



ETUDES DE CAS PRATIQUES : MACHINES ÉLECTRIQUES

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

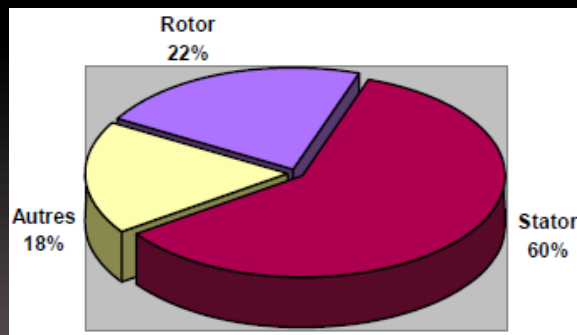
Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurieul

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, **électriques, mécaniques** ou bien encore **magnétiques**.

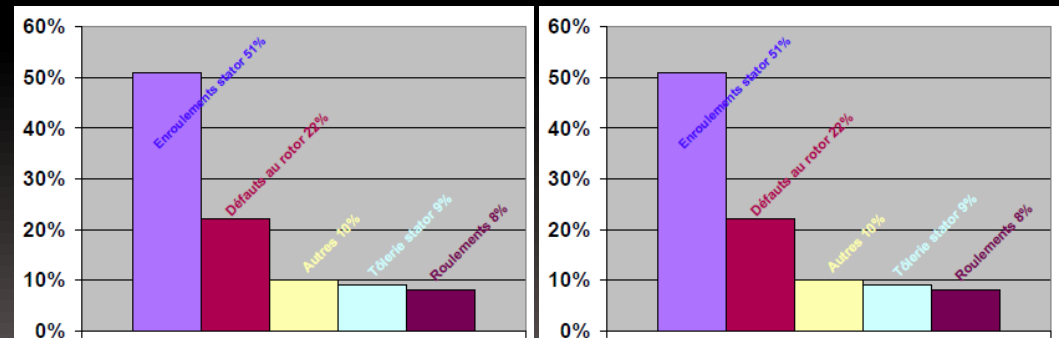
Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en **trois groupes** :

- ✓ **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- ✓ **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- ✓ **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Pour les statistiques des défauts voir :



Proportion des défauts



a) Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

b) Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Défaillances au rotor

Pour le **rotor**, les défaillances sont essentiellement **dues** à un problème :

- ✓ thermique (surcharge,...)
- ✓ électromagnétique (force en $B^2(t)$,...)
- ✓ résiduel (déformation,...)
- ✓ dynamique (arbre de transmission,...)
- ✓ mécanique (roulement,...)
- ✓ environnemental (agression,...)

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

- ✓ Rupture de barres
- ✓ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- ✓ Excentricité statique et dynamique

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurie

Défaillances au rotor

Ruptures de barres

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.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Défaillances au rotor

Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de **modulation d'amplitude sur les courants statoriques** similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurueil

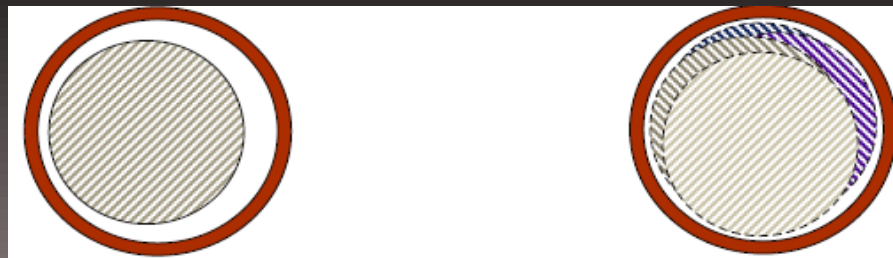
Défaillances au rotor

Excentricité statique et dynamique

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

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- **l'excentricité statique**, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- **l'excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
- **l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte'**, associant les deux cas précédemment cités On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Excentricité statique

Excentricité dynamique

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- ✓ thermique (surcharge,...)
- ✓ électrique (diélectrique,...)
- ✓ mécanique (bobinage,...)
- ✓ environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- ✓ défaut d'isolant
- ✓ court-circuit entre spires
- ✓ court-circuit entre phases
- ✓ court-circuit phase/bâti
- ✓ déséquilibre d'alimentation
- ✓ défaut de circuit magnétique

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurueil

Défaillances au stator

Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits.

Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✓ courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- ✓ vibrations mécaniques.
- ✓ vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- ✓ fonctionnement dans un environnement sévère.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Défaillances au stator

Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs **défauts d'isolant** dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. **La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases**

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurie

Défaillances au stator

Court-circuit phase/bâti

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. **Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.**

Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Défaillances mécaniques

Défauts roulements

Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- ✓ l'usure due au vieillissement
- ✓ la température de fonctionnement élevée
- ✓ la perte de lubrification
- ✓ l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- ✓ le défaut de montage
- ✓ les courants d'arbres (Shaft Current)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- ✓ des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- ✓ l'ondulation de leur surface de roulement
- ✓ l'attaque des billes
- ✓ la corrosion due à l'eau
- ✓ défaut de graissage, problème dû à la température
- ✓ décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Autres Défaillances mécaniques

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

Présentation des différentes défaillances sur un convertisseur de puissance

Défaillance du condensateur

Cas des condensateurs électrolytiques (voir document word)

Cas des condensateurs à films métallisés (voir document word)

Défaillance de diodes classiques (voir document word)

Défaillance d'un exemple d'interrupteur statique : l'IGBT

Court-circuit

Circuit ouvert

Vieillessement

Défaillance du circuit commande (Vieillessement de l'optocoupleur)

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurueil

Défaillances d'autres origines

Défauts de la charge

Pour maîtriser l'étude des défauts de la charge, une connaissance parfaite de cet élément s'avère nécessaire. Pour ce faire, on peut procéder tout d'abord à une classification des différents types de charge les plus rencontrés .

- ✓ charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (ex : traction, convoyeur, tapis roulant,...),
 - ✓ charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur,...),
 - ✓ charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineurs,...,
- La nature de l'application de la charge, quelle que soit son type, peut influencer d'une manière destructive le fonctionnement du variateur en amont.

En l'occurrence, une mauvaise utilisation de l'ensemble moteur – charge peut engendrer des défaillances mécaniques du système.

Citons quelques exemples de fonctionnements perturbateurs :

- ✓ application successive et répétitive de surcharges qui peut causer une fatigue mécanique des roulements et de l'arbre du moteur,
- ✓ des à-coups de couple et de charge qui se manifestent par des couples pulsatoires,
- ✓ des démarrages en force répétitifs.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurie

Défaillances d'autres origines

Défauts de la charge

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que :

- ✓ déséquilibre de charge et oscillations du couple de charge,
- ✓ surcouples accidentels,
- ✓ à-coups de couple accidentels,
- ✓ perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur,
- ✓ phénomène de balourd,
- ✓ désalignement des différents arbres en jeu pour assurer l'accouplement et la rotation,
- ✓ manque de lubrifiants,
- ✓ vitesse critique de rotation,
- ✓ rupture de la charge.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. En outre, et selon la stratégie de commande adoptée pour le pilotage de l'entraînement, les grandeurs électriques vont être aussi plus ou moins affectées.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écurueil Défaillances d'autres origines

Défauts capteurs

le degré de pertinence de l'information en provenance des capteurs, doit être déterminé afin d'éliminer toutes les informations et les mesures aberrantes.

Une information erronée peut être le résultat d'une panne ou d'un défaut au niveau du système de mesure lui-même. La redondance matérielle peut être considérée dans ce cas comme importante pour le diagnostic. En revanche, elle est onéreuse en termes d'équipement et de maintenance.

Afin d'assurer une bonne qualité de mesure et éviter des sources possibles d'erreurs, quelques règles doivent être respectées :

- ✓ s'assurer de la fiabilité et de la précision des instruments de mesure (étalonnage, tests, etc...)
- ✓ bien choisir le régime de fonctionnement pendant lequel sont effectuées les mesures (régime transitoire, permanent),
- ✓ rendre compte des conditions environnementales du fonctionnement du processus,
- ✓ bien définir les marges d'incertitudes tolérées (perturbations, erreurs, etc.).

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des défaillances

Synthèse des défaillances sur la charge

Composants	Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable
Charge	Déséquilibre de charge Oscillations du couple de charge Surcouples accidentels Phénomène de balourd Rupture de charge Vitesse critique de rotation Désalignement des différents arbres Perturbations mécaniques	Applications successives et répétitives de surcharges A-coups de couple et de charge Démarrages en force répétitifs	Elévation de la température ⇒ dégradation des isolants ⇒ risque de court-circuit Fatigue mécanique des roulements	Température Vibrations Couple Courants Vitesse

⇒ : entraîne

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des défaillances

Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone

Composants		Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable
Machine asynchrone à cage d'écurueil	Rotor	Ruptures de barres	Surcharge	Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique Oscillations de la vitesse Vibrations mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations - Couple électromagnétique - Courant
		Ruptures d'anneaux	Bulles coulées Dilatations différentielles Surcharge du couple Détérioration des conditions de fonctionnement	Déséquilibre la répartition des courants ⇒ modulation d'amplitude des courants statoriques	<ul style="list-style-type: none"> - Courant - Vibrations
		Excentricité	Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage Usure des roulements Défaut de charge Défaut de fabrication	Balourd (mécanique et magnétique) ⇒ oscillations de couple	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations - Courants - Couple
	Axe	Roulements	Usure Température élevée Perte de lubrification Défaut de montage Huile contaminée	oscillations du couple de charge ↗ pertes ↗ vibrations Altération de l'équilibre magnétique	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations - Courants - Puissance instantanée - Variables mécaniques

↗ : augmentation

↘ : diminution

⇒ : entraîne

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des défaillances

Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone

Composants		Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable
Machine asynchrone à cage d'écurueil	Stator	Isolant dans un enroulement	Dégradations de l'isolant à la fabrication Tension élevée Courant élevé Vibrations mécaniques Température élevée Vieillessement naturel	Court-circuit dans l'enroulement	<ul style="list-style-type: none"> - Température - Vibrations - Courants
		Court-circuit entre spires	Défaut d'isolants	↗ courants statoriques, variation d'amplitude sur les autres phases, modification de facteur de puissance, ↗ courants rotoriques	<ul style="list-style-type: none"> - Température - Vibration - Courant - Puissance instantanée
		Court-circuit entre phases	Décharge partielle	Dépend fortement de la localisation <u>Proche de l'alimentation :</u> Fusion des conducteurs Disjonction par les protections <u>Proche du neutre :</u> ↗ courants des les barres et les anneaux déséquilibre des courants statoriques	<ul style="list-style-type: none"> - courants (déséquilibre) - température - tension - puissance instantanée
		Court-circuit phase/bâti	Dégradation des isolants	↗ courant dans la phase ⇒ ↗ de la température ⇒ défauts d'isolants apparition d'une composante homopolaire ⇒ couple pulsatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Courant de fuite
		Circuit magnétique		Dissymétrie du fonctionnement de la machine ⇒ surchauffe, surtension élévation du courant	<ul style="list-style-type: none"> - Température - Courants - Tensions
		Déséquilibre d'alimentation	Problème sur le réseau d'alimentation Défaillance du convertisseur	↗ des courants dans les autres phases ↗ vibrations ↗ de l'échauffement	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations - Courants - Tensions - Puissance

↗ : augmentation

↘ : diminution

⇒ : entraîne

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des défaillances

Synthèse des défaillances sur les convertisseurs de puissance

Composants		Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable	
Convertisseur de puissance	condensateur	Electrolytique	Capacité dégradée	Élévation de température Vieillessement (usure)	\nearrow ESR et \searrow C \nearrow ΔV aux bornes condensateurs \Rightarrow altération service du filtre d'entrée ou de sortie	Tension (ondulation ΔV)
		A films métallisés	Capacité dégradée	usure mauvais dimensionnement composante HF du courant non homogénéité des condensateurs	mauvaise répartition du courant dans la métallisation du film \Rightarrow \nearrow température et \nearrow ΔV	Tension (ondulation ΔV)
	Diodes classiques	Vieillessement	Température Défaut de puce Cyclage	\nearrow impédance thermique et \searrow capacité de dissipation thermique Perte de puissance pendant l'étape de roue libre \Rightarrow \searrow couple	Impédance thermique Z_{th}	
	IGBT	Court-circuit	défaut de commande Usure (cyclage) Défaut de puce	Court circuit sur un bras \Rightarrow altération importante des courants de phases et du couple	Courant Couple	
		Circuit ouvert	Défaillance des oxydes de grilles	Courant quasiment nul dans la phase affectée \Rightarrow oscillation du couple	Courant Couple	
		vieillessement	Usure du composant	Diminution de la tension de sortie du bras (élévation de la tension drain-source)	Tension	
	Circuit de commande · optocoupleur	Défaillance LED	Vieillessement Température	\searrow du niveau d'émission (énergie et spectre) \Rightarrow sortie toujours inactive	Rapport entre le courant de sortie I_s et celui d'entrée I_e (CTR)	

\nearrow : augmentation

\searrow : diminution

\Rightarrow : entraîne

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Extraction de signatures représentatives des défaillances

Introduction

La recherche de signatures ou indicateurs de défauts a pour but de caractériser le fonctionnement du système en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts. Ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalies survenant aux différents niveaux du processus.

L'apparition d'un défaut au niveau de l'entraînement modifie le fonctionnement de ce dernier, ce qui affecte ses performances. Etant donné la diversité de ces défauts et la complexité des relations de cause à effet, de nombreuses méthodes permettant de réaliser une démarche de diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées.

Ainsi lorsque les observations issues du système sont de type numérique, et que l'on dispose d'un modèle mathématique du système, **l'approche par modèle mathématique (méthode interne)** est privilégiée pour le diagnostic de systèmes dynamiques. En revanche lorsqu'on ne peut construire un modèle analytique du système ou si sa complexité le rend inexploitable, une alternative est **l'approche sans modèle (aucune connaissance a priori)**.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Extraction de signatures représentatives des défaillances

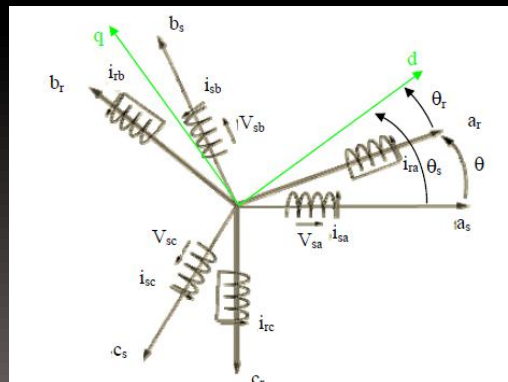
Extraction à partir de méthodes internes (connaissance a priori)

Elles s'appuient sur le **suivi d'évolution des paramètres** caractéristiques du système étudié ou sur la **différence entre le modèle et le processus** (méthode des résidus).

Diagnostic basé sur une modélisation de la machine asynchrone en fonctionnement sain

On modélise la machine asynchrone à cage dans le repère a, b, c en émettant les hypothèses simplificatrices suivantes:

- ✓ Les pertes fer sont négligées,
- ✓ La saturation du circuit magnétique est négligée,
- ✓ L'effet d'extrémité des têtes de bobines est négligé,
- ✓ Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé),
- ✓ Les harmoniques de toute origine, autre que temporel, sont négligés.



Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les équations électriques au stator et au rotor sont alors données par :

En fonctionnement sain

Rsa = Rsb = Rsc et
Rra = Rrb = Rrc

La modélisation des enroulements stator (respectivement rotor) par des paramètres distincts permet de discriminer un comportement défectueux d'un comportement dû à un fonctionnement normal.

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt}$$

$$[V_r] = 0 = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt}$$

$$\text{Avec : } [I_{s,r}] = \begin{bmatrix} i_{s,ra} \\ i_{s,rb} \\ i_{s,rc} \end{bmatrix}, [V_{s,r}] = \begin{bmatrix} V_{s,ra} \\ V_{s,rb} \\ V_{s,rc} \end{bmatrix}, [\Phi_{s,r}] = \begin{bmatrix} \varphi_{s,ra} \\ \varphi_{s,rb} \\ \varphi_{s,rc} \end{bmatrix} \text{ et } [R_{s,r}] = \begin{bmatrix} R_{s,ra} \\ R_{s,rb} \\ R_{s,rc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{[I]} = [L]^{-1} ([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2J} ([I]^t [G][I]) - \frac{C_r}{J} - \frac{f_t}{J} \omega \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

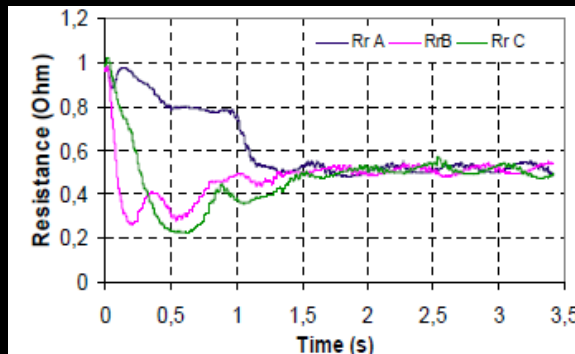
$$\text{avec } [V]^t = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs} \quad 0 \quad 0 \quad 0], [I]^t = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{s_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{s_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{r_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r_c} \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L_{s_a} + L_{fsa} & M'_{s_{ab}} & M'_{s_{ac}} & M_{s_{ra}} & M'_{s_{rb}} & M'_{s_{rc}} \\ M'_{s_{ba}} & L_{s_b} + L_{fsb} & M'_{s_{bc}} & M'_{s_{ra}} & M_{s_{rb}} & M'_{s_{rc}} \\ M'_{s_{ca}} & M'_{s_{cb}} & L_{s_c} + L_{fsc} & M'_{s_{ra}} & M'_{s_{rb}} & M'_{s_{rc}} \\ M_{r_{as}} & M'_{r_{ab}} & M'_{r_{ac}} & L_{r_a} + L_{fja} & M'_{r_{ab}} & M'_{r_{cb}} \\ M'_{r_{ba}} & M_{r_{bb}} & M'_{r_{bc}} & M'_{r_{ba}} & L_{r_b} + L_{fjb} & M'_{r_{cb}} \\ M'_{r_{ca}} & M'_{r_{cb}} & M_{r_{cc}} & M'_{r_{ba}} & M'_{r_{cb}} & L_{r_c} + L_{fjc} \end{bmatrix}$$

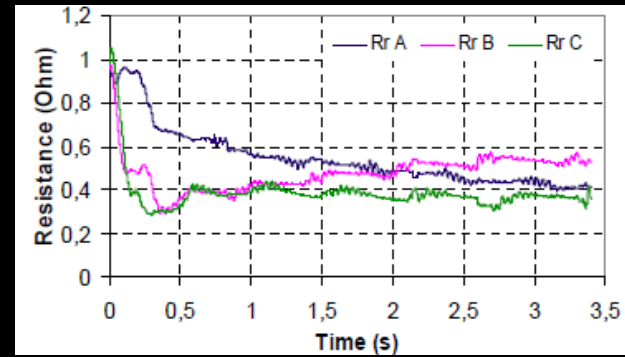
$$\text{et } [G] = \frac{d[L]}{d\theta}$$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Sur ce principe, [Boumégoura, 99] a réalisé un système de diagnostic des défauts rotoriques. Les résistances rotoriques des trois phases sont identifiées en ligne par un filtre de Kalman étendu. Cette approche permet de différencier l'effet des défauts rotoriques par rapport aux autres phénomènes qui provoquent la variation simultanée et équilibrée des résistances (température, etc.).



a. Rotor sain



b. Rotor défectueux (4 barres cassées)

Résistances rotoriques observées : machine saine (a), machine avec 4 barres cassées (b) [Boumégoura, 99].

l'auteur considère que la variation des valeurs de résistances permet de diagnostiquer un défaut au rotor d'une part et d'évaluer la gravité de la détérioration rotorique d'autre part.

le modèle triphasé est utilisé pour localiser l'origine du défaut entre les trois phases statoriques. Ainsi, à l'aide d'un algorithme d'estimation des paramètres, il obtient les estimations des paramètres suivants : $\theta' = [Rsa \ Rsb \ Rsc \ Lfsa \ Lfsb \ Lfsc \ Rr \ Lpr]$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

En terme de localisation, l'auteur tire les enseignements suivants :

Défaut sur la phase a

- R_{sa} et L_{fsa}
- (R_{sb}, R_{sc})
- (L_{fsb}, L_{fsc})

Défaut sur la phase b

- R_{sb} et L_{fsb}
- (R_{sa}, R_{sc})
- (L_{fsa}, L_{fsc})

Défaut sur la phase c

- R_{sc} et L_{fsc}
- (R_{sb}, R_{sa})
- (L_{fsb}, L_{fsa})

Dans le cas d'un **défaut au stator** (réduction de spires ou court-circuit), tous les paramètres issus du modèle triphasé changent mais seulement deux sont rigoureusement corrélés avec l'origine du défaut. Par exemple, pour une réduction du nombre de spires sur la phase b : il y a une diminution de **Rsb** et **Lfsb** alors que les couples (**Rsa, Rsc**) et (**Lfsa, Lfsc**) augmentent.

Modèle diphasé

Ce modèle utilise une transformation permettant de projeter les équations électriques et magnétiques du repère **triphasé** dans un repère orthonormé **dq0**. Les variables projetées sur l'axe homopolaire **o** sont en générale nulles. Le système équivalent résultant est donc diphasé '**d-q**'.

Mathématiquement, la transformation des courants, des tensions et des flux, est décrite par la relation matricielle suivante :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{s,r} \\ V_{s,r} \\ \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{dq0} &= [T_{dq0/abc}] \cdot \begin{bmatrix} i_{s,r} \\ V_{s,r} \\ \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{abc} \\ \begin{bmatrix} V_{s,r} \\ \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{dq0} &= [T_{dq0/abc}] \cdot \begin{bmatrix} V_{s,r} \\ \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{abc} \\ \begin{bmatrix} \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{dq0} &= [T_{dq0/abc}] \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{s,r} \end{bmatrix}_{abc} \end{aligned}$$

$$T_{dq0/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Modèle diphasé

θ_s est l'angle électrique entre le stator et l'axe d Si θ_s est nul alors on obtient la matrice $[C]$, appelée matrice de Concordia telle que :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Dans ce cas, les axes d et q sont appelés α et β .

La matrice de rotation $[R(\theta_s)]$ permet le passage du vecteur courant statorique projeté dans un repère lié au stator $[I_{s\alpha} \ I_{s\beta}]^T$ vers le vecteur projeté dans le repère 'd-q' $[i_{sd} \ i_{sq}]^T$

$$i_{s,dq} = [R(\theta_s)] I_{s,\alpha\beta}$$

avec $[R(\theta_s)] = \begin{pmatrix} \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ -\cos \theta_s & \sin \theta_s \end{pmatrix}$

La transformation des courants rotoriques est décrite par la relation matricielle suivante :

$$i_{r,dq} = [R(\theta_s - \theta_r)] I_{r,\alpha\beta}$$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Modèle diphasé

L'évolution des **flux**, des **courants** et des **tensions** est décrite par le système d'équations non linéaires exprimées dans le repère tournant 'd-q' :

$$\begin{aligned} \text{au stator : } & \begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \\ \text{au rotor : } & \begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \end{aligned}$$

Les flux s'expriment en fonction des courants de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

Le coefficient de fuite total et les constantes de temps statorique et rotorique sont définis respectivement par :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Pour tous les modèles de la machine décrits ci-dessus, l'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation suivante: avec **p** est le nombre de paire de pôles de la machine

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd})$$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les paramètres estimés issus du circuit équivalent de la machine asynchrone sont les suivants :

$$\theta = [R_s \ R_r \ L_{fs} \ L_r]$$

avec L_{fs} : inductance de fuite au stator

Ses résultats montrent que :

Lors de rupture de barres au rotor, la résistance rotorique augmente et les autres paramètres, c'est à dire la résistance statorique et les inductances de fuite statorique et rotorique, diminuent.

Lors d'un court circuit entre spires du bobinage statorique, la résistance statorique augmente et les autres paramètres diminuent.

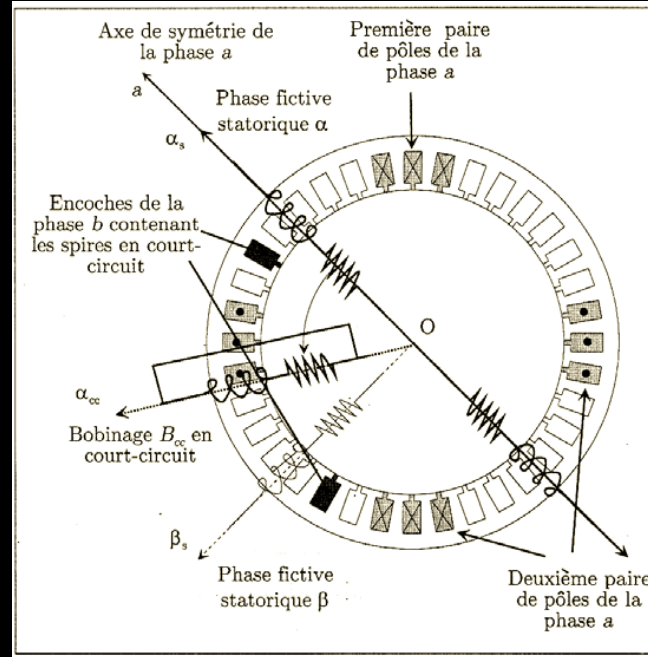


Evolution des paramètres en présence de défauts [Moreau, 99]

Ainsi, pour déterminer la présence d'un défaut, il est nécessaire de suivre un ensemble de paramètres constitués d'une variable résistive et l'autre inductive

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Diagnostic de la machine basé sur un modèle prenant en compte les défauts



Représentation schématique des encoches stator [Schaeffer, 99]. Localisation des spires en court – circuit. La bobine fictive B_{cc} est représentée dans le repère α, β

Ainsi au modèle usuel de Park vient s'ajouter le paramètre α (à ne pas confondre avec l'axe α issu de la transformation biphasée) qui est le rapport entre le nombre n_{cc} de spires en court-circuit et le nombre total n_s de spires en série par phase du stator. $\alpha = n_{cc} / n_s$

A la bobine B_{cc} s'associent les grandeurs vectorielles (courant et flux) $i_{cc}(t)$ et $\phi_{cc}(t)$. L'angle γ est l'angle entre l'axe de B_{cc} et l'axe de référence du bobinage statorique.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Diagnostic de la machine basé sur un modèle prenant en compte les défauts

$$\phi_{cc}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} Q(p\gamma) \left(\alpha l_{ms} \cdot \mathbf{i}_s(t) + \alpha L_m \mathbf{P}(p\theta) \cdot \mathbf{i}_r(t) + \left(l_{ms} + \frac{3}{2} l_{fs} \right) \cdot \alpha^2 \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{i}_{cc}(t) \right)$$

L'expression de $\phi_{cc}(t)$ est obtenue en considérant le schéma équivalent monophasé par phase de la machine asynchrone, et en introduisant la notion de flux magnétisant Φ_{ms} et le flux de fuite Φ_{fs} .

$$\text{où } Q(p\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(p\gamma) \cos(p\gamma) & \cos(p\gamma) \sin(p\gamma) \\ \cos(p\gamma) \sin(p\gamma) & \sin(p\gamma) \sin(p\gamma) \end{bmatrix}$$

l_{ms} et l_{fs} sont respectivement les inductances magnétisante et de fuite que l'on aurait en l'absence de défaut, θ est l'angle mécanique entre le stator et le rotor et \mathbf{P} la matrice de rotation, notée ici $[\mathbf{R}(\theta_s)]$

Le système d'équation suivant résume le comportement électrique de la machine

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s(t) = R_s \mathbf{i}_s(t) + \frac{d}{dt} (\phi_{ms}(t) + \phi_{fs}(t)) \\ 0 = -\frac{3}{2} \frac{R_s}{\alpha} \cdot \mathbf{i}'_{cc}(t) + Q(p\gamma) \frac{d}{dt} \phi_{ms}(t) \\ 0 = -R_r \mathbf{i}'_r(t) + \frac{d}{dt} \phi_{ms}(t) - p\dot{\theta} \cdot \mathbf{P}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{ms}(t) \end{cases}$$

$\mathbf{i}'_{cc}(t)$ et $\mathbf{i}'_r(t)$ sont les courants de \mathbf{Bcc} et du rotor ramenés au primaire (en considérant le schéma équivalent monophasé par phase de la machine).

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Diagnostic de la machine basé sur un modèle prenant en compte les défauts

Pour la représentation d'état les paramètres estimés **a**, **b**, **c** et **d** sont :

$$a = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}, \quad b = \frac{L_s(1-\sigma)}{T_r}, \quad c = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad d = \frac{1}{T_r} \text{ et } \alpha.$$

Ce qui donne donc le vecteur des cinq paramètres, noté $\lambda_0 = [a, b, c, d, \alpha]$. L'influence du défaut sur le comportement entrée/sortie de la machine vient du fait que, dans la représentation d'état, le vecteur de sortie est fonction de l'entrée de commande par l'intermédiaire de α .

Avec **Y** le vecteur des courants biphasés mesurés et **U** le vecteur des tensions biphasées d'alimentation (obtenus par la transformation de Concordia), la représentation d'état est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(\omega, \lambda_0) \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B}(\lambda_0) \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}(\lambda_0) \cdot \mathbf{X} + \frac{3}{2} \frac{\alpha}{R_s} \cdot \mathbf{P}(p\theta) \mathbf{Q}(p\gamma) \mathbf{P}(-p\theta) \mathbf{U} \end{cases}$$

Ainsi, ce paramètre évolue de manière plus importante que **Rs**, **Ls**, **Tr** et σ . Surtout lorsqu'il s'agit d'un faible nombre de spires en court-circuit.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les courants de Park i_d et i_q peuvent s'écrire en fonction des courants de phases comme suit:

$$i_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - i_b - i_c)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_b - i_c)$$

Sous conditions idéales

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin(\omega t)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin(\omega t - \pi/2)$$

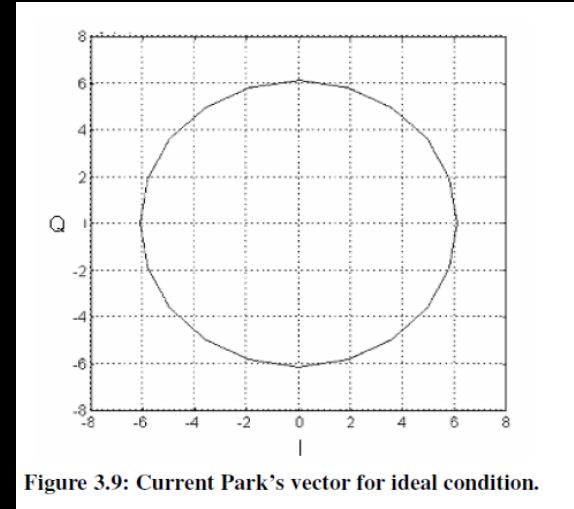


Figure 3.9: Current Park's vector for ideal condition.

Sa représentation est un cercle de centre l'origine des coordonnées.

Cette configuration nous permet de surveiller la déviation des conditions normales de fonctionnement

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats obtenus à partir de **l'état de l'art du diagnostic interne de la machine asynchrone**.

Type de défaut	Evolution des paramètres	Observations
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	DETECTION R_s diminue R_r augmente L_r diminue L_s diminue	<i>Paramètres issus du modèle de Park</i>
Excentricité	R_r augmente	<i>Augmentation possible de R_r si défaut au rotor</i>
Court-circuit	DETECTION R_s augmente R_r diminue L_r diminue L_f diminue LOCALISATION R_{sa} et L_{fsa} augmentent <i>si défaut sur la phase a</i>	R_{sa} et L_{fsa} issus du modèle triphasé

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Extraction à partir de méthodes externes (sans connaissance a priori)

Ces méthodes dites 'sans modèles' se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Elles ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, elle reste intacte.

Analyse des signaux vibratoires

Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

Voir page suivante:

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- ✓ problème d'accessibilité,
- ✓ difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

Analyse des flux

Tout déséquilibre quel qu'il soit, magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et hors de la machine

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Analyses vibratoires, signatures fréquentielles

Types de défaut	Signatures (analyse vibratoire)	Commentaires
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	$f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ (g : glissement)	Les vibrations axiales augmentent avec le nombre de barres cassées
Excentricité Statique Dynamique	Excentricité statique : $2 \cdot f_s$ ou des composantes à $N_r \cdot f_r \pm f_s$ Excentricité dynamique : $f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ ou f_r	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
Désalignement	f_r et $2 \cdot f_r$ principalement	Vibrations plus importantes dans la direction axiale
Déséquilibre mécanique	f_r	Au niveau de la charge notamment Vibrations plus importantes dans la direction radiale
Défaillance des paliers	$n \cdot f_e$ et $n \cdot f_i$ $f_i \pm n \cdot f_r$ avec n un nombre entier :1,2,...	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Analyse des flux

Des composantes fréquentielles (fréquences caractéristiques) du flux de fuite dans l'axe du rotor, qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques.

$$k \cdot f_s \pm n \cdot f_r$$

Avec n et k des nombres entiers et k impair

Les amplitudes de ces composantes vont augmenter avec l'apparition d'un défaut.

Certaines composantes du flux axial permettent de détecter d'éventuels défauts liés aux barres rotoriques et aux roulements

f_s	$(5 - 4g)f_s$
$(2g - 1)f_s$	$(6g - 5)f_s$
$(3 - 2g)f_s$	$(4g - 3)f_s$
$(7 - 6g)f_s$	$(8g - 7)f_s$

Analyse du couple électromagnétique







Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le Courant.

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.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Analyse du couple électromagnétique

Dans le tableau suivant sont présentés les résultats obtenus concernant les variations des harmoniques du couple en présence de défaut pour une alimentation 50 Hz.

50 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	700 Hz	800 Hz
					

A partir d'un modèle de la machine dans un repère 'd-q' lié au stator on peut estimer le couple électromagnétique C_{em} . On peut constater qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentées dans le spectre du couple estimé C_{em} :

$$f_{sb} = f_s \cdot \left[\frac{N_r \cdot (1 - g)}{p} \pm n \right] \pm 2 \cdot g \cdot f_s$$

Avec :

f_{sb} : fréquence d'encoche au rotor

N_r : nombre d'encoches au rotor

f_s : fréquence d'alimentation (fréquence des courants statoriques)

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$

g : le glissement

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Analyse du couple électromagnétique

On peut utiliser le modèle triphasé pour estimer le flux statorique, ce qui permet d'estimer le couple utile C_u . Or, en présence d'excentricité, le spectre du couple C_u présente des informations aux fréquences :

$$f_{Cu} = n \cdot \left(1 - \frac{1+g}{p} \right) \cdot f_s$$

Remarque:

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la **mise en place d'un grand nombre de capteurs** (flux, couplemètre, accéléromètres, transducteurs, ...) souvent onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Détection des défauts par analyse des courants statoriques

Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courants. La plus utilisée est de réaliser une analyse fréquentielle (FFT par exemple) directement sur les courants statoriques i_{sa} , i_{sb} ou i_{sc} . Cette méthode, connue sous le nom de **MCSA**

Préconditionnement des courants statoriques pour l'analyse fréquentielle

tout système de trois grandeurs de même nature et de même fréquence est la superposition de trois systèmes équilibrés de même fréquence : un système triphasé direct, un système triphasé inverse et un système homopolaire.

Les équations donnant les composantes symétriques des tensions et des courants (transformation de Fortescue) sont les suivantes :

$$\begin{cases} \underline{X}_d = \frac{1}{3} \cdot (X_{sa} + \underline{a} \cdot X_{sb} + \underline{a}^2 \cdot X_{sc}) \\ \underline{X}_i = \frac{1}{3} \cdot (X_{sa} + \underline{a}^2 \cdot X_{sb} + \underline{a} \cdot X_{sc}) \\ \underline{X}_0 = \frac{1}{3} \cdot (X_{sa} + X_{sb} + X_{sc}) \end{cases}$$

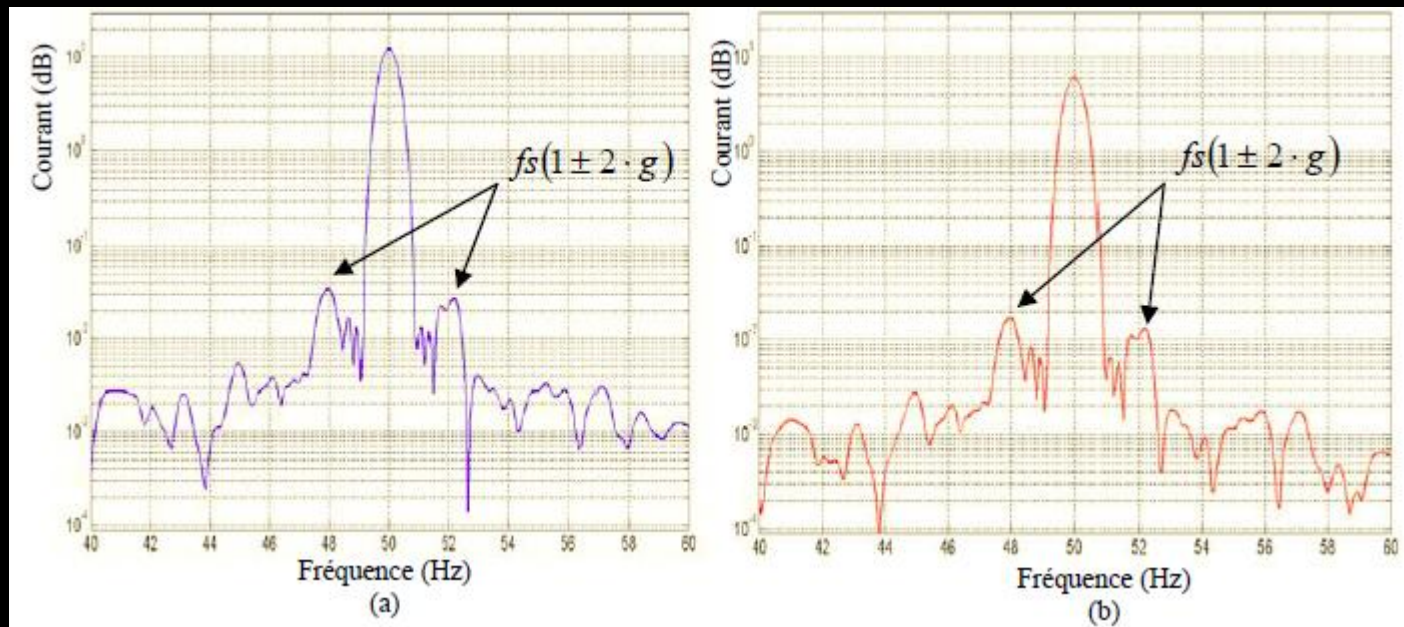
$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

Avec l'opérateur a représente une rotation de $2\pi/3$

l'analyse spectrale est réalisée sur la partie réelle de la composante directe

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La figure suivante représente l'analyse fréquentielle réalisée sur le courant de la phase a (i_{sa}) et celle réalisée sur la partie réelle de I_{sd}



Analyse fréquentielle pour une machine avec 1 barre cassée en charge. FFT sur $Re[I_{sd}]$ (a). FFT sur le courant de phase i_{sa} (b)

l'apparition des raies caractéristiques d'un défaut 'barres cassées' aux fréquences $fs(1 \pm 2 \cdot g)$.

L'intérêt de réaliser, par la suite, une FFT sur $Re[I_{sd}]$ pour détecter l'apparition de raies caractéristiques, se situe donc au niveau **du temps de calcul**.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Signatures fréquentielles extraites à partir des signaux préconditionnés

Ruptures de barres ou de portions d'anneaux

lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

$$f = f_s (1 \pm 2 \cdot g)$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défectueuses.

Excentricité

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants.

L'identification du type d'excentricité est possible, par la visualisation dans ce spectre, des composantes fréquentielles suivantes :

Pour l'excentricité statique :

$$f_{\text{exc}} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot N_T (1 - g)}{p} \right]$$

Pour l'excentricité dynamique :

$$f_{\text{exc}} = f_s \cdot [1 \pm 2 \cdot n(1 - g)]$$

Pour le désalignement :

$$f_{\text{exc}} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot (1 - g)}{p} \right]$$

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Signatures fréquentielles extraites à partir des signaux préconditionnés

Défauts roulements

En partant du principe que l'entrefer n'est plus constant lors d'une défaillance des roulements, cette information est aussi présente dans le spectre du courant.

Les composantes fréquentielles spécifiques aux vibrations des paliers notées f_{pal} sont définies

$$f_{pal} = f_s \pm n \cdot f_{i,e}$$

$n = 1, 2, 3 \dots$ "i, e" : interne, externe (bagues)

Les fréquences des bagues internes et externes de roulement sont définies respectivement par les expressions suivantes en fonction du nombre de billes noté n_b

$$f_e = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 - \frac{DB}{DP} \cdot \cos \beta \right]$$
$$f_i = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 + \frac{DB}{DP} \cdot \cos \beta \right]$$

Où f_r est la fréquence de rotation du rotor et β l'angle de contact.

Défauts au niveau du stator

mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, le déséquilibre ou l'ouverture d'une des phases d'alimentation.

l'harmonique de rang 3 et celui lié au passage des encoches rotoriques sont significativement augmentés lors d'une rupture de l'isolant des spires statoriques.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Signatures basées sur l'échauffement de la machine

La machine est le siège de pertes (mécaniques, électriques et magnétiques, ...) mais aussi de pertes supplémentaires dues à certaines défaillances. Ces pertes provoquent un échauffement des matériaux et en particulier des isolants.

A partir de la **modélisation thermique** de la machine asynchrone par un modèle approché à un corps, l'échauffement de celle-ci peut se déduire de la formulation suivante :

P_{tot} Puissance dissipée par la machine (pertes totales)

R_t Résistance thermique

C_t Capacité thermique

$R_t \cdot P_{tot} = \Delta \vartheta_m$ Avec $\Delta \vartheta_m$ échauffement maximal permanent qui ne devra jamais dépasser le θ_l limite des isolants

$\tau_{th} = R_t \cdot C_t$ Constante de temps thermique

Si l'on tient compte de la variation de la résistance en fonction de la température,

$$\Delta \theta(t) = R_t \cdot P_{tot} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_t \cdot C_t}}) = \Delta \theta_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}}\right)$$

$$\Delta \theta(t) = \Delta \theta'_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}'}})$$

$\Delta \theta'_m = R_t' \cdot P_{tot} = \frac{\Delta \theta_m}{1 - \alpha \cdot \Delta \theta_m}$: valeur finale de l'échauffement,

$R_t' = \frac{R_t}{1 - \alpha \cdot \Delta \theta_m}$: valeur de la résistance en fonction de la température, avec α le coefficient de température de la résistance

$\tau_{th}' = C_t \cdot R_t' = \frac{\tau_{th}}{1 - \alpha \cdot \Delta \theta_m}$: constante de temps thermique

Ainsi pour connaître l'échauffement présent au niveau de la machine, la puissance dissipée par celle-ci, c'est-à-dire ses pertes, doit être calculée.

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Signatures basées sur l'échauffement de la machine

la formulation suivante est utilisée, prenant en compte la variation de résistance d'induit :

$$\Delta\theta(t) = R_t' \cdot P_{tot} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_t \cdot C_t}})$$

Deux signatures sont donc extraites à partir du signal température qui sont, les pertes totales P_{tot} présentes dans la machine, ainsi que l'échauffement $\Delta\theta$ que celles-ci engendrent.

Suite

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des signatures déterminées à partir des méthodes externes

Signatures déterminées à partir des signaux mesurés ou estimés

Type de défaut	Signatures fréquentielles		Signatures 'statistiques'								
	Courants mesurés ou préconditionnés	Couple, Flux, Vibrations									
Ruptures de barres ou de portions d'anneaux	$f = f_s \cdot (1 \pm 2g)$ $F_{exc} \pm 2n f_s \pm 2g f_s$	<p><u>Fréq. d'encoches sur C_{em} estimé :</u></p> $f_{sb} = f_s \cdot \left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm n \right] \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ <p><u>Flux axial :</u></p> <table border="1"> <tr> <td>f_s</td> <td>$(3-2g)f_s$</td> <td>$(2g-)f_s$</td> <td>$(4g-3)f_s$</td> <td>$(5-4g)f_s$</td> <td>$(6g-5)f_s$</td> <td>$(7-6g)f_s$</td> <td>$(8g-7)f_s$</td> </tr> </table> <p><u>Vibrations :</u></p> $f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$	f_s	$(3-2g)f_s$	$(2g-)f_s$	$(4g-3)f_s$	$(5-4g)f_s$	$(6g-5)f_s$	$(7-6g)f_s$	$(8g-7)f_s$	δ_α : Déformation de la caractéristique $I_{s\beta}(I_{s\alpha})$ dans l'axe α δ_β : Déformation de la caractéristique $I_{s\alpha}(I_{s\beta})$ dans l'axe β σ_s : Ecart - type du module de $I_s = I_{s\alpha} + I_{s\beta}$ ζ : Dispersion des points de la caractéristique Q(P)
f_s	$(3-2g)f_s$	$(2g-)f_s$	$(4g-3)f_s$	$(5-4g)f_s$	$(6g-5)f_s$	$(7-6g)f_s$	$(8g-7)f_s$				
Excentricité : - statique - dynamique - mixte	<p>Statique :</p> $f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot N_r(1-g)}{p} \right]$ <p>Dynamique :</p> $f_{exc} = (N_r \cdot f_s + f_s) \pm f_r$ <p>Mixte :</p> $f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm n \frac{1-g}{p} \right]$	<p><u>Vibrations :</u></p> <p>Excentricité statique :</p> $2 \cdot f_s$ ou des composantes à $k \cdot f_r \pm f_s$ <p>Excentricité dynamique :</p> $f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ ou f_r <p><u>Couple utile estimé par modèle triphasé C_u :</u></p> $f_{Cu} = n \cdot \left(1 - \frac{1+g}{p} \right) \cdot f_s$	$\cos \phi$: Facteur de puissance								

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des signatures déterminées à partir des méthodes externes

Signatures déterminées à partir des signaux mesurés ou estimés (suite)

Type de défaut	Signatures fréquentielles		Signatures 'statistiques'
	Courants mesurés ou préconditionnés	Couple, Flux, Vibrations	
Défauts roulements	$f_{pd} = f_s \pm n \cdot f_{i,e}$ avec : $f_e = 0.4 \cdot n_b \cdot f_r$ $f_i = 0.6 \cdot n_b \cdot f_r$	<p><u>Flux axial :</u> Raies situées entre 600-900 Hz pour $f_s = 50\text{Hz}$</p> <p><u>Vibrations :</u> Bagues externes : $n \cdot f_e$ bagues internes : $f_i \pm k \cdot f_r$</p>	Puissance instantanée m_p : puissance active moyenne m_q : puissance réactive moyenne
Désalignement	$f_s \pm k \cdot f_r$	<p><u>Vibrations :</u> f_r et $2 \cdot f_r$ principalement</p>	
Déséquilibre d'alimentation stator	Puissance moyenne de la composante directe P_{1d} : $P_{1d} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} S_d(f) df$ Impédance directe : $Z_d = \frac{V_d(f=f_s)}{I_d(f=f_s)}$		σ_s : Ecart – type du module de $I_s = I_{s\alpha} + I_{s\beta}$ ζ : Dispersion des points de la caractéristique $Q'(P')$ m_p : puissance active moyenne m_q : puissance réactive moyenne
Court-circuit entre spires au stator	Harmonique de rang 3 et harmonique lié au passage des encoches rotoriques Impédance directe : $Z_d = \frac{V_d(f=f_s)}{I_d(f=f_s)}$	<p><u>Flux axial :</u> $k \cdot f_s \pm n \cdot f_r$</p>	

DÉFAILLANCES DES MACHINES : CAS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Synthèse des signatures déterminées à partir des méthodes externes

