



## **Identifier les défauts du moteur à travers l'analyse de la zone de défaut par Noah P.Bethel, PdMA Corporation.**

Le personnel de maintenance électrique a été depuis des années, limité à faire du dépannage, avec pour seule aide, un voltmètre et un ohmmètre. Malheureusement, ceux-ci ne fournissent pas assez d'informations permettant à la plupart des électriciens d'être absolument certains de l'existence ou non, d'un problème électrique. Un mécanicien a dit un jour: «S'il y a un problème avec une machine et qu'il y a un câble électrique à moins de trois mètres, alors, cela doit-être un problème électrique!». Si vous effectuez des opérations de maintenance électrique, vous aurez probablement déjà entendu : «cela doit venir du moteur». Si vous êtes mécanicien, vous aurez sûrement entendu, «c'est probablement la pompe. Démontons-la.»

Ceci a été une bataille constante et jusqu'à récemment, la technologie a essentiellement été développée pour la partie mécanique. Une vibration montre un pic de deux fois la fréquence de la ligne ( $2F_L$ ) et cela signifie probablement que c'est électrique. Vrai?...Faux!!! Il y a aujourd'hui tellement de variables pouvant produire un défaut de ce type ( $2F_L$ ), que mettre un moteur hors service afin de procéder à une réparation d'ordre électrique pour ce seul défaut ( $2F_L$ ) est une erreur, probablement coûteuse. La meilleure chose que l'on puisse espérer dans ce cas, c'est que le service de réparation vous recontacte et vous demande «que voulez-vous que l'on fasse?» sur ce moteur en parfait état.

«La mesure de résistance de la terre ou un test à l'aide d'un mégohmmètre suffira». Je trouve cela difficile à croire. Combien de fois en tant qu'électricien avons-nous été nerveux de redémarrer un moteur qui avait disjoncté après avoir seulement vérifié avec un ohmmètre digne de confiance que le moteur n'est pas endommagé. La réalité est qu'il existe de nombreuses causes non décelables avec un ohmmètre et ayant pu faire que le moteur ait disjoncté comme un court circuit créé à chaque tour de moteur par exemple. La rupture de l'isolation entre chaque boucle d'un enroulement de la bobine peut se produire à l'intérieur d'une fente du stator ou bien dans le dernier enroulement et être complètement isolé de la terre. Des court-circuits entre phases peuvent se produire de la même manière. Si ces défauts ne sont pas corrigés, ils peuvent engendrer une détérioration rapide du bobinage ou enroulement et éventuellement à la destruction du moteur. La remise en marche d'un moteur qui a disjoncté ne doit se faire qu'après avoir éliminé toutes ces causes.

D'une manière générale, dépanner un moteur qui est susceptible d'avoir été électriquement endommagé, ne devrait pas aboutir à :«le moteur n'a rien.». Bien qu'une personne avec des années d'expérience et très réputée serait capable de s'en sortir en

toute impunité en disant cela, la majorité des électriciens ne trouveront pas la même réponse positive de la part de leur responsable, ingénieur ou responsable de production. Pour pouvoir décrire avec confiance l'état d'un moteur électrique et être certain que votre recommandation est prise au sérieux, il y a six zones d'intérêt appelées zones de défauts devant être étudiées lors d'un dépannage. Faillir à l'étude d'une seule de ces zones pourrait empêcher de détecter correctement ce défaut et par conséquent perdre toute crédibilité de nos capacités.



### **Les six zones de défauts électriques sont :**

- 1 La qualité de l'alimentation.
- 2 Le circuit d'alimentation.
- 3 L'isolation.
- 4 Le stator.
- 5 Le rotor.
- 6 L'excentricité.

**La qualité de l'alimentation:** a récemment bénéficié de la déréglementation des utilités et de la popularité des actionneurs AC et DC. Avec la déréglementation, la compétition entre les utilités a augmenté la crainte des pénalités à cause de hauts niveaux de distorsion des signaux électriques. Les variateurs de fréquence (ou VFD) et autres charges électriques non-linéaires peuvent considérablement augmenter les niveaux de distorsion des tensions et des courants. Comment cette distorsion peut-elle être minimisée? Quel appareillage est requis et est-ce que les équipements sont à risque?

Premièrement, précisons ce que l'on doit comprendre par problèmes de qualité de l'alimentation. La distorsion harmonique de tension et courant, les pics de tension, le déséquilibre de phases et le facteur puissance sont quelques uns des problèmes parmi tant d'autres quand on parle de qualité de l'alimentation. Bien que tout soit important, on se concentrera seulement sur certains, en commençant par la distorsion harmonique.

**La distorsion harmonique** apparaît toujours comme un concept compliqué. Cela devient plus simple si l'on se rapporte aux fondements basiques. La référence la plus commune à ce sujet est la Distorsion Harmonique Totale (ou THD for Total Harmonic Distorsion). La THD est le rapport de la racine carrée du contenu de l'harmonique sur la racine carrée de la valeur du fondamental, exprimée en pourcentage du fondamental. Plus simplement, il s'agit de la racine carrée du signal en retirant la valeur à la fréquence du fondamental. Un signal sinusoïdal parfait de 60Hz de fréquence aurait 0% de THD.

Donc, tout signal autre que le fondamental à 60Hz serait considéré comme une distorsion harmonique.

Les charges non linéaires communément utilisées comprennent ordinateurs, éclairage fluorescent et variateurs de fréquence (ou VFD pour Variable Frequency Drives) comme indiqué précédemment. La présence d'harmoniques dans un système de distribution entraîne un échauffement excessif dû à l'augmentation du courant. Une charge prévue pour 100 Ampères à pleine charge peut maintenant demander 120 Ampères si la distorsion harmonique est élevée. Cet excès de courant peut provoquer des défauts d'isolation et même mener à des défauts catastrophiques. Des harmoniques de séquence 0 excessives vont impacter le transformateur conduisant à des surcharges et défauts potentiels. Ces séquences retournent à la source par le neutre, et peuvent générer des échauffements ou même des incendies si elles sont vraiment excessives. Afin d'éviter tout problème de ce type, de nombreuses compagnies modifient leur système de distribution. Installer des transformateurs spécifiques destinés à supporter des charges plus importantes créées par les harmoniques, et augmenter la taille de leur neutre pour permettre à des courants plus importants de circuler sont des pratiques courantes. Même si ces efforts ne réduisent en rien les harmoniques, ils réduisent tout de même considérablement le risque de défauts. Pour supprimer ces harmoniques, il est nécessaire d'installer des systèmes de filtrage comme des filtres de séquence 0.

Quelques uns des nouveaux types de variateurs de fréquence qui utilisent IGBT peuvent générer des hausses de tensions importantes pendant moins d'une milliseconde. Les systèmes d'isolation de classe B plus anciens ont une faible tolérance pour ces brusques augmentations et peuvent être détériorés très rapidement. Des moteurs prévus pour des tâches avec changement du sens de rotation sont particulièrement recommandés pour l'utilisation avec ce type de variateur de fréquences. De même, une longueur de câble excessive entre le variateur de fréquence et le moteur peut conduire à des pics de tensions importants dans la boîte de connexion du moteur. Le fabricant du variateur de fréquence spécifie normalement la longueur correcte de câble à utiliser.

Les recommandations générales comme indiquées dans le tableau 3.3.1 de la norme IEEE 519-1992, recommandent une Distorsion Harmonique Totale (THD) de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69KV. De plus, elles recommandent une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%. Le graphique 1 montre un exemple de niveau de distorsion de tension incorrect. Ces niveaux élevés des harmoniques peuvent être vus sur la courbe de tension comme des variations du signal fondamental (graphique 2).

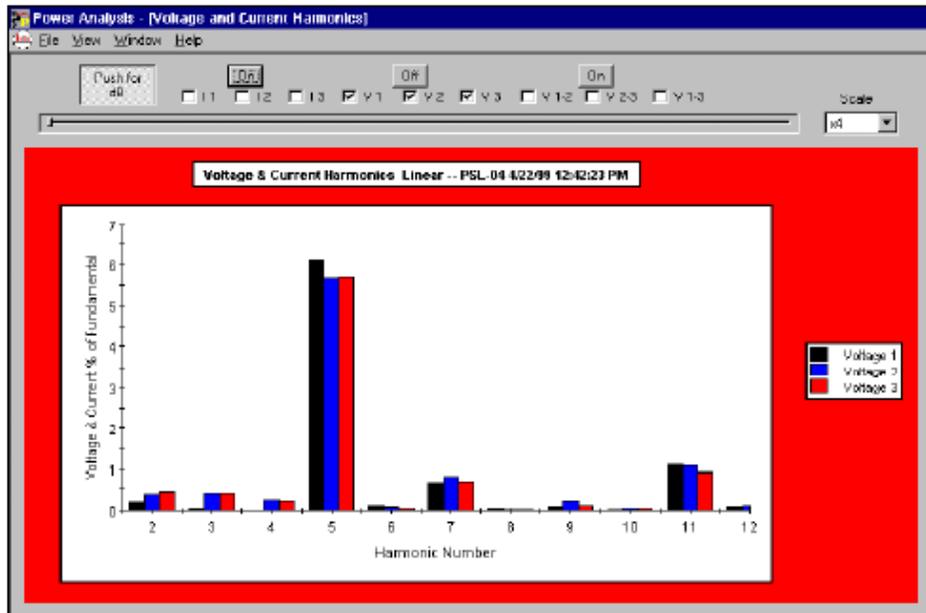


Figure 1

Les 5èmes et 7èmes harmoniques élevées indiquent l'effet du variateur sur le système de distribution. Chacune des harmoniques devrait être inférieure à 3% du fondamental d'après IEEE 519-1992.

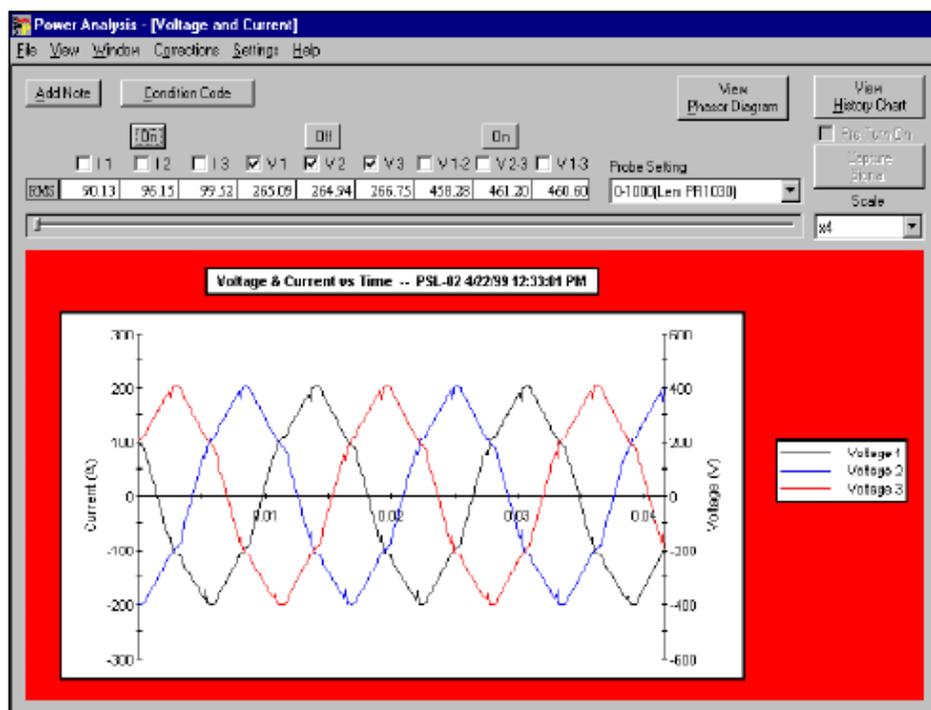
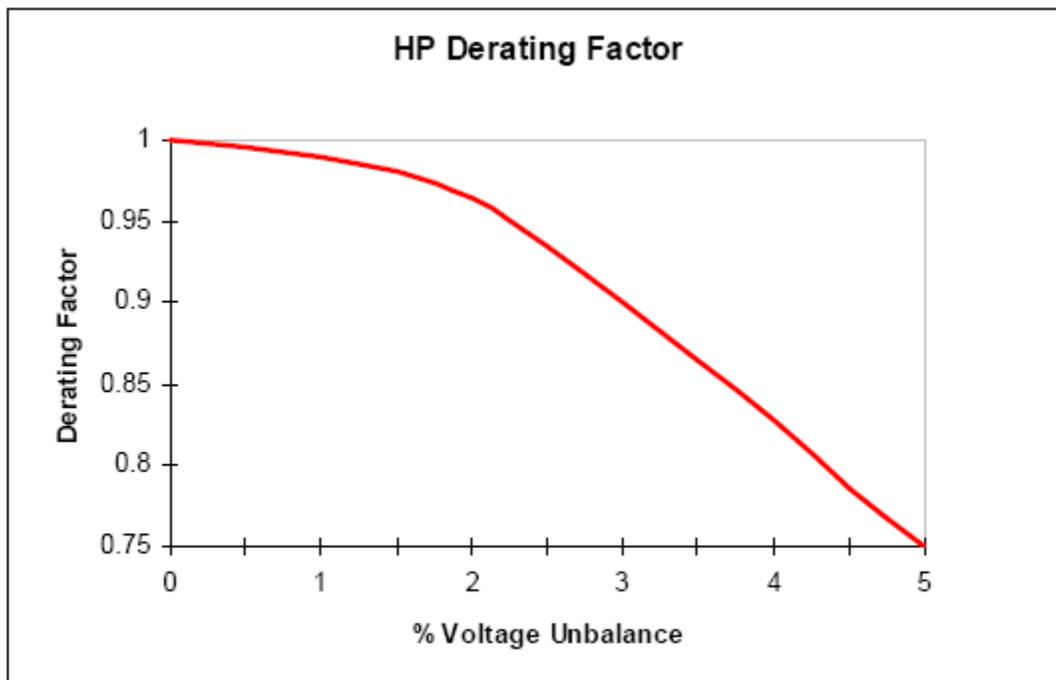


Figure 2

Ce graphe montre un signal fondamental de tension avec six battements se produisant pendant chaque sinusoïde. Cela provient d'un variateur à six battements non filtré connecté au système de distribution.

Le circuit d'alimentation : Qu'est-ce qu'un circuit d'alimentation? Le circuit d'alimentation décrit tous les conducteurs et connexions qui existent d'un point où on débute les mesures à travers toutes les connexions jusqu'au moteur. Ceci inclut les disjoncteurs, fusibles, contacteurs, surcharges, disconnecteurs et connecteurs. Un projet portant sur l'étude d'un système de distribution industrielle datant de 1994 a montré que les connecteurs et les conducteurs étaient la cause de 46% des défauts affectant le fonctionnement des moteurs. Un moteur en parfait état est très souvent installé dans un circuit défectueux. Cela crée des problèmes d'harmoniques, de déséquilibre de phases,....Quand ces problèmes s'intensifient, la puissance du moteur s'écroule causant un échauffement et un défaut de l'isolation du moteur. Ce moteur est remplacé très souvent et le cycle de pannes recommence. Le graphique 3 montre que des connexions à haute résistance créant un déséquilibre de phases vont considérablement réduire la puissance.



Reference: NEMA Standards MG 1-14.35

Figure 3

Une méthode permettant de détecter des mauvaises connexions (haute résistance) est de mesurer la résistance entre phases. Sur un moteur à trois phases, les trois valeurs de résistances mesurées devraient être presque identiques. Si les trois valeurs sont identiques, il y a un déséquilibre résistif de 0%. Si une ou plusieurs phases ont une mauvaise connexion, le déséquilibre résistif augmente, indiquant un défaut.

Quelques unes des causes mécaniques pouvant créer de mauvais contacts ou contacts résistifs sont :

- Connecteurs rouillés ou corrodés.
- Câbles desserrés.

- Jeux de barres de contact desserrées.
- Porte fusibles rouillés ou corrodés.
- Contacts rouillés ou corrodés.
- Contacts ouverts.
- Conducteurs électriques de section différente.
- Métaux incompatibles.

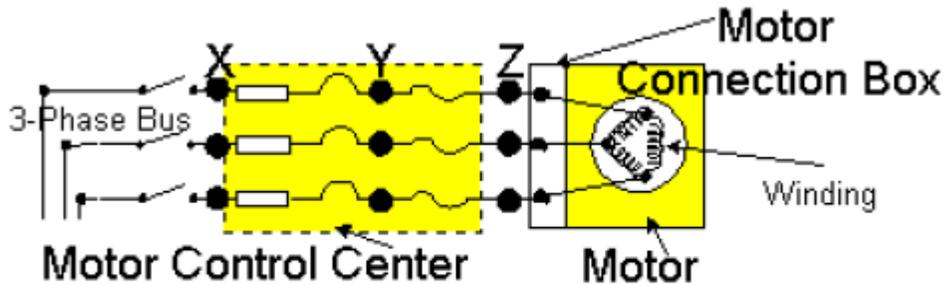


Figure 4

La figure 4 indique trois possibilités de points tests permettant de localiser une mauvaise connexion. La position X se trouve en amont des fusibles. Si le déséquilibre résistif est important à cet endroit, il conviendra d'effectuer une mesure en position Y qui est localisée en aval du contacteur. Si le déséquilibre résistif est toujours présent au point Y, il est impératif d'effectuer cette mesure en position Z qui isolera le moteur du circuit d'alimentation et permettra par ce fait de déterminer l'emplacement du défaut.

