Les causes des vibrations des machines électriques tournantes

Autor(en): **Briendl, Dieter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **79 (1987)**

Heft 1-2

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940622

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Les causes des vibrations des machines électriques tournantes

Dieter Briendl

Résumé

Différents mécanismes peuvent produire des vibrations intempestives dans les alternateurs de centrales hydro-électriques. Les principaux mécanismes apparaissant en pratique et leurs effets seront décrits.

Zusammenfassung: Ursachen von Schwingungen bei elektrischen Maschinen

Eine Vielzahl von Mechanismen können störende Schwingungen an Wasserkraftgeneratoren anregen. Die wichtigsten in der Praxis auftretenden Mechanismen und ihre Erscheinungsformen werden beschrieben.

Summary: Causes of vibrations in electrical machinery

A various number of exciting mechanisms can create disturbing vibrations in hydraulic power plants. The most obvious and important phenomenons will be discribed.

Introduction

Les vibrations des machines tournantes sont indésirables pour les raisons suivantes:

- Elles sont l'indice d'un défaut.
- Les forces qui les accompagnent (souvent multiples des forces d'excitations) peuvent conduire à des avaries supplémentaires.
- Dans certains cas elles altèrent les conditions de travail du personnel d'exploitation.

Pour les machines nouvelles, un projet bien élaboré permet de maintenir les vibrations au niveau minimal.

Les vibrations peuvent atteindre un niveau intolérable après un temps de service prolongé. Dans ce cas elles devront être mesurées et leurs causes identifiées. De cette façon les actions correctrices adéquates pourront être mises en œuvre.

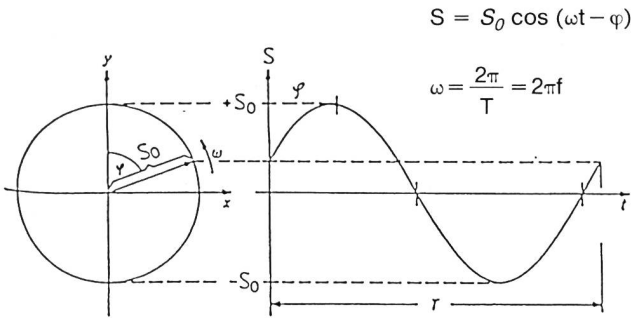
Cette communication présente les diverses causes des vibrations des machines électriques dans les centrales hydro-électriques. Des cas pratiques sont analisés.

En guise de préliminaire nous ferons un rappel des paramètres principaux indispensables à la description d'un phénomène vibratoire.

Définitions

Dans sa forme la plus élémentaire, une vibration peut être décrite par une fonction cosinusoïdale (figure 1).

Figure 1. Représentation graphique d'une vibration par une fonction cosinusoïdale et par un vecteur tournant à une vitesse angulaire constante ω.



Une vibration, si complexe soit-elle, peut toujours être ramenée à cette forme élémentaire par une expression mathématique adéquate (série de Fourrier par exemple). Les paramètres fondamentaux sont l'amplitude S_o, la fréquence f, la pulsation ou fréquence angulaire ω, et l'angle de phase φ au temps $t = 0$.

L'amplitude représente la grandeur de la vibration, elle est mesurée en valeur de crête à crête ou en valeur efficace.

L'accélération, la vitesse et le déplacement sont les paramètres considérés pour la mesure des vibrations mécaniques.

La relation suivante existe entre ces trois grandeurs:

$$V_0 = \omega^2 \cdot S_0$$

La fréquence f (ou la fréquence angulaire ω) nous indique combien de fois le phénomène se répète par seconde (unité Hertz ