

- ✓ Augmenter la durée de vie des matériels
- ✓ Diminuer la probabilité des défaillances en service
- ✓ Diminuer les temps d'arrêt en cas révision ou de panne
- ✓ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- ✓ Permettre de décider la maintenance corrective dans des bonnes conditions
- ✓ Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- ✓ Améliorer les conditions de travail du personnel de production
- ✓ Diminuer le budget de maintenance
- ✓ Supprimer les causes d'accidents graves

3.2.2.1 Maintenance préventive systématique

Maintenance préventive effectuée suivant un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

❖ Cas d'application

- ✓ *Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) :* appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte charge, etc.
- ✓ *Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves :* tous les matériels assurant le transport en commune des personnes avions trains etc.
- ✓ *Equipements ayant un coût de défaillance élevé :* éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimique ou métallurgiques).
- ✓ *Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevés au cours de leur temps de service :* consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteur thermique)

3.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle

Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien.

❖ Les paramètres mesurés

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- ✓ Le niveau et la qualité de l'huile.
- ✓ Les températures et les pressions, débit, tension, intensité, vitesse.
- ✓ La tension et l'intensité des matériels électriques.
- ✓ La vibration et les jeux mécaniques, etc.

4. Niveaux de maintenance

La maintenance et l'exploitation d'un bien s'exercent à travers de nombreuses opérations, parfois répétitives, parfois occasionnelles, communément définies jusqu'alors en 5 niveaux de maintenance.

Le classement de ces opérations permet de les hiérarchiser de multiples façons. Ce peut être en fonction des critères suivants :

- Le personnel de production ;
- Le personnel de maintenance en tenant compte de la qualification de l'intervenant ;
- Le personnel de l'entreprise ou un sous-traitant ;
- Une combinaison des 3 ;

1^{er} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitation du bien sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock de pièces consommables nécessaires est très faible.

- **Exemples en maintenance préventive** : ronde de surveillance d'état, graissage journalier, manœuvre manuelle d'organe mécaniques, relevés de valeurs d'état ou d'unité d'usage, test de lampes sur pupitre, purge d'éléments filtrants, contrôle d'encaissement des filtres.
- **Exemples en maintenance corrective** : remplacement des ampoules, ajustage, remplacement d'éléments d'usure ou détériorés, sur des éléments composants simples et accessibles.

2^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions.

On peut se procurer les pièces de rechange transportable nécessaire sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

- **Exemple en maintenance préventive :** Contrôle de paramètres sur équipements en fonctionnement à l'aide de moyen de mesure intégrés au bien ; réglage simples (alignement de poulies, alignement pompe moteur, etc.) ; Contrôle des organes de coupure (capteur, disjoncteurs, fusibles), de sécurité, etc. ; graissage à faible périodicité (hebdomadaire, mensuelle) ; remplacement de filtre difficiles d'accès.
- **Exemple en maintenance corrective :** Remplacement par échange standard de pièces (fusibles ; courroies ; filtres à air, etc.) remplacement de tresses, de presse-étoupe, etc. ; lecture de logigramme de dépannage pour remise en cycle ; remplacement de composant individuels d'usure ou détériorer par échange standard (rail, glissière ; galet ; rouleaux ; chaîne ; fusible ; courroie,...).

3^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le locale de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des banc d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

- **Exemple de maintenance préventive :** Contrôle de réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens ; visite de maintenance préventive sur les équipements complexes ; contrôle d'allumage et de combustion (chaudières) ; intervention de maintenance préventive intrusive ; relevé de paramètres techniques d'état de biens à l'aide de mesure effectuée d'équipements de mesure individuels (prélèvement de fluides ou de matière, etc.).
- **Exemple de maintenance corrective :** Diagnostic ; réparation d'une fuite de fluide frigorigène (groupe de froid) ; reprise de calorifuge ; remplacement d'organes et de composants par échange standard de technicité générale, sans usage de moyens de production par usage de moyens de mesure et de diagnostic individuels.

4^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé doté d'un outillage générale (moyens mécanique, de câblage, de nettoyage, etc.) et éventuellement des bancs de mesure et des étalons de travail nécessaire, à l'aide de toutes documentations générales ou particulières.

➤ **Exemples en maintenance préventive :**

Révision partielles ou générale ne nécessitant pas de démontage complet de la machine ; analyse vibratoire ; analyse des lubrifiants ; thermographie infrarouge ; relevé de paramètres techniques nécessitant des moyens de mesure collectifs (oscilloscope, collecteur de données vibratoires) avec analyse des données ; révision d'une pompe en atelier, suite à dépose préventive.

➤ **Exemples en maintenance corrective :** Remplacement de clapets de compresseur ; remplacement de tête de câble en BTA. Réparation d'une pompe sur site, suite à une défaillance ; dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure ou de diagnostic collectifs et/ou de fort complexité (valise de programmation automate, système de régulation et de contrôle des commandes numériques, variateurs, etc.).

5^{ème} Niveau

Opération dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologie particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Par définition, ce type d'opération de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proche de la fabrication du bien concerné.

Niveau	Activités
Niveau 01	Ronde, petit entretien, graissage
Niveau 02	Echange standard, contrôle du bon fonctionnement
Niveau 03	Diagnostic, petites réparations, opérations mineures préventives
Niveau 04	Travaux de maintenance préventive et corrective, réglage des moyens de mesure
Niveau 05	Rénovation, reconstruction et réparations importantes

Tableau 1 : Niveaux de maintenance (norme AFNOR).

5. Les opérations de maintenance

Ne sont vues ici que les opérations essentielles :

5.1 Les opérations de maintenance corrective

5.1.1 Le dépannage

Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée (EN 13306 : avril 2001). Le dépannage n'a pas de condition d'application particulières. La connaissance du Comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps.

5.1.2 La réparation

Action physique exécutées pour rétablir la fonction d'un bien en panne (EN 13306 : avril 2001). L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

5.2 Les opérations de maintenance préventive

5.2.1 Les inspections

Contrôles de conformité réalisent mesurant, observent, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En générale, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités maintenance (EN 13306 : avril 2001).

5.2.2 Visites

Opération de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

5.2.3 Contrôles

Vérification de conformité par rapport à des données rétablies suivies d'un jugement.

6. Diagnostic et surveillance

6.1 Diagnostic

Le diagnostic est l'ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, le degré de défaillance du système, l'origine de ces défaillances et leurs causes.

Donc le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier la défaillance et/ou les défauts qui affectent un système. Il permet d'améliorer la qualité et de réduire les coûts en intervenant au cours de certaine phase du cycle de vie d'un produit[12].

6.2 Défaut (panne, défaillance)

Évènement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

6.3 Disponibilité

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois que l'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance.

6.4 Sécurité

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, ou l'environnement de l'un et de l'autre. Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident, sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparaît que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite.

6.5 Qualité

Degré (ou mesure) avec lequel un produit convient aux besoins du client. La qualité totale est fonction de la qualité du projet, qui mesure la valeur intrinsèque du projet par rapport aux besoins du client, et de la qualité de fabrication, qui mesure la fidélité avec laquelle le produit fabriqué est conforme au projet.

6.6 Fiabilité

6.6.1 Définition

La fiabilité est une caractéristique d'un système mesurée par la probabilité qu'il accomplisse les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée spécifiée. Elle est donc concernée par un fonctionnement sans défaillance du système pendant une durée donnée et est caractérisée par la fonction de répartition $R(t)$ des durées jusqu'à défaillance (fonction fiabilité).

6.6.2 Types de Fiabilité

➤ Fiabilité opérationnelle

Fiabilité obtenue après une durée de fonctionnement d'un dispositif et par suite de défaillances potentielles.

➤ Fiabilité prévisionnelle

Fiabilité estimée avant le fonctionnement d'un dispositif, de façon théorique (banques de données, calculs de durée de vie) ou de façon expérimentale (essais).

6.7 Défaillance

6.7.1 Définition

Une défaillance est une « altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ».

Des synonymes de « défaillance » sont également utilisés dans certains secteurs industriels ou suivant des habitudes corporatives : dommage, anomalie, avarie, défaut, panne, incident, dégradation.

6.7.2 Classification de la défaillance

➤ Défaillance progressive

C'est une défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. Il y a donc possibilité de prévoir une telle défaillance par un examen ou une surveillance antérieurs (exemple : usure des bagues d'un roulement à billes).

➤ Défaillance soudaine

Elle ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et ne peut donc pas être prévue par un examen ou une surveillance antérieurs (exemple : claquage d'un composant électronique).

La figure I.2 montre que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps présente trois domaines :

- **Domaine (I)** : apparition de défaillances dues à des défauts de fabrication et à des contrôles insuffisants. Les essais de rodage (matériel mécanique) ou de déverminage (équipements électroniques) ont pour but d'éliminer la période (I).
- **Domaine (II)** : apparition de défaillances aléatoires sans cause systématique. Cette période est très longue pour les composants électroniques et courts pour les composants mécaniques et les mécanismes.
- **Domaine (III)** : dégradations progressives et irréversibles. C'est le cas de composants mécaniques / mécanismes

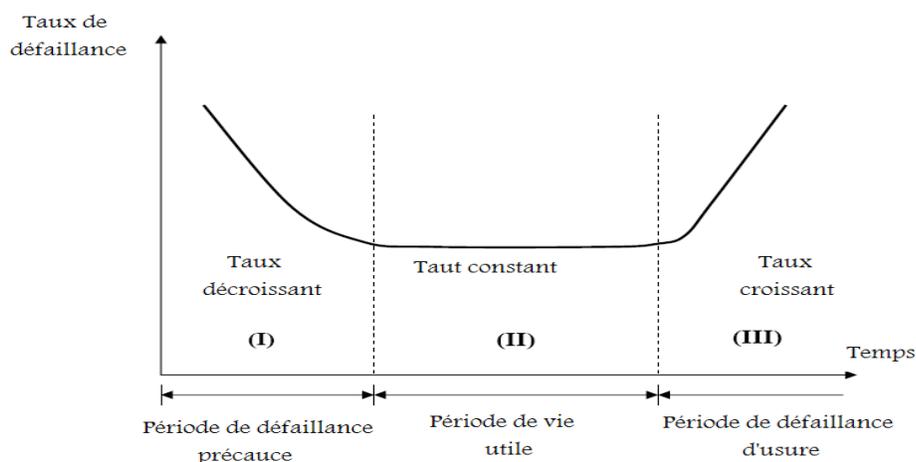


Figure I.2 : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps.

Vue que notre étude est orienté vers la maintenance conditionnelle du quatrième niveau, cette forme de maintenance permet d'assurer le suivie du matériel pendant sont fonctionnement dans le but de prévenir les défaillances attendues.

7. Conclusion

Nous avons traité les différentes formes de maintenance ce qui nous a permet de dégager le type de maintenance qui nous intéresse en l'occurrence la maintenance préventive conditionnelle du quatrième niveau, cette dernière implique la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipement de soutien spécialisé a fin d'assurer le suivie du matériel pendant sont fonctionnement.

L'assurance de la continuité de fonctionnement des moteurs asynchrones nécessite la mise en place des programmes de maintenance. Celle-ci qui était principalement corrective dans les applications standard et préventive dans les applications critiques.

Le diagnostic, partie intégrante de la fonction maintenance, nécessite la connaissance des éléments constitutifs de la machine asynchrone, cette dernière est présentée en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Conception de la machine

Asynchrone

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons détailler l'aspect théorique de la machine asynchrone, La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires.

L'accent est mis sur les éléments de constitution de la machine asynchrone. La compréhension des constitutions est primordiale pour l'analyse des défauts ainsi que leurs causes et effet.

2. machine asynchrone

2.1 Historique

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Son invention est attribuée à *Nikola* Tesla en 1887. En 1889 Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (ou Michael von Dolivo-Dobrowolski), électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891. Le moteur asynchrone est le plus utilisé dans l'industrie, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement de son bon rendement et de son excellente fiabilité, son seul point noir est l'énergie réactive toujours consommé pour magnétiser l'entrefer, les machines triphasés, alimentées directement sur le réseau, représentant la grande majorité des applications.

On distingue deux types de machine asynchrone :

- **Les machines d'induction** : une armature, le rotor ordinaire n'est pas alimentée, les courants qui y circulent sont induits par l'autre armature.
- **Les machines a collecteur** : l'armature tournante est reliée au réseau par un collecteur ce qui permet d'abord ou de prélever de la puissance au moteur sans imposer la fréquence des courants dans celui-ci.

2.2 Constitution du moteur asynchrone

2.2.1 La carcasse

Qui sert de support, elle joue le rôle d'une enveloppe, elle assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'aire de ventilation.

2.2.2 Le stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre (0.35 et 0.5) mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties (Figure II.1) : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. 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 leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

Physiquement, on peut effectuer les bobinages statoriques de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements : l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. Pour les petits moteurs, et particulièrement lorsque la réalisation du bobinage est mécanisée, on utilise généralement l'enroulement concentrique [2].

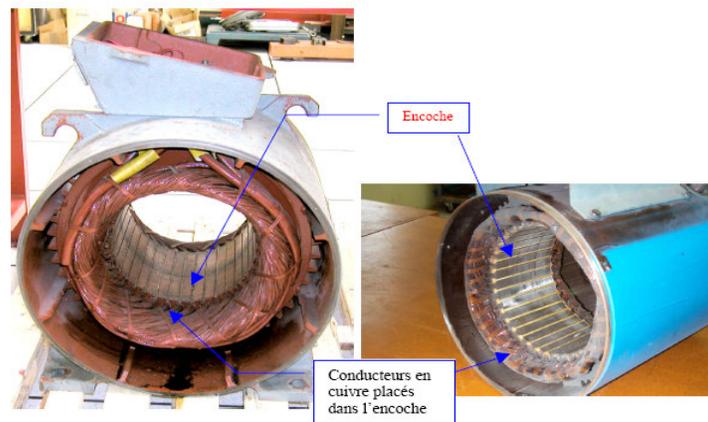


Figure II.1. Photo de deux stators terminés.

2.2.3 Le rotor (induit)

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'écurieuil, 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 couplage 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 magnétique. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [2].

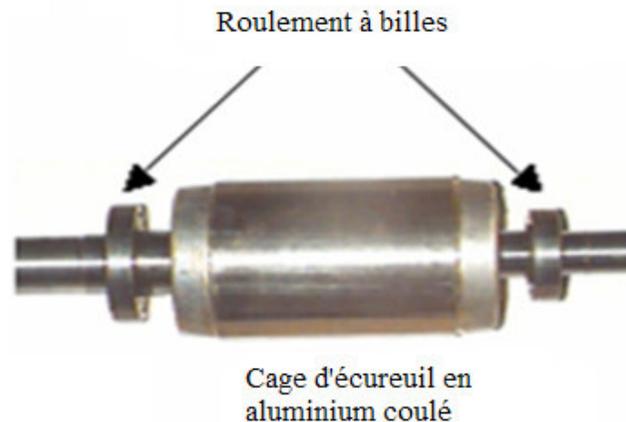


Figure II.2: Rotor de la machine asynchrone.

❖ Rotor à cage

C'est une cage constituée simplement d'un type de barre soit carré soit cylindrique, on peut constater que son couple de démarrage est assez faible.

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écurieuil ; bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieure d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions

notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V) la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances. C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

2.2.4 L'arbre

L'arbre de la machine électrique est un organe de transmission du mouvement de rotation. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor, au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est lui-même supporté par un ou plusieurs paliers suivant la configuration de l'ensemble de la ligne d'arbre [2].

2.2.5 Les ventilateurs

La transformation de l'énergie électrique, ou inversement, ne peut s'effectuer sans pertes, l'énergie ainsi perdue étant transformée en chaleur.

La ventilation a pour but d'extraire les pertes internes de leurs différentes sources et d'assurer un refroidissement aussi homogène que possible des bobinages.

2.2.6 Le circuit magnétique

Il a pour fonction la canalisation des lignes d'induction magnétique, le maintien des conducteurs, la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement (Canaux de ventilation, entrefer). Donc il doit présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique. En régime établi, l'induction en chaque point du circuit est variable. L'origine de cette variation est électrique (ondes magnétiques créées par un circuit électrique pour un stator ou un rotor).

Les pertes fer, hystérésis et par courants de Foucault sont relativement importantes. Dans ce type de circuit on utilise des tôles de faible épaisseur, à grande perméabilité et à pertes magnétiques réduites [8].

2.2.7 Les enroulements

Les enroulements servent à véhiculer les courants électriques à l'intérieur de la machine. On distingue principalement les enroulements statoriques et rotoriques.

Ces enroulements sont, dans le cas général du type polyphasé, chaque encoche contient un certain nombre de conducteurs.

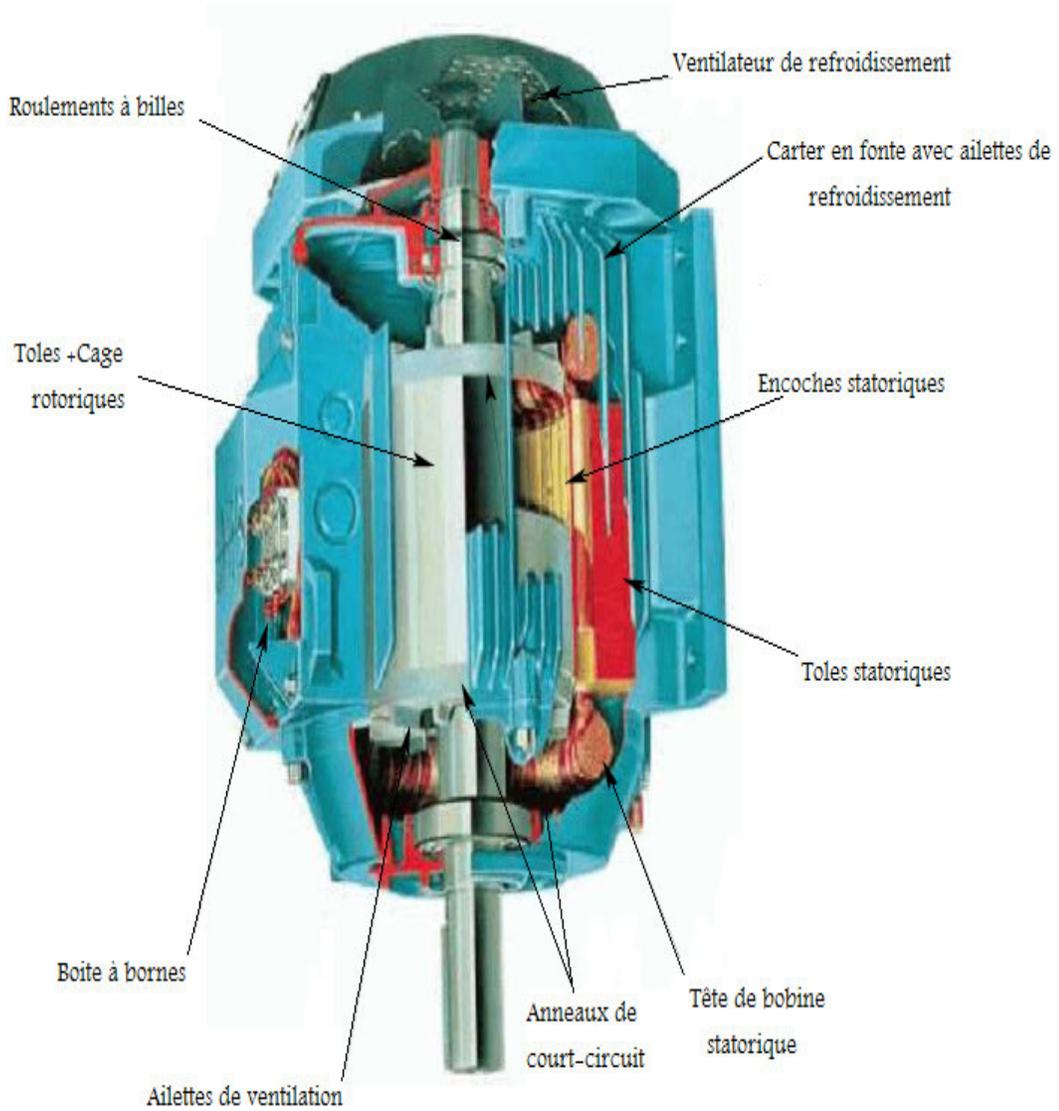


Figure II.3 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à Cage d'écureuil.

3. Type de bobinage appliqué

3.1 Bobinage statorique

Le stator, composé de trois enroulements logés symétriquement dans des encoches situées à la périphérie de ce dernier. Ces enroulements sont alimentés par un système de tensions équilibrées et peuvent être couplés soit en étoile ou en triangle. Le bobinage statorique quant à lui, 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, du nombre d'encoches, du dimensionnement de la machine ou encore à partir de l'environnement de travail.

Pour des raisons techniques de mise en œuvre, et pour limiter les effets pelliculaires, les conducteurs statoriques doivent être en fil de cuivre isolé de petite section. L'isolation étant réalisée à partir d'une résine protectrice. Certaines machines proposent plusieurs sections par encoche, ou les sections peuvent être dans des phases différentes. Une isolation supplémentaire peut être rajoutée pour l'amélioration du mur isolant entre les phases.

En phase finale, lorsque le bobinage est placé dans les encoches, il sera trempé dans un vernis qui le maintiendra collé et améliorera l'isolation électrique. Une cale supplémentaire aide au blocage des conducteurs dans les encoches pour pallier le problème des efforts mis en jeu lors du fonctionnement [4].

3.2 Bobinage rotorique

Le rotor présente quand à lui deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation faite de la machine. Nous distinguons le rotor bobiné qui supporte un bobinage semblable à celui du stator ou ces trios bobinages sont couplés en étoile et court circuits sur eux même. La deuxième configuration qui est la plus usité dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil. Les conducteurs des rotors à cage sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre pré- formées et frettés dans les tôles du rotor à cage d'écureuil. Les conducteurs des rotors à cage sont réalisés par couplage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor [4].

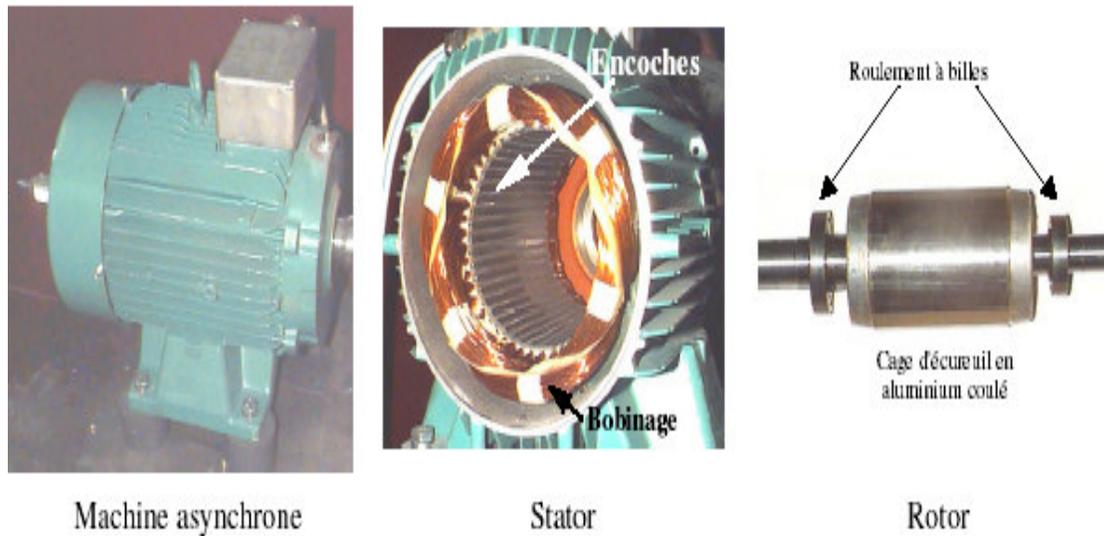


Figure II.4: Photo d'une machine asynchrone de 5,5KV avec le stator et le rotor qui la constituent.

4. Caractéristiques

4.1 Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide : $g = 0$ donc $v_0 = v_s$, le facteur de puissance à vide est très faible (< 0.2) et le courant absorbé reste négligeable (P est petit et Q grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique) [10].

4.2 Fonctionnement en charge

Le moteur absorbe maintenant de la puissance active et fournit la puissance mécanique, le stator appelle un courant actif.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Nous avons décrit les éléments de constitution de cette machine qui nous facilitent la compréhension des différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones et en particuliers les défauts statoriques, ces défauts apparaissent généralement dans les enroulements statoriques logés symétriquement dans des encoches situées à la périphérie du stator, Ces enroulements sont alimentés par un système de tensions équilibré et peuvent être couplés soit en étoile ou en triangle. Le croisement de ces enroulements favorise des défauts statoriques, en particulier le défaut de court-circuit traité en détaille dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Les défauts dans les moteurs asynchrones

1. Introduction

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques.

Parmi les défauts qui nous intéressent dans cette étude est le défaut statorique; celui-ci représente 30 à 40% de l'ensemble des défauts qui affectent la machine ; ce défaut est dû en grande partie aux défauts d'isolement qui engendrent des court-circuit, que ce soit entre phases ou par rapport à la terre.

Une analyse du défaut statorique et ses différentes formes (court-circuit entre spires, court-circuit à la tête de la bobine, ouverture de la phase, court-circuit phase- phase, court-circuit phase- terre) sont réalisés dans ce chapitre.

2. Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine.

2.1 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 III.1 et III.2

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 III.1 et Figure III.2 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.

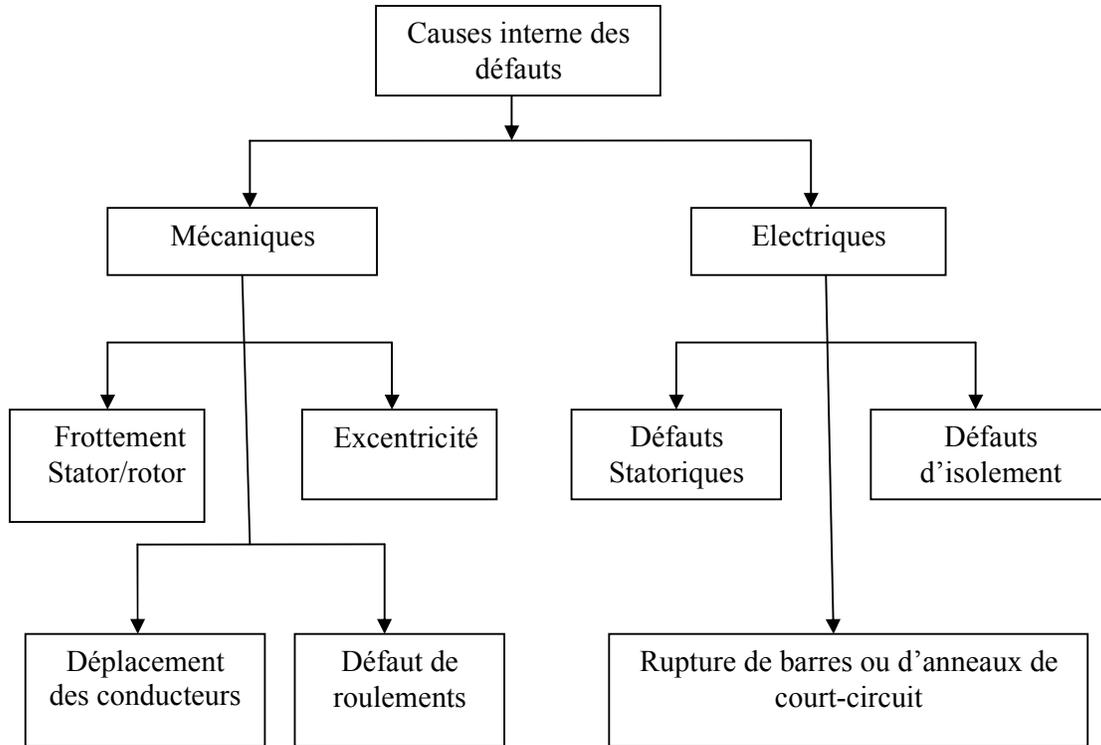


Figure III.1: Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

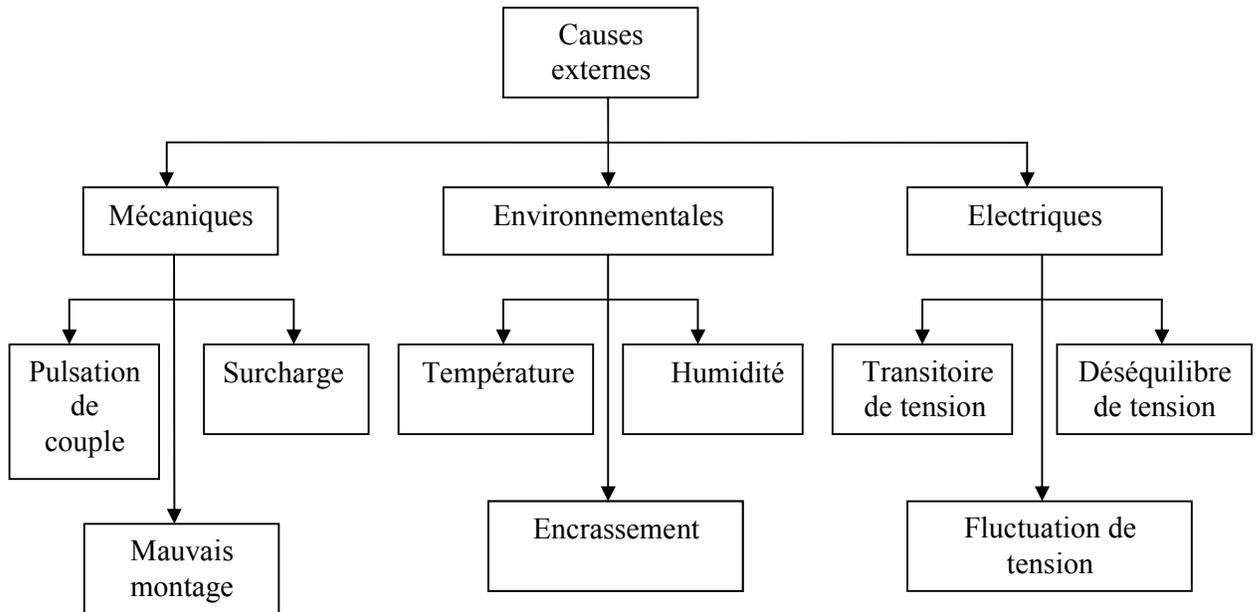


Figure III.2: Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

Celles-ci engendrent par conséquent des sur échauffements et des contraintes *mécaniques* conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation.

Sur le plan *électrique*, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant.

Quand aux origines *environnementales*, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés.

Au niveau de l'*entrefer*, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,...), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures).

Au niveau des paliers nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant généralement à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit le plus souvent à une excentricité dynamique.

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique.

2.2 Études statistique des défaillances de la machine asynchrone

Nous allons dresser une liste des principaux défauts pouvant se produire dans les moteurs asynchrones, leurs causes et statistiques d'occurrence.

2.2.1 Causes des défauts

La figure III.3 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine ; la principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.

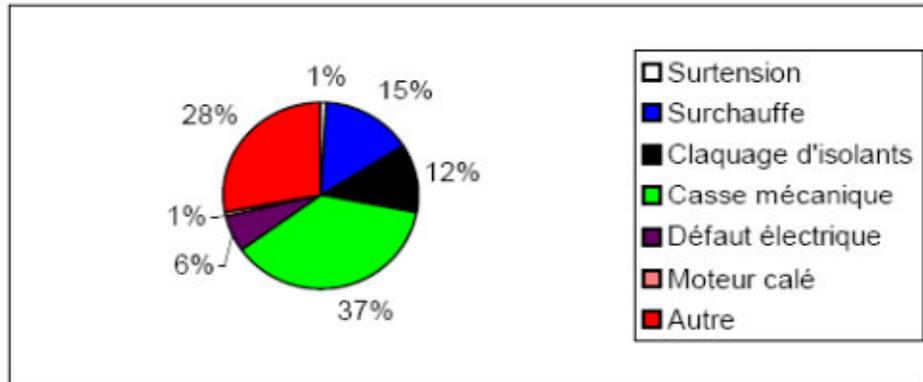


Figure III.3: Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [3]

La figure III.4 précise les conditions qui aggravent le défaut: la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,...). En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.

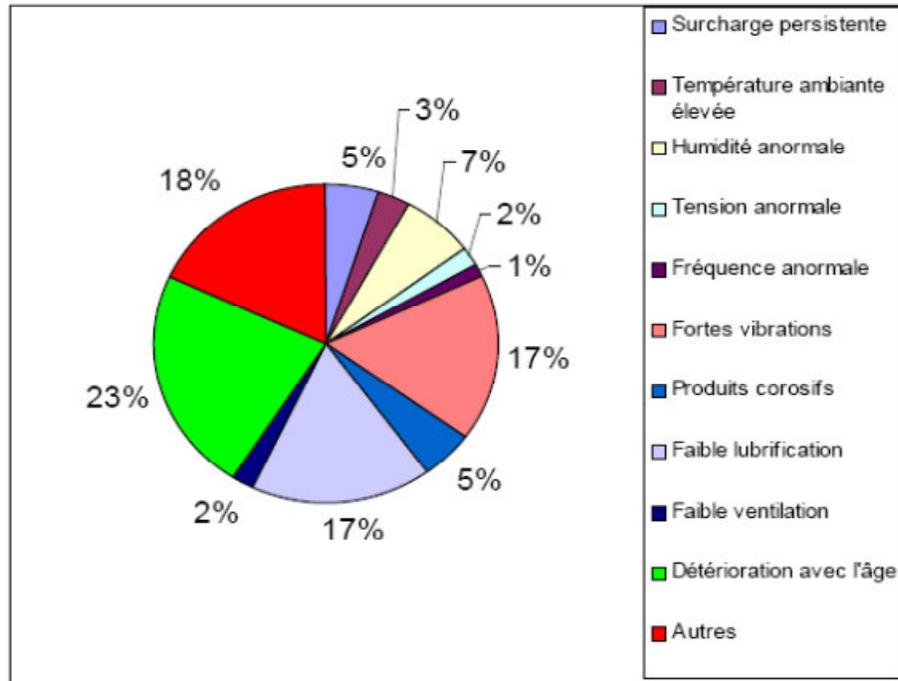


Figure III.4: Facteurs aggravant le défaut [3]

2.2.2 Principaux défauts

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit :

- ✓ Défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator.
- ✓ Connexion anormale des enroulements stator.
- ✓ Cassure de barre ou d'anneau de court-circuit au rotor.
- ✓ Excentricité dynamique ou statique.
- ✓ Axe plié (proche de l'excentricité dynamique)
- ✓ Roulements

Une étude conduite a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure III.5). [3]

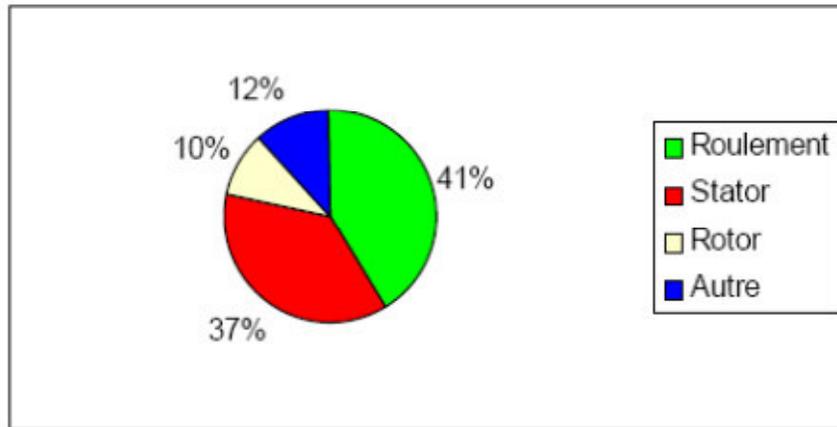


Figure III.5: Répartition des défauts [3].

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branche industrielles ; par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries d'hydrocarbures ou cimentières ou autres.

2.2.2.1 Défauts statoriques

La majeure partie des défauts au stator des machines asynchrones est due à des défauts d'isolement (Figure III.6).

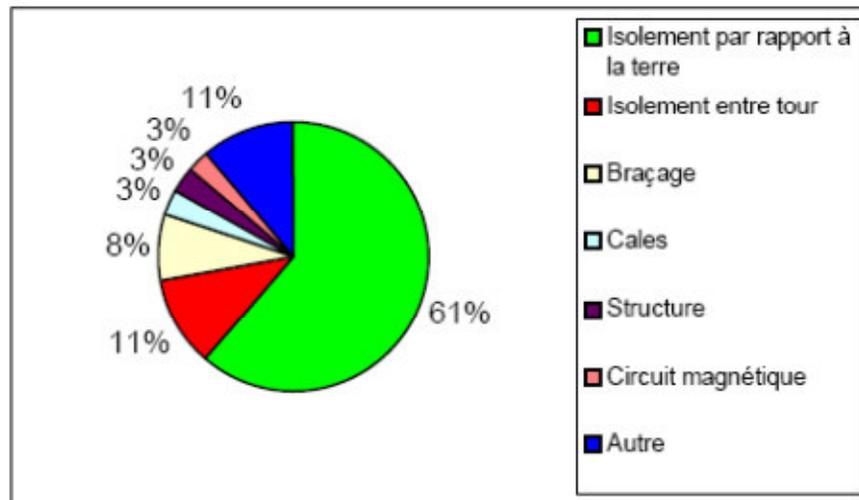


Figure III.6: Répartition des défauts stator [3]

L'existence de courants de court-circuit, que ce soit entre phase ou par rapport à la terre, conduit à la destruction des couches de vernis protecteur des enroulements; par conséquent, la machine devient non équilibrée et change également de classe d'isolation.

2.2.2.2 Défauts rotoriques

La majorité des défauts au rotor ont trait à la cage. La seconde source de défauts provient d'une déformation de l'axe du rotor (Figure III.7).

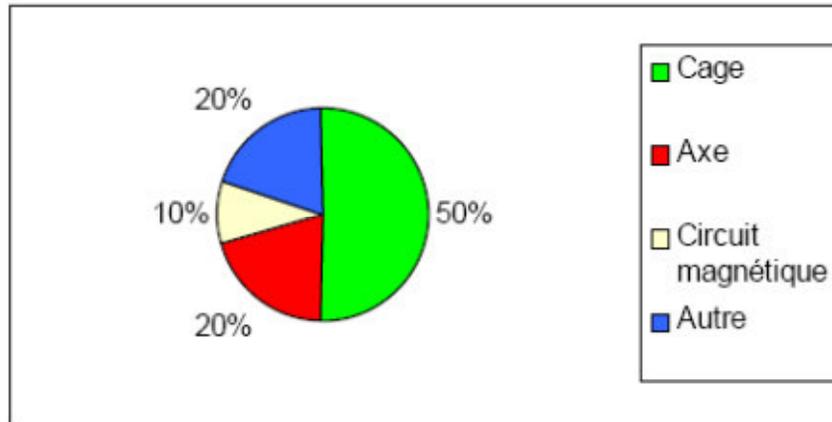


Figure III.7: Répartition des défauts rotorique [3]

Ces deux défauts ont pour origine des contraintes de fonctionnement trop fortes sur la cage qui provoquent sa déformation. Ces défauts s'expliquent par les méthodes employées auparavant pour la construction de la cage; la part de celle-ci dans les défauts rotor et les défauts rotor eux-mêmes ont diminué.

3. Défauts dans les enroulements statoriques

Dans les enroulements statoriques, il peut y avoir cinq cas de défauts à savoir :

- ❖ court-circuit entre spires ;
- ❖ court-circuit à la tête de la bobine ;
- ❖ ouverture de la phase ;
- ❖ court-circuit phase à phase;
- ❖ court-circuit phase- terre.

Ces derniers sont clarifiés dans la figure III.8

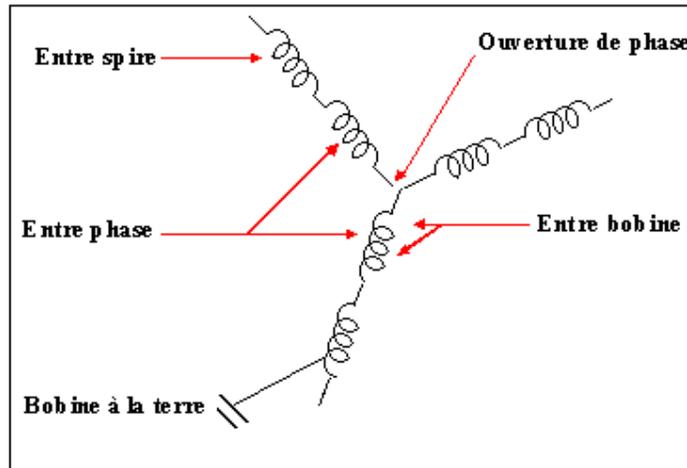


Figure III.8: Représentation des différents défauts statoriques possible.

❖ Les causes des défauts statorique

A terme, ces défauts destructifs pour les couches de vernis protecteur des enroulements, conduisent à une machine déséquilibrée et à une modification de sa classe d'isolation. Cette détérioration au niveau de l'isolation peut exister pour diverse raison parmi lesquelles :

- ✓ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique;
- ✓ Déconnection des attaches des enroulements;
- ✓ Contamination due à l'humidité et à la saleté;
- ✓ Courts circuits ou contraintes de démarrage;

Décharges électiques.

4. Les défauts de courts-circuits statoriques

Un défaut de court-circuit se schématise par la connexion franche entre deux points du bobinage. Les courts circuits entre phases apparaissent préférentiellement dans les enroulements de phases différentes et dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celle-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Les courts –circuits entre spires de la même phase peuvent apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution de nombre de spires effectives de la bobine et de toute façon des spires de court-circuit. Néanmoins, les têtes de bobines sont les plus exposées (croisement de faisceaux).

4.1 Court-circuit dans une phase

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il peut se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre. Nous allons présenter ces deux cas de figure [3].

4.1.1 Court-circuit spire- neutre

La figure III.9 présente les courants statoriques dans le cas du court-circuit spires-neutre. On constate que l'amplitude du courant dans la phase détériorée augmente par rapport aux deux autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont augmentés par rapport au cas du moteur sain. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants [3].

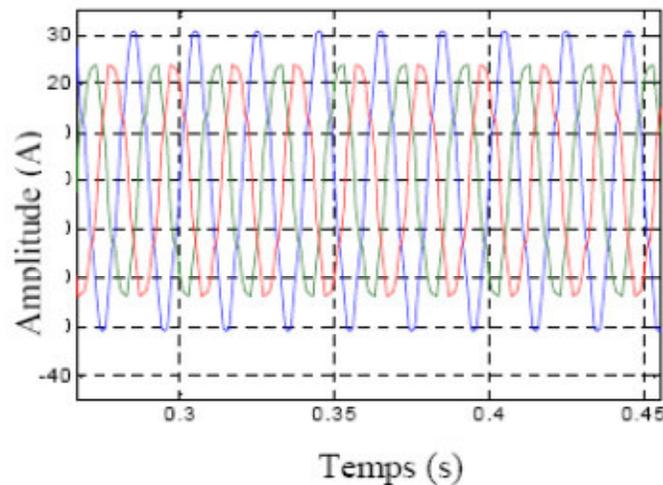


Figure III.9: Courants statoriques du défaut de courts-circuits interspires- neutre [6].

De plus le facteur de puissance globale diminue avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit. Ceci s'explique par la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique [3].

4.1.2 Court-circuit au milieu de la phase

Si le court-circuit se manifeste au milieu du bobinage (20% de spires en court-circuit), on enregistre dans la figure III.10, une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude est constatée pour les autres phases.

La différence par rapport au court-circuit relié au neutre est la dissymétrie entre les courants des phases non affectées par le défaut. Ceci s'explique par le déséquilibre dû au déplacement du neutre entre les trois phases [3].

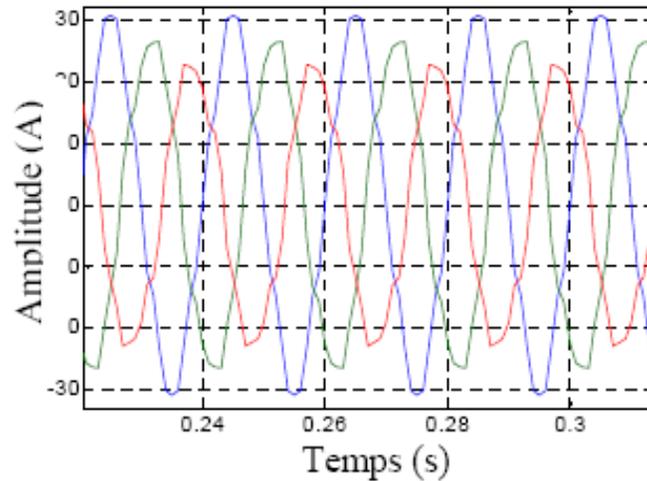


Figure III.10: Courants statoriques du défaut de courts-circuits au milieu de la bobine [6].

4.2 Court-circuit entre phases différentes

Un court-circuit entre phases différentes proche de l'alimentation provoquerait des courants très forts qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation. Et par conséquent l'arrêt immédiat de la machine par le biais des relais de protection.

Cependant, un court-circuit proche du neutre entre deux phases provoque un déséquilibre et sans engendrer l'arrêt de la machine (Figure III.11).

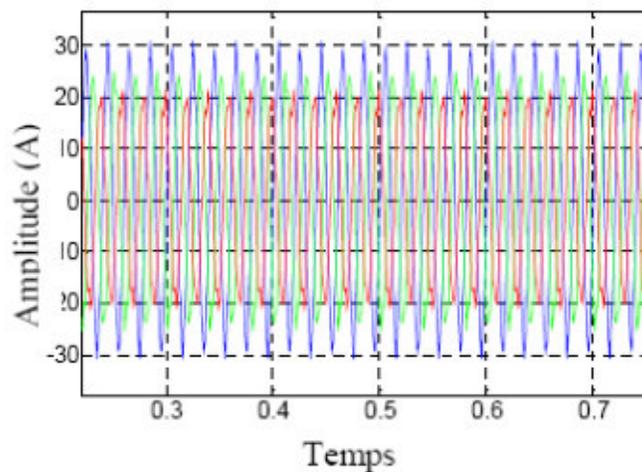


Figure III.11: Courants statoriques du défaut de courts-circuits entre phases différentes [6].

5. Techniques du diagnostic

Dans la littérature, les techniques de diagnostic proposées visent, soit à la mise en valeur ou l'extraction de l'information pertinente contenu dans le signal, soit à la recherche des procédures de traitement automatique depuis l'acquisition jusqu'à la prise de décision.

Nous pouvons, de ce fait, classer ces techniques sous deux approches distinctes :

- La première est *l'approche signal*, elle repose sur la surveillance de l'évolution temporelle et du contenu spectral du signal. Nous lui consacrerons le quatrième chapitre pour en étudier plusieurs de ces techniques.
- La seconde est *l'approche système* dont l'objectif est la mise en œuvre d'une procédure de classification ou d'automatisation des défauts.

5.1 Approche signal

5.1.1 Analyse des grandeurs électriques mesurables

Les méthodes reposent sur une analyse directe du spectre de la variable mesurée (courant ou tension). Elles permettent d'extraire une fréquence particulière (démodulation, filtrage), une bande de fréquence (filtrage, FFT); il s'agit des méthodes dites MCSA (analyse de la signature du courant statoriques du moteur).

➤ Analyse des courants

Les méthodes basées sur l'examen du courant statorique sont désignées sous le nom de « l'analyse des signatures des courants du moteur » (MCSA). Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels ou par la vérification de la variation de certains des composants déjà existant [4].

Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type (magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator). Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut. La

méthode consiste à placer des bobines exploratrices à l'extérieur de la machine perpendiculairement à l'axe du rotor [4].

5.1.2 Surveillance des fluctuations de la vitesse

Détecte les défaillances en mesurant les fluctuations dans la période de rotation du moteur. Cette méthode est particulièrement utile pour détecter les défauts au rotor, les vibrations, l'excentricité, l'asymétrie du rotor, des roulements défaillants et des désalignements d'arbre. Cependant, la machine fonctionnant généralement à vitesse et couple de charge variables, les instruments de mesure doivent être capables de distinguer les variations de vitesse dues au couple de charge et celles dues à des défauts au rotor [6].

5.1.3 Surveillance du couple électromagnétique

Permet la détection de défauts lors de la mise en service ou en fonctionnement. Cette méthode peut détecter des barres de rotor cassées et des courts-circuits au stator. La forme du couple électromagnétique peut être utilisée pour distinguer des déséquilibres engendrés par des barres de rotor cassées ou des enroulements stator défaillants. Le couple électromagnétique peut être soit mesuré, soit estimé par le biais d'observateur d'état par exemple [6].

5.1.4 Surveillance du champ magnétique

Permet de détecter les défauts au stator et au rotor qui peuvent causer des modifications de l'évolution du champ magnétique. Les défauts au rotor peuvent être détectés par une spire de mesure placée au stator de la machine. Les défauts cités peuvent introduire des variations dans la répartition du flux d'entrefer et conduire à un flux axial qui peut être détecté par une spire de mesure placée autour de l'axe de la machine ou des capteurs à effet Hall. En surveillant le flux de fuite axial, il est souvent possible d'identifier de nombreux défauts : barre de rotor cassée, court-circuit dans un enroulement stator [6].

5.2 Approche système

Son principe repose sur un prétraitement du signal et sur sa classification. Après l'adaptation du signal selon l'application désirée (soit par un descripteur, un espace de représentation, une distance...), la classification se fait, en général, soit selon la sévérité du défaut s'il y en a un seul ou par le type de défaut s'il y en a plusieurs. La procédure de classification s'exprime en termes de séparation des classes. Elle est déterminée par un espace de représentation où les classes sont maximalelement séparées et une règle de décision utilisant au mieux cette séparation. La procédure de classification est constituée d'un certain espace de représentation des données et d'une règle de décision qui affecte un individu à une classe à

l'aide d'une fonction discriminante (par exemple une distance d). Ici, l'espace de représentation peut être le domaine temporel, fréquentiel, temps-fréquence, doppler-retard, temps-échelle(ou l'espace de paramètres issus d'une modélisation autorégressive (AR)) [6]

6. Conclusion

L'apparition d'un court-circuit dans le bobinage statorique engendre une augmentation des courants dans les phases affectées, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans

Le circuit rotorique. Le court-circuit au stator engendre aussi une augmentation des courants dans la cage rotorique (barres et anneaux) ce qui peut entraîner leur détérioration.

Nous avons aperçu que le défaut statorique se décompose en cinq formes distinctes. Le point commun entre ces différentes formes du défaut statorique est l'apparition dans le spectre de courant de la composante inverse de fréquence -50 Hz. Cette dernière que nous allons détecter et calculer par différentes méthodes dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Techniques et Méthodes de diagnostic du défaut statorique

1. Introduction

Ce chapitre traite et développe des techniques de calcul et des méthodes sans modèle pour le diagnostic en ligne des défauts statoriques. Cette panoplie de techniques servira en tant que boîte à outils de diagnostic afin de répondre aux différents niveaux de difficulté rencontrés.

C'est dans cette optique que nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs méthodes et techniques afin de balayer le plus de cas possibles. Le point commun de toutes ces méthodes et techniques est l'analyse du courant statorique:

- Soit par le spectre via la transformée de Fourier;
- Soit par l'Algorithme de Goertzel;
- Soit par la démodulation synchrone analogique;

Une étude comparative a été établie entre ces différentes techniques.

2. Techniques de calcul de la composante inverse du défaut statorique

2.1 Introduction

Les défauts au stator des moteurs asynchrones qui représentent 30 à 40% des défauts sont dus en grande partie aux défauts d'isolement qui engendrent des courts-circuits, que ce soit entre phases ou par rapport à la terre. A terme, ces défauts destructifs pour les couches de vernis protecteur des enroulements conduisent à une machine non équilibrée et à une modification de sa classe d'isolation.

L'isolation du stator ou de l'armature peut être détériorée pour diverses raisons :

- ✓ Augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique;
- ✓ Déconnexion des attaches des enroulements;
- ✓ Contamination due à l'humidité et à la saleté;
- ✓ Courts-circuits ou contraintes de démarrage;
- ✓ Décharges électriques.

Un autre cas de déséquilibre est celui de la tension d'alimentation. Il contribue également à un sur-échauffement des enroulements statoriques. Tous ces défauts réduisent la durée de vie des machines en précipitant le défaut de court-circuit entre spires. Vu le caractère imprévisible de ces défauts, une surveillance en ligne, périodique ou continue, de l'état statorique du moteur permet de garantir un entraînement sécurisé et de prévenir des événements indésirables.

2.2 Système triphasé déséquilibré et pollué

Un système triphasé de courant équilibré représente uniquement un système de séquence directe; par contre, un système triphasé de courant déséquilibré peut être représenté par l'association d'un système direct, d'un système inverse et d'un système homopolaire. Dans un système où le neutre n'est pas relié, le courant dans la phase m s'écrit de façon générale sous la forme:

$$i_m(t) = \sum_{k \in \{-1,1\}} \sum_{h=0}^n I_{6h+k} \sqrt{2} \cos\left((6h+k)\omega_s t + \varphi_{h,k} - k(m-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad (1)$$

Où I_{6h+k} est la valeur efficace des termes fondamentaux ($h=0$) ou harmoniques ($h \neq 0$) directs ($k=1$) ou inverses ($k=-1$).

Une représentation vectorielle des courants statoriques peut être définie de façon générale par:

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} \sum_{m=1}^3 i_m(t) \cdot a^{(m-1)} \quad \text{Ou} \quad a = e^{j2\pi/3} \quad (2)$$

Le vecteur des courants statoriques s'écrit :

$$\bar{i}_s = I_1 \sqrt{2} e^{j(\omega_s t - \varphi_1)} + \sum_{h=1}^n I_{6h+1} \sqrt{2} e^{j((6h+1)\omega_s t - \varphi_{6h+1})} + I_{-1} \sqrt{2} e^{-j(\omega_s t - \varphi_{-1})} + \sum_{h=1}^n I_{6h-1} \sqrt{2} e^{-j((6h-1)\omega_s t - \varphi_{6h-1})} \quad (3)$$

En définissant les amplitudes complexes des différentes composantes par :

$$\bar{I}_{6h+k} = I_{6h+k} e^{kj(6h+k) - \varphi_{(6h+k)}} \quad (4)$$

Le vecteur des courants statoriques devient:

$$\bar{i}_s = \sum_{h=0}^{n1} \bar{I}_{6h+1} e^{j(6h+1)\omega_s t} + \sum_{h=0}^{n1} \bar{I}_{6h-1} e^{-j(6h-1)\omega_s t} \quad (5)$$

L'expression du vecteur courant statorique est composée de deux systèmes, l'un de séquence Positive:

$$\bar{i}_d = \sum_{h=0}^{n1} \bar{I}_{6h+1} e^{j(6h+1)\omega_s t} \quad (6)$$

Et l'autre de séquence négative :

$$\bar{i}_i = \sum_{h=0}^{n1} \bar{I}_{6h-1} e^{-j(6h-1)\omega_s t} \quad (7)$$

Soit :

$$\overline{i_s} = \overline{i_d} + \overline{i_i} \quad (8)$$

2.3 Validation expérimentale

Les figures ci-dessous illustrent que le fondamental du vecteur courant de séquence directe a une forme circulaire. Lors du déséquilibre, il apparaît une séquence inverse de courant qui transforme le vecteur de la forme circulaire à une forme elliptique, Cette déformation est causée par la soustraction de deux courants, l'un direct et l'autre inverse $i_s = i_d - i_i$ illustré dans le premier quadrant de la figure IV.3 ; dans le second quadrant, c'est l'effet inverse avec l'addition de deux courants $i_s = i_d + i_i$; Il en est de même pour les deux autres quadrants.

Les figures IV(1,2) représentent respectivement : le vecteur courant statorique pour un moteur sain alimenté par une tension idéale ; le vecteur courant statorique pour un moteur ayant un court-circuit entre spires d'une phase statorique de 30%.

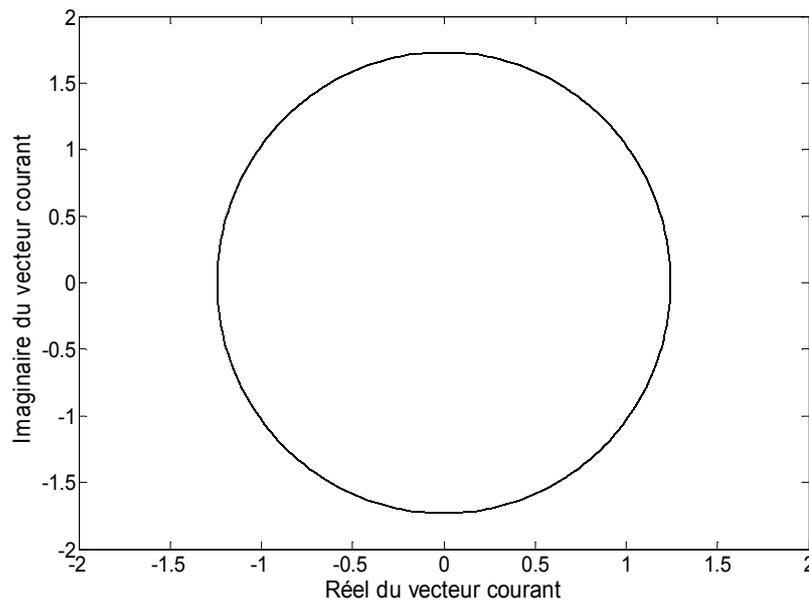


Figure IV.1 : Vecteur courant statorique pour un moteur sain alimenté par une tension idéale.

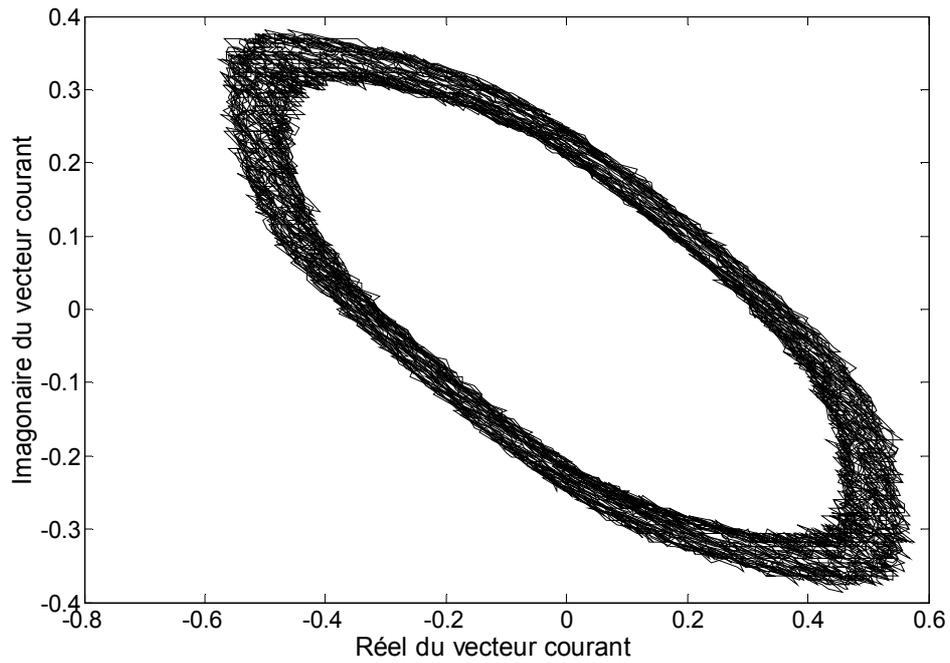


Figure IV.2 : Vecteur courant statorique pour un moteur ayant un court-circuit entre spires d'une phase statorique de 30%.

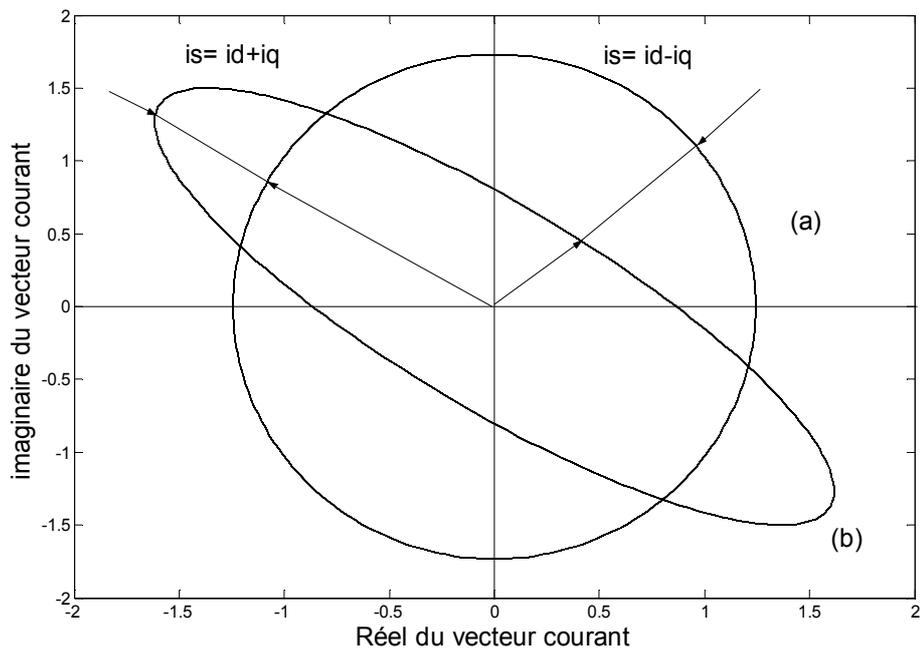


Figure IV.3 : Vecteur courant sain (a) et déséquilibré (b)

3. Analyse spectrale du vecteur courant

L'analyse spectrale du courant statorique est un outil d'analyse performant qui permet de mettre en évidence la présence des fréquences caractéristiques et notamment celles liées aux défauts. Le spectre de courant d'une phase ne permet pas d'avoir la composante inverse de courant, par contre l'analyse spectrale du vecteur d'espace des courants statoriques permet de séparer deux séquences de spectres : l'une directe définit dans la plage fréquentielle $[0, f_{\max}]$ l'autre inverse définit dans la plage fréquentielle $[-f_{\max}, 0]$.

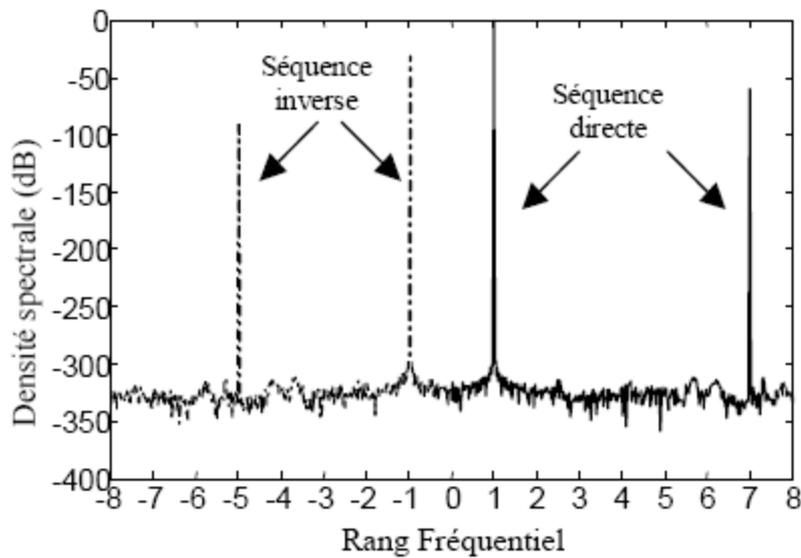


Figure IV.4 Exemple de spectre d'un vecteur d'espace de courants Déséquilibrés.

L'analyse de Fourier fait partie des méthodes non paramétriques d'estimations spectrales. Son application pour analyser le vecteur courant statorique va fournir de plus amples informations sur son contenu spectral.

3.1 Transformée de Fourier discrète du vecteur courant

Le vecteur courant statorique après discrétisation devient :

$$\left[\vec{i}_s(n) \right] = \left[\bar{I}_1 e^{\frac{2\pi j f_s n}{N}} + \sum_{h=1}^n \bar{I}_{6h+1} e^{\frac{2\pi j (6h+1) f_e n}{N}} + \bar{I}_{-1} e^{\frac{2\pi j f_e n}{N}} + \sum_{h=1}^n \bar{I}_{6h-1} e^{\frac{2\pi j (6h-1) f_e n}{N}} \right] \quad (9)$$

La transformée de Fourier discrète de ce vecteur est évaluée au sens de [7], [1] pour déterminer des harmoniques d'une série de Fourier:

$$\bar{I}(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{i}_s[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (10)$$

En posant:

$$W^{k.n} = e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (11)$$

On obtient la notation suivante avec

$$[\bar{I}(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [\bar{i}_s(n)] \quad \text{Avec } k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

où $[W^{kn}]$ est la matrice de rotation de dimension (N, N) .

On rappelle que l'emploi de la DFT est gouverné par trois règles définissant le domaine temporel, le domaine fréquentiel et la fréquence de Nyquist :

$T = \frac{N}{f_e}$	Domaine temporelle
$f_{\max} = \Delta f \cdot N / 2$	Domaine fréquentiel
$f_e = 2 \cdot f_{\max}$	Fréquence de Nyquist

Où:

N : Nombre d'échantillons.

Δt : Pas d'échantillonnage temporel.

$\Delta f = \frac{f_e}{N} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{T}$: Incrémentation fréquentielle (résolution spectrale).

f_{\max} : Fréquence maximale du signal.

Le calcul par la DFT des k composantes de fréquences à partir des N échantillons de vecteur courant nécessite N^2 multiplications complexes pour $k = N$, ce qui représente un énorme volume de calcul.

Beaucoup d'éléments de la matrice de rotation $[W^{kn}]$ sont égaux au signe près. La transformée de Fourier rapide (FFT) exploite cet avantage pour réduire le volume de calcul. L'algorithme de Cooley-Tukey est le plus connu et le plus utilisé parmi plusieurs autres algorithmes de la FFT. On passe ainsi de N^2 opérations complexes à $(N/2)\log_2(N)$

opérations de calcul. Par exemple, avec un nombre d'échantillons $N = 1000$, la DFT nécessite un million d'opérations complexes, alors que la FFT n'exige que 4982 opérations, une réduction de l'ordre de 200 fois. C'est pourquoi l'algorithme de la FFT est largement utilisé pour le traitement fréquentiel des signaux temporels.

Le calcul de la composante inverse \bar{I}_{-1} passe inévitablement par le calcul des composantes de séquences directes $k = 1 \dots N / 2$, $[I(f_{6h+1})]$ ce qui représente un calcul long et inutile. Pour éviter de commencer par les composantes directes, on propose de calculer la FFT du vecteur d'espace inverse:

$$\bar{i}_i = \frac{2}{3} (i_a(t) + a^2 i_b(t) + a i_c(t)) \tag{13}$$

La discrétisation du vecteur courant inverse est présentée comme suit :

$$[\bar{i}_i(n)] = \left[\bar{I}_{-1} W^{-nf_s} + \sum_{h=1}^{n1} \bar{I}_{6h-1} W^{-n(6h-1)f_s} + \bar{I}_1 W^{nf_s} + \sum_{h=1}^{n1} \bar{I}_{6h+1} W^{n(6h+1)f_s} \right] \tag{14}$$

3.2 Validation expérimentale

Le vecteur courant équilibré ne présente pas de composante inverse (figure IV.5). Un court circuit dans les enroulements statoriques engendre un déséquilibre de courant qui se manifeste par l'apparition d'une composante spectrale inverse $-f_s$ (figure IV.6); cette dernière évolue en densité avec la sévérité du défaut. Elle est considérée comme un indice fiable de diagnostic.

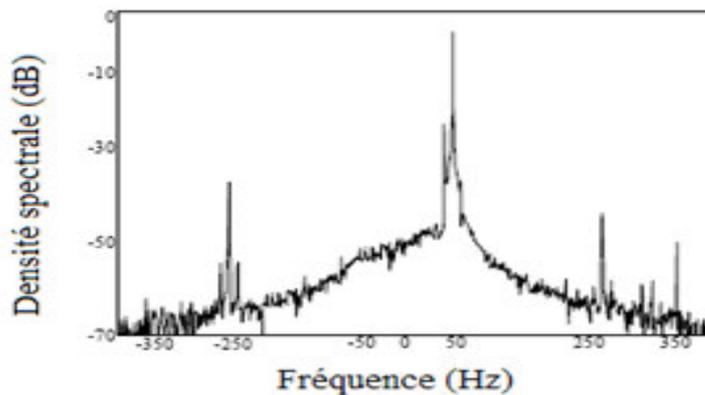


Figure IV.5 Spectre du vecteur courant statorique sain [11]

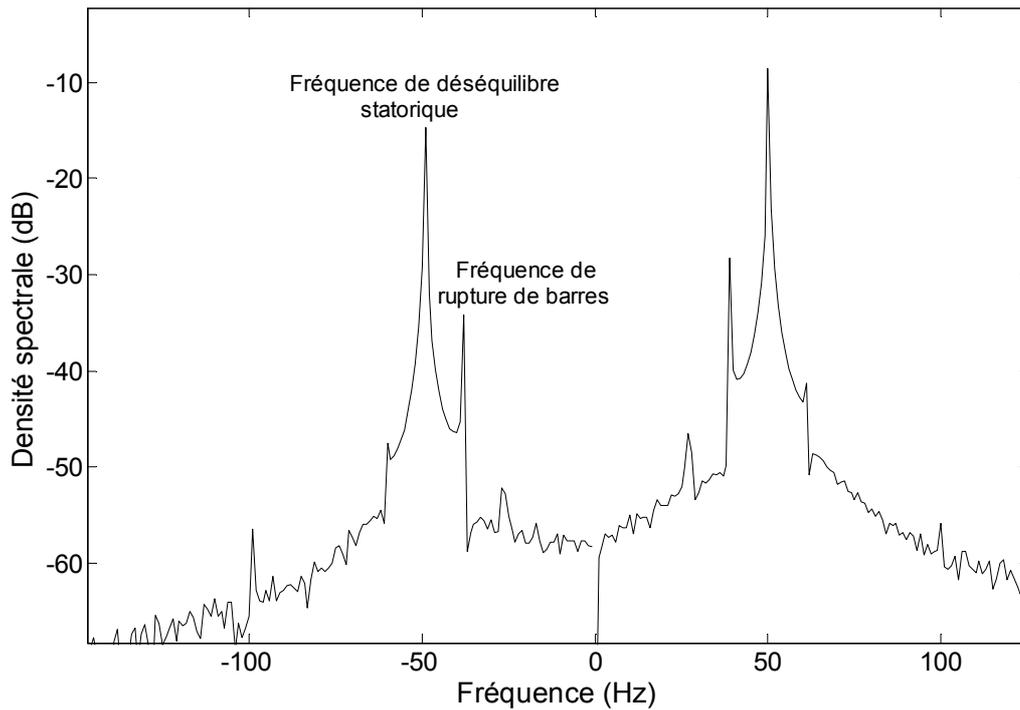


Figure IV.6 : spectre du vecteur courant statorique déséquilibré de 30%.

4. Algorithme de Goertzel

L'algorithme de Goertzel de second ordre consiste à déterminer le spectre $[\bar{I}_{f_k}]$ du vecteur Courant $[\bar{i}_s(n)]$ d'une manière rapide et récursive [9]. Il permet de réduire le nombre d'opérations de calcul, en passant de $N/2 \log_2(N)$ opérations exigées par la FFT à moins de $\log_2(N)$ opérations. Ce spectre coïncide à l'instant n avec la sortie d'un filtre RII défini par la relation à la différence suivante :

$$y_k(n) = x_k(n) - W^k x_k(N-1) \tag{15}$$

$$I(f_k) = y_k(N) \tag{16}$$

La fonction de transfert de l'algorithme de Goertzel est définie par :

$$H_K(z) = \frac{1 - W^k z^{-1}}{1 - 2 \cos(2\pi k / N) Z^{-1} + Z^{-2}} \tag{17}$$

L'implémentation de l'algorithme est la suivante :

$$\bar{x}_k(n) = \bar{i}_s(n) + 2 \cos(2\pi k / N) \bar{x}_k(n-1) - \bar{x}_k(n-2) \tag{18}$$

La forme canonique du filtre est donnée par la figure IV.7 :

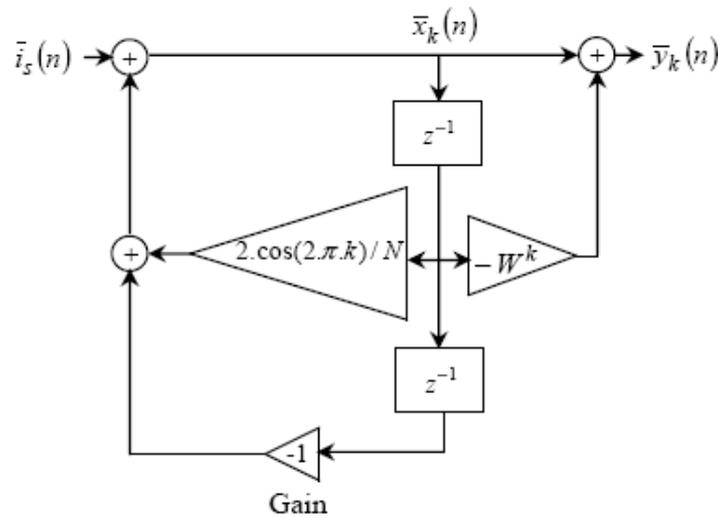


Figure IV.7 Représentation graphique de la fonction de transfert de l’algorithme de Goertzel.

L’algorithme de Goertzel calcule la DFT sur une portion choisie d’un long signal ; il apporte une souplesse et une réduction du temps de calcul assez conséquente relativement aux méthodes précédentes.

4.1 Validation expérimentale

La figure IV.8 montre l’extraction de la composante inverse du vecteur courant statorique par l’algorithme de Goertzel. Une très bonne résolution spectrale de $\pm 1\text{Hz}$ est obtenue avec un nombre d’échantillons $N=10$ d’un signal qui comptait initialement $N=10000$ échantillons

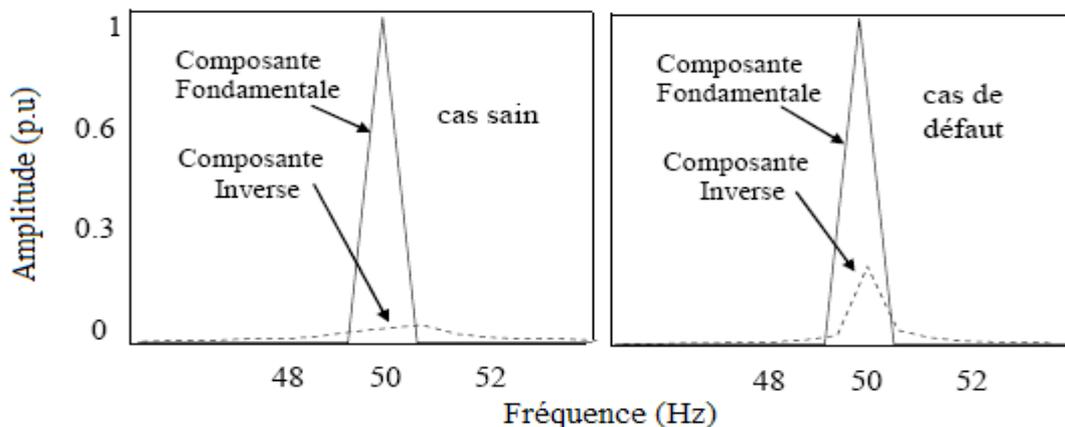


Figure IV.8 Extraction de la composante inverse de déséquilibre par l’algorithme de Goertzel.

5. Analyse par la démodulation synchrone du vecteur courant

Cette nouvelle méthode se base sur la transformation des grandeurs triphasées i_1, i_2 et i_3 dans un repère fixe de coordonnées α, β suivie d'une autre transformation dans un repère tournant de coordonnées d, q dans le sens inverse au fondamental statorique. Elle s'apparente aux méthodes de détermination de la composante fondamentale des courants de ligne dans les méthodes de filtrage actif [5].

La transformation du système de courants triphasés dans un repère de coordonnées fixes conduit à:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$i_{\alpha\beta} = i_\alpha + ji_\beta = \bar{I}_1 e^{j\omega_s t} + \bar{I}_{-1} e^{-j\omega_s t} + \sum_{h=1}^{n1} \bar{I}_{6h\pm 1} e^{\pm j(6h\pm 1)\omega_s t} \quad (20)$$

La transformation du vecteur courant d'un repère fixe de coordonnées $i_{\alpha\beta}$ vers un repère tournant dans le sens inverse du fondamental donne :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & -\sin(\omega_s t) \\ \sin(\omega_s t) & \cos(\omega_s t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\bar{i}_{dq} = i_d + ji_q = \bar{I}_{-1} + \bar{I}_1 e^{j2\omega_s t} + \sum_{h=1}^{n1} \bar{I}_{6h\pm 1} e^{\pm j(6h\pm 2)\omega_s t} \quad (22)$$

Le vecteur courant statorique (29) contient:

- ✓ Une composante fondamentale à deux fois la fréquence statorique ;

$$\hat{I} = \bar{I}_1 e^{j2\omega_s t} \quad (23)$$

- ✓ Une composante alternative due aux harmoniques ;

$$\tilde{I} = \sum_{h=1}^{n1} \bar{I}_{6h\pm 1} e^{j(6h\pm 1)\omega_s t} \quad (24)$$

- ✓ Une composante continue correspondant à la composante inverse ;

$$I = \bar{I}_{-1} \quad (25)$$

5.1 Démodulation analogique

La démodulation analogique se base sur le filtrage passe-bas de deux composantes, une composante à deux fois la fréquence statorique \hat{I} (23) et une composante alternative due aux harmoniques \tilde{I} (24) ; ceci afin de ne conserver que la composante continue (25).

La sommation des carrés de chaque terme i_{d-1} et i_{q-1} (figure IV.9) permet d’obtenir l’amplitude de la composante inverse. Le choix de la fréquence de coupure ne pose pas de problème car les fréquences courantes sont des multiples de la fréquence électrique. Cette approche offre une réponse rapide dépendant uniquement de la réponse transitoire du filtre.

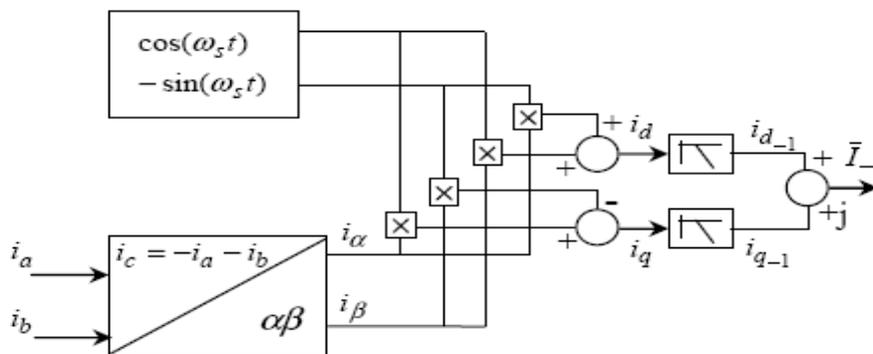


Figure IV.9 : Démodulation analogique du vecteur courants statorique

5.1.1 Validation expérimentale

On constate d’après la figure IV.10 que la démodulation analogique du vecteur courant a permis l’extraction de la composante inverse. Cette technique est plus adaptée à une surveillance en ligne.

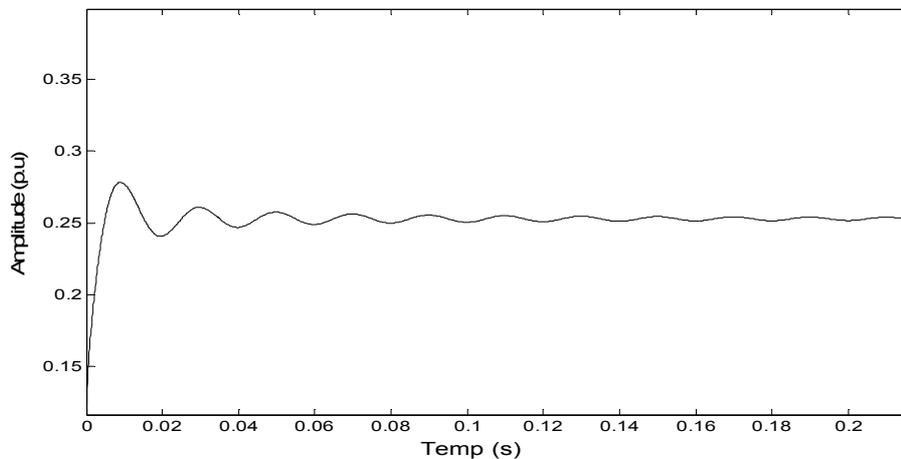


Figure IV.10: Extraction de la composante inverse par la démodulation analogique du vecteur courant statorique.

6. Etude Comparative

La transformée de Fourier DFT et sa version rapide FFT permettent de calculer la composante inverse de déséquilibre de courant avec une bonne précision et une bonne résolution spectrale, quoiqu'elles nécessitent un nombre d'échantillons très élevé ainsi qu'une forte puissance de calcul ; par conséquent, ces techniques ne sont réalisables qu'en hors ligne.

Malgré la souplesse de calcul apportée par l'algorithme de Goertzel, ce dernier n'est, en fait, que des effets de zooms sur une partie d'un spectre initialement obtenu à une fréquence d'échantillonnage f_e et avec un nombre d'échantillons $N = f_e$ sur une seconde ; néanmoins ils peuvent être utilisés en ligne mais il nécessite une forte puissance de calcul.

La démodulation du vecteur courant fait appel à des transformations de Park souvent utilisées en électrotechnique, notamment lors de la commande vectorielle de la machine asynchrone. Cependant la technique de démodulation analogique, au-delà de son aspect pratique et économique, particulièrement moins coûteuse et moins encombrante, est plus compatible avec les différents schémas de commande de la machine actuellement utilisés.

L'étude comparative de toutes ces techniques est résumée dans le tableau ci-dessous (tableau.1).

Techniques	FFT	Goertzel	Démodulation analogique
Nombre d'échantillons	10000	10	100
Fréquences d'échantillonnage (kHz)	10	10	10
Temps d'acquisition(s)	1	1	0.01
Temps de calcul(s)	0.062	0.015	0.25
Temps total (s)	1.062	1.015	0.26
Application	Hors ligne	En ligne	En ligne
Calcul initial	non	oui	non

Tableau.1. Tableau comparatif des différentes techniques.

7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une panoplie de techniques et méthodes sans modèle pour le diagnostic en ligne et hors ligne des défauts statoriques.

La transformée de Fourier discrète DFT permet de calculer avec précision la composante symétrique inverse quoiqu'elle nécessite un grand nombre d'opérations de calcul et qui sont fortement liées à la résolution spectrale

L'algorithme de Goertzel permet de réduire considérablement le nombre d'opérations de calcul (1000 fois moins qu'une DFT) ; il représente ainsi un bon choix pour une surveillance en-ligne moins pénalisant en terme de temps de calcul.

La démodulation analogique est très efficace en termes de précision et de temps de réponse qui ne dépend que du régime transitoire du filtre utilisé.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'assurance de la continuité de fonctionnement des moteurs asynchrones nécessite la mise en place des programmes de maintenance. Pour cela nous avons traité plusieurs formes de maintenance et nous avons mis l'accent sur la maintenance préventive conditionnelle de quatrième niveau qui implique la maîtrise d'une technique ou technologie particulière.

Le diagnostic des moteurs asynchrones nécessite la connaissance des éléments constitutifs de ce type de machine qui nous facilite la compréhension des différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones et en particuliers les défauts statoriques. Ces défauts apparaissent généralement dans les enroulements statoriques logés symétriquement dans des encoches situées à la périphérie du stator, Ces enroulements sont alimentés par un système de tensions équilibrées et peuvent être couplés soit en étoile ou en triangle. Le croisement de ces enroulements favorise des défauts statoriques, en particulier le défaut de court-circuit. L'apparition de ce dernier dans le bobinage statorique engendre une augmentation des courants dans les phases affectées, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Le court-circuit au stator engendre aussi une augmentation des courants dans la cage rotorique (barres et anneaux) ce qui peut entraîner leur détérioration.

L'apparition dans le spectre de courant de la composante inverse de fréquence -50 Hz que nous allons détecter et calculés par différentes méthodes et techniques.

La transformée de Fourier discrète DFT permet de calculer avec précision la composante symétrique inverse quoiqu'elle nécessite un grand nombre d'opérations de calcul et qui sont fortement liées à la résolution spectrale.

L'algorithme de Goertzel ont permis de réduire le volume de calcul.

La démodulation analogique est très efficace en termes de précision et de temps de réponse.

Cependant la technique de démodulation analogique au-delà de son aspect pratique et économique, particulièrement moins coûteuse et moins encombrante, est plus compatible avec les différents schémas de commande de la machine actuellement utilisés.

Bibliographies

- [1] ANDRIA. G. "Inverter drive signal processing via DFT and EKF" IEE Proceedings, vol. 137 Pt.B, N.2, March, 1990.
- [2] Smaïl BACHIR « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique » ; Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Poitiers ; Présentée et soutenue le 17 décembre 2002.
- [3] Tarek BOUMEGOURA , recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateur en vue du diagnostic",26.3.2001.
- [4] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique, option Réseau Electrique, Thème "Analyse et traitement des signaux causé par le fonctionnement anormal des Machines Asynchrone, diriger par: BOUZERARA Ramdane, présenter par : Bouzerara Brahim_Driuo Farid, Promotion Juin 2006.
- [5] KHEZZAR A., Davat B., " Active filtering of torque ripples in double stator Synchronous machines ", Mathematics and Computers in Simulation, vol. 46, n°: 3-4, 1 mai 1998, p. 349-359.
- [6] Dr.Monsieur Abdesselam LEBAROUD, "Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la Machine Asynchrone associée à des sources variables".
- [7] PROAKIS J. G., Manolakis D.G., "Digital Signal Processing; principales, algorithms and Applications", 2ème editions, New York: Macmillan, 1992.
- [8] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique, option Réseau Electrique, Thème : « Surveillance et diagnostic des défauts dans la machine asynchrone », diriger par: Dr Medoued Ammar, présenter par : SAAD Aissous Souad ; BOUDOUKHANA Chahrazed
- [9] TONG Zhao, Zinger D.S., " Induction motor speed detection by applying Goertzel's algorithm to current harmonics ", Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE , vol. 1 , 6-10 février. 2000, p. 140-143.

- [10] NANDI S., Toliyat H.A. Fault diagnosis of electrical machines-a review, Electric Machines and Drives, International Conference IEMD '99 , p. 219-221, 9-12 mai, 1999, Washington, USA.
- [11] ABED A., Weinachter F., Razik H., Rezzoug A., " Real-time implementation of the sliding DFT applied to on-line's broken bars diagnostic " Electric Machines and Drive Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International 2001.
- [12] ROLAND Casimir," Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance de formes"; 18.09.2003, Ecole centrale de lyon.

[HEL 7.9.0] Le Help MATLAB; Version 7.9.0

Les sites

http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone

http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_passe-bas

[Moteur asynchrone.htm](#)

[Machine asynchrone triphasée.htm](#)

[Machine asynchrone - Définition - Encyclopédie scientifique en ligne.htm](#)