**Condition des isolants :** Cela se rapporte aux isolants utilisés entre les enroulements et la terre. La température élevée, l'âge des isolants, l'humidité ainsi que la contamination due à la poussière réduisent la durée de vie de ces isolants. Il a été mis en évidence que l'utilisation de chauffages afin d'assécher les isolants peut doubler la durée de vie des moteurs.

Les isolants utilisés de nos jours sont de plus en plus performants et capables de résister à des températures de plus en plus élevées sans pour autant affecter la durée de vie des moteurs. Cependant, il existe toujours des causes de destruction de ces isolants plus rapide que prévue. Il faut garder à l'esprit que même si un défaut des isolants est souvent la cause d'une panne sur un moteur, ce défaut est lui-même dépendant d'autres facteurs. Le circuit d'alimentation d'une part influence considérablement les isolants. Si une mauvaise connexion (à haute résistance) se trouve en amont du moteur et génère un déséquilibre résistif supérieur à 5%, et que l'on continue à faire fonctionner ce moteur dans ces conditions à sa puissance nominale, la durée de vie des isolants en sera affectée et considérablement réduite. Des séquences de courants inversés d'autre part générant des champs magnétiques opposés au sens de rotation du moteur ne vont pas seulement réduire la capacité de couple de ce dernier, mais également créer un échauffement important qui pourra excéder les 150°C qui sont la limite des systèmes en isolation de classe F. Est-ce que le système d'isolation était la première cause de défaut du moteur ou bien était-ce seulement un symptôme? Il est aisé de déterminer que l'isolation du moteur

était en cause mais cela se produira à nouveau avec un moteur neuf si le problème n'est pas corrigé au préalable. Dans ce cas, quelle en serait l'explication?

Effectuer des mesures avec un mégohmmètre ne permet pas de tout comprendre du problème, mais c'est en revanche un bon début dans ce type de situation. Un point qui est cependant souvent survolé quand il s'agit de mesurer la résistance à la terre, est la valeur de référence à 40°C (IEEE). Effectuer une telle mesure indépendamment de la température des enroulements va donner des résultats très variables et dépendants de cette température. Afin de satisfaire les recommandations IEEE, il conviendra d'effectuer des corrections en fonction de la température. Cela fournira également des données beaucoup plus précises comme indiqué sur le graphique 5.

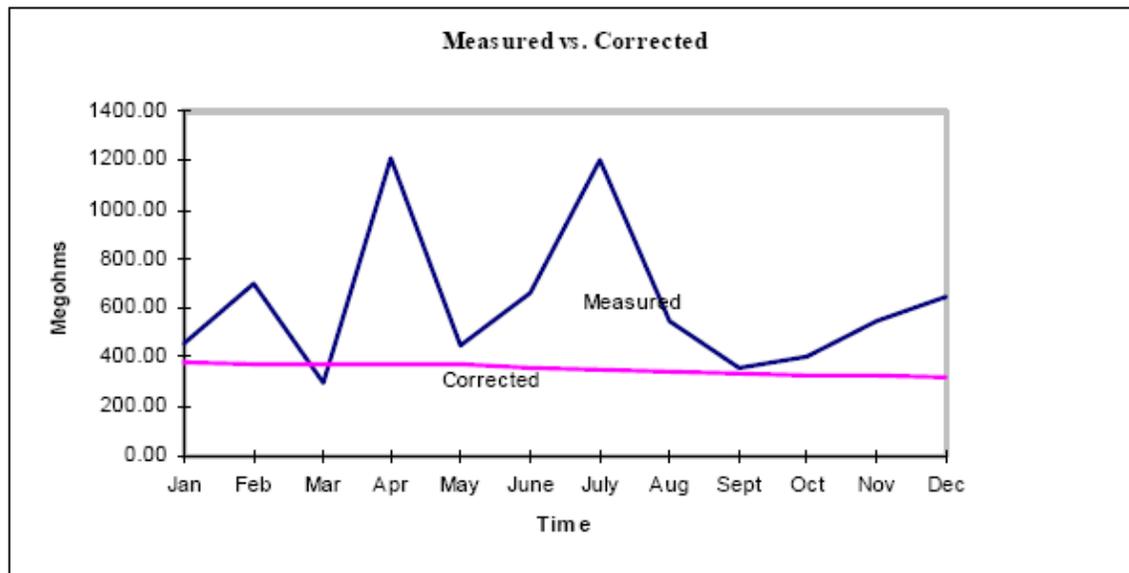


Figure 5

Veillez noter que l'humidité peut affecter la valeur obtenue corrigée en fonction de la température. Il conviendra de s'assurer que les chauffages sont bien en marche lorsque le moteur n'est pas en fonctionnement afin d'éviter cette erreur.

Un test qui n'est plus très populaire de nos jours est la mesure du facteur de polarisation (PI pour Polarization Index). Le fait d'appliquer une tension continue, lors d'un test avec un mégohmmètre, pour une durée de dix minutes va générer une augmentation de la valeur de résistance à la terre (ou RTG pour Resistance To Ground). Cela vient en fait du chargement du système d'isolants, comme cela se produirait avec un condensateur, qui cause une réduction de la diminution du courant. Selon la loi d'ohm ( $I = U / R$ ), la réduction de la diminution de courant équivaut à l'augmentation de la résistance. La norme IEEE recommande de diviser la valeur de résistance à la terre obtenue après dix minutes par la valeur de résistance à la terre obtenue après une minute. Un résultat supérieur ou égal à 2 est alors considéré comme acceptable.

Malheureusement, des moteurs présentant des isolants instables peuvent donner des valeurs proches ou supérieures à 2 et toujours être défectueux.

**PI = 1.94**

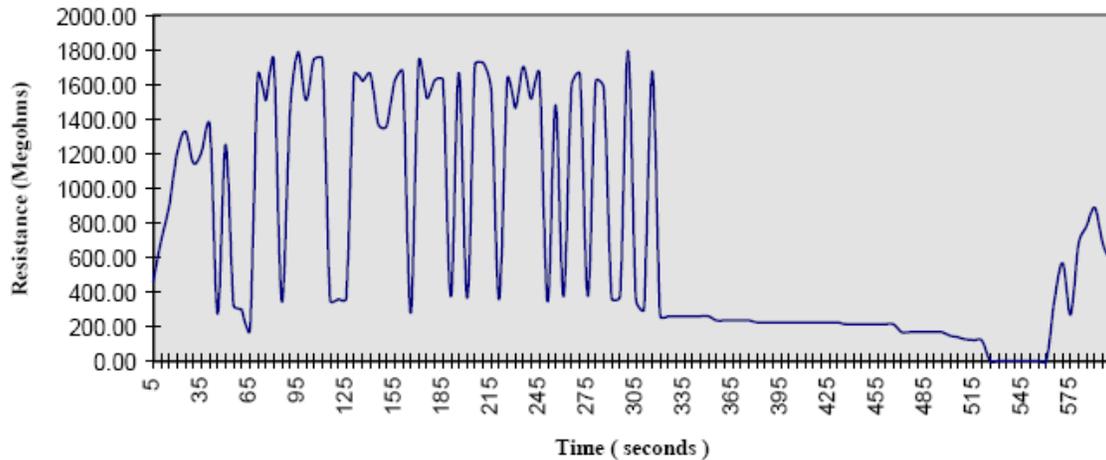


Figure 6

Sur le graphique 6, si on divise la valeur obtenue après dix minutes (environ 600 MΩ) par la valeur obtenue après une minute (environ 300 MΩ), on obtient un facteur de polarisation de 1.94. Cela satisfait presque les recommandations de la norme IEEE pour un système avec une isolation correcte, et serait probablement accepté en pratique. Cependant, on remarquera que le système d'isolation se montre particulièrement instable. D'une manière générale, il conviendra de **toujours se fier au profil de la courbe de l'index de polarisation et pas à sa seule valeur.**

Toutefois, un signal continu ne permet pas systématiquement la meilleure évaluation de la condition des isolants. L'isolation d'un moteur est en fait un diélectrique. Par conséquent, c'est un très mauvais conducteur de courant continu. C'est un atout puisque l'on veut limiter au maximum les fuites à la terre, mais un inconvénient lorsqu'il s'agit de tester avec précision un tel système avec un signal continu ou un mégohmmètre. Un courant alternatif au contraire, ne va pas charger le diélectrique et va pouvoir être conduit beaucoup plus facilement. L'avantage est que cela va permettre une détection plus rapide d'un défaut d'isolation, mais au risque de dégrader cette dernière. Cependant, les tests de capacité à basse tension sont non destructifs et de très bons indicateurs de la dégradation des isolants. Les valeurs obtenues sont en PicoFarad (pF) et peuvent être enregistrées et interprétées efficacement dans le temps.

**Etat du stator :** Qu'est-ce qu'un stator? Un stator définit l'enroulement DC ou les trois enroulements AC, les isolant entre les spires de l'enroulement, les parties fixes entre les bobines et le noyau du stator ou lamination.

Un des défauts les plus courants au niveau des enroulements d'un moteur est un défaut dit de tour à tour. Cela se produit quand l'isolant se détériore entre deux tours de la

même bobine. Cela affecte sa capacité à produire un champ magnétique équilibré. Des champs magnétiques non équilibrés génèrent des vibrations, qui à leur tour peuvent dégrader les isolants ainsi que les roulements. Un échauffement localisé autour du court-circuit peut alors endommager les autres enroulements à proximité jusqu'à créer un court-circuit entre plusieurs bobines. Enfin, un échauffement excessif ne va pas seulement endommager les enroulements, mais va également affecter les isolant se trouvant entre les lamination et le noyau du stator.

Un autre type de défaut pouvant se produire sur les enroulements d'un moteur est le défaut entre phase. Il est créé par la rupture de l'isolation entre deux phases, principalement lorsque les enroulements se trouvent à proximité l'un de l'autre dans la même encoche. Une différence de tension élevée a tendance à amplifier le phénomène très rapidement. Du papier est placé dans les encoches entre les différentes phases afin de limiter les risques de fuite entre phases.

Un court-circuit entre deux tours ou entre deux phases peut se produire sans pour autant créer un défaut d'isolation à la terre immédiat. Pour cette raison, le simple fait de tester avec un mégohmmètre en préventif, ou même après que le moteur ait disjoncté ne va pas forcément permettre d'en identifier la cause. Ce défaut au niveau de l'enroulement peut alors devenir un défaut majeur du moteur. Un défaut permanent au niveau du noyau va alors nécessiter le remplacement du moteur.

Un stator peut être testé en se connectant directement sur le moteur ou bien sur le MCC. Pendant le test, des signaux alternatifs de haute fréquence sont envoyés au moteur. Ces signaux génèrent des champs magnétiques autour des enroulements qui devraient être comparables sur toutes les phases. L'inductance de chaque phase est mesurée et comparée à l'inductance des autres phases. Un déséquilibre inductif est alors calculé. Cette valeur de déséquilibre moins l'influence du rotor est utilisée pour déterminer la faculté de chacune des phases à générer un champ magnétique équilibré.

Egalement, pendant ce test, des signaux continus sont envoyés au moteur. La résistance des enroulements est calculée à partir de ces signaux. Les trois valeurs de résistance sont alors comparées et utilisées pour calculer une valeur de déséquilibre résistif. Si cette valeur dépasse une limite pré-déterminée, on peut en déduire qu'il y a des mauvais contacts à haute résistance au niveau des soudures entre les bobines.

Il y a deux principaux types de configurations des enroulements d'un stator ou couplages. Le premier type de couplage est le couplage en étoile (ou Y), le second est le couplage en triangle (ou Delta). Une connaissance des types de couplages peut aider à bien comprendre ce que signifient les valeurs des inductances obtenues.

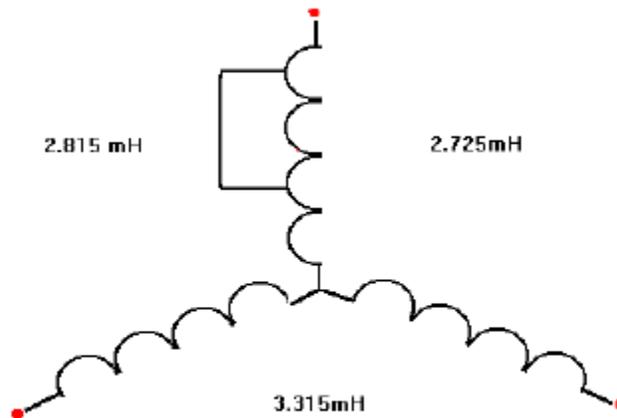


Figure 7

En présence d'un défaut entre deux tours sur un couplage en étoile (Y), on mesurera deux valeurs d'inductance faible et une valeur d'inductance élevée.

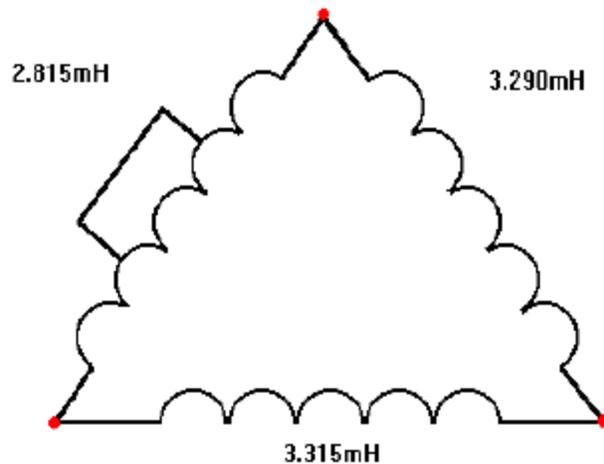


Figure 8

En présence d'un défaut entre deux tours sur un couplage en triangle (delta), on mesurera une valeur d'inductance faible et deux valeurs d'inductance élevée.

**Etat du rotor :** Cela fait référence aux barres du rotor, aux laminations du rotor ainsi qu'aux bagues du rotor. Une étude menée conjointement par General Electric and EPRI dans les années 80 a montré que 10% des défauts de moteur étaient en fait dus au rotor. Ce rotor, même s'il n'est la cause que d'un faible pourcentage des défauts de moteur, peut impacter d'autres zones jusqu'à y créer des défauts. Lorsqu'un moteur avec

une barre de rotor fendue ou cassée est utilisée, cela crée un échauffement intense à proximité de la cassure. Cette température excessive peut alors se propager à d'autres barres de rotor et détruire l'isolation autour des laminations qui se trouvent à proximité. Cela peut également impacter d'autres parties du moteur. Qu'est-ce qui se trouve à quelques millimètres seulement du rotor? Le stator. L'isolation du stator ne peut résister à la chaleur intense générée par le rotor défectueux et va finir par se détériorer. Malheureusement, il est très difficile de diagnostiquer un rotor endommagé sans l'appareillage adéquate, et donc de déterminer la cause première du défaut. Cela va probablement engendrer un rebobinage du moteur, ainsi que le remplacement des roulements, mais pas une réparation efficace du moteur. Lorsque le moteur est utilisé à nouveau, le même défaut va se reproduire, et le nouvel isolant va se détériorer à nouveau.

Une des méthodes consistant à tester l'état du rotor est appelée RIC (pour Rotor Influence Check) ou vérification de l'influence du rotor. Qu'est-ce que la RIC? La RIC est un test exécuté sur les bobines ou induction AC, les synchrones ainsi que les rotors qui représentent les interactions magnétiques entre rotor et stator. Cette relation indique la condition du rotor ainsi que l'excentricité du moteur.

La vérification de l'influence du rotor est effectuée en faisant tourner le moteur par incréments spécifiques (déterminés au préalable en fonction du nombre de pôles) pour chaque pôle. La variation de l'inductance est enregistrée pour chaque phase d'un moteur triphasé. Afin d'obtenir un résultat correct et précis, il est recommandé d'effectuer 18 mesures par pôle. Le nombre de pôles d'un moteur est déterminé par l'équation ci-dessous :

$$F = NP / 120$$

Avec : F = fréquence (60Hz aux US, 50Hz en Europe)

N = vitesse de rotation en tours/mn

P = nombre de pôles

$$\text{Donc } P = 7200 / N \text{ (aux US)}$$

$$P = 6000 / N \text{ (en Europe)}$$

Exemple : Combien de pôles ont un moteur portant l'indication 1780 tours / mn sur sa plaque?

$$P = 7200 / 1780$$

$$P = 4$$

En l'absence de données sur un moteur, une mesure de RIC doit être effectuée systématiquement, même pour obtenir des informations sur le fonctionnement de la roue d'écureuil. Des défauts tels que des barres de rotor cassées ou des laminations endommagées peuvent être présents même si l'équilibre inductif est faible. Si vous fondez votre choix d'effectuer un RIC uniquement sur l'importance de la valeur de l'équilibre inductif, il se peut que des défauts de barre de rotor, même déjà importants, ne soient pas détectés.

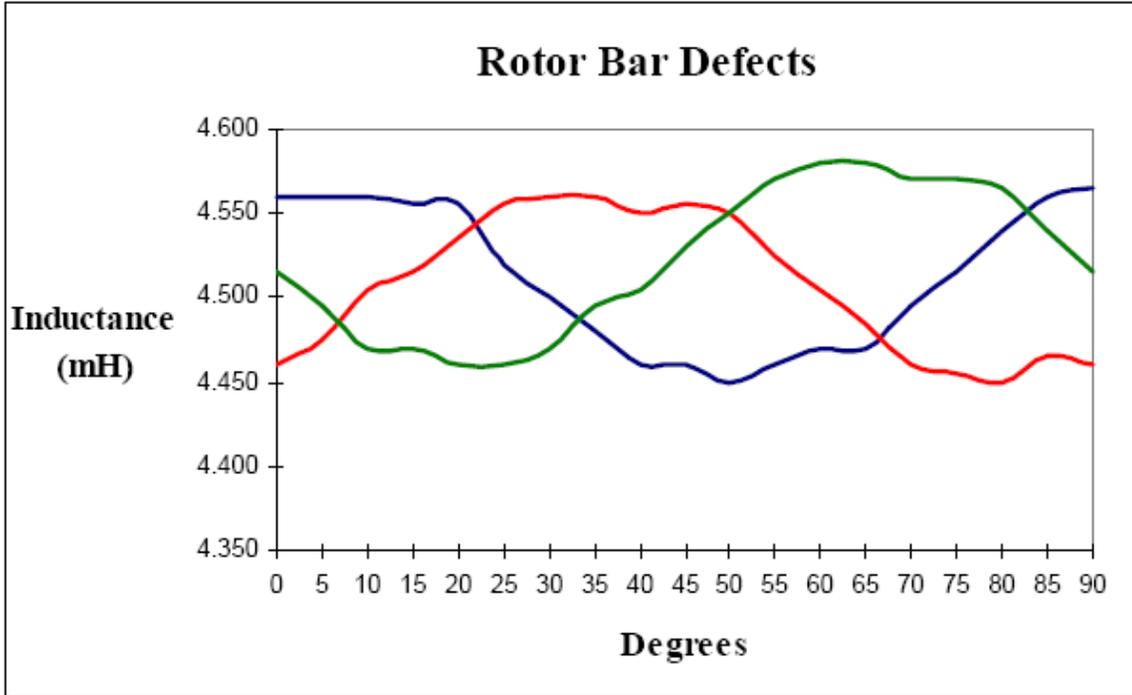


Figure 9

Le graphique 9 montre les variations d'inductance prévisibles pour un moteur avec des barres de rotor cassées. Remarquez les irrégularités de la courbe aux valeurs maximum de la sinusoïde pour chaque phase. Des barres de rotor cassées créent une déformation dans le flux du champ généré par et autour des barres du rotor. Un rotor sans défaut n'aurait pas de déformations ou d'irrégularités comme indiqué sur la graphique 10.

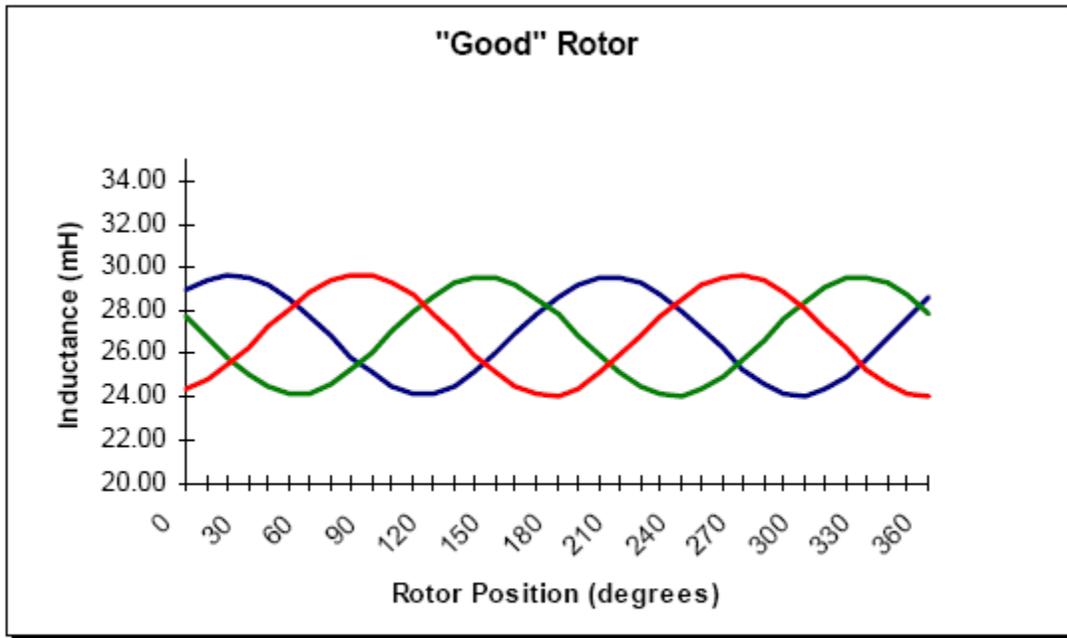


Figure 10

Relations entre rotor et stator : Cette relation fait référence à un jeu entre rotor et stator. Si ce jeu n'est pas réparti de façon régulière sur tout le tour du moteur, des champs magnétiques inégaux peuvent être produits. Ces déséquilibres magnétiques peuvent générer des mouvements des enroulements du stator, entraînant un défaut d'enroulements ainsi que des vibrations entraînant un défaut des roulements. Ce jeu inégal entre rotor et stator est également appelé excentricité.

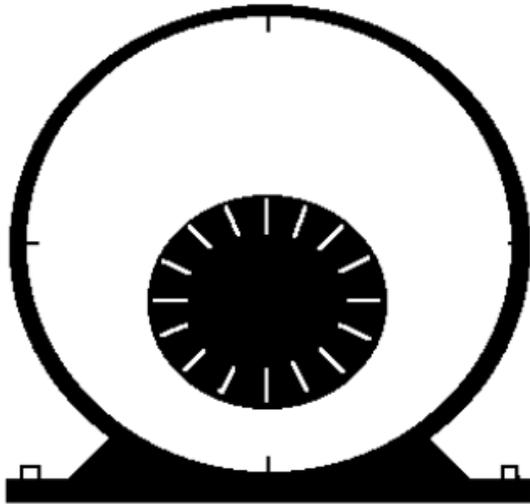


Figure 11

Ce premier type est appelé excentricité statique. La figure 11 et le graphique 12 décrivent ce type d'excentricité, physiquement ainsi que les variations d'induction. Ce type d'excentricité est causé par un mauvais alignement ou mauvais montage dans le roulement de l'arbre.

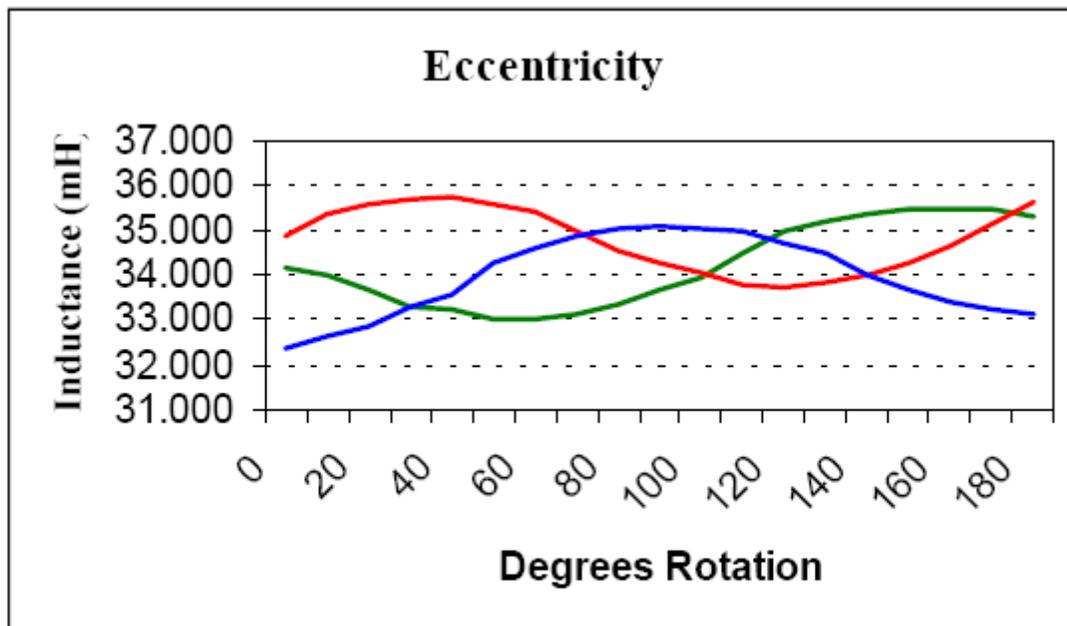


Figure 12

L'effet sur la mesure d'induction est une variation des extrêmes des sinusoides comme indiqué sur le graphique 12.

Le second type d'excentricité est appelé excentricité dynamique. Cela se produit lorsque le rotor ne reste pas au même endroit mais peut bouger à l'intérieur du stator comme indiqué sur la figure 13.

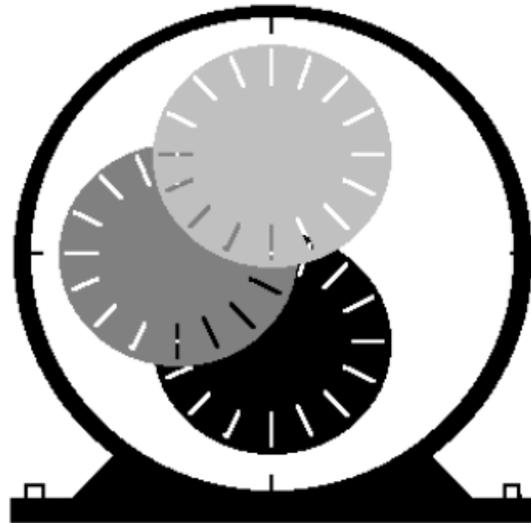


Figure 13

L'effet sur la mesure d'induction est un mouvement des valeurs des trois inductances vers le haut ou vers le bas en fonction de quelle phase se trouve la plus proche du rotor à un certain angle de la rotation. Ceci est visible sur le graphique 14.

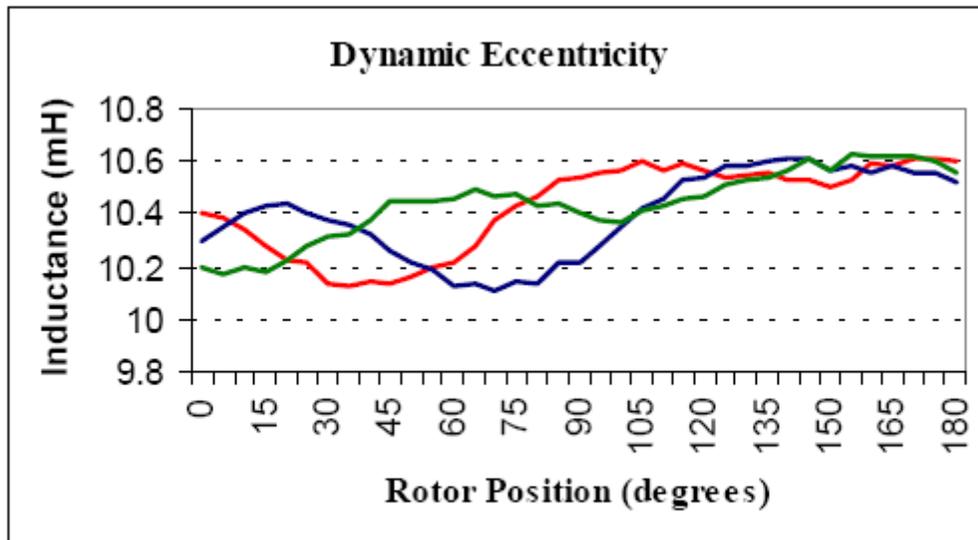


Figure 14

Pour conclure, l'expression qui consiste à dire : «le moteur est en bon état» est tout simplement insuffisante pour être certain d'être pris au sérieux et qu'un diagnostic précis et fiable a été effectué. S'il est de votre ressort de décider du type de dépannage ou d'interpréter le diagnostic, prenez du recul. Dans la mesure du possible, ne prenez pas de décision rapide. Séparez le système en chaque zone de défaut, testez complètement chaque zone avec les appareillages disponibles. Enfin, faites vos recommandations par écrit ou oralement en utilisant le vocabulaire utilisé dans l'étude des zones de défaut afin d'exprimer votre confiance et professionnalisme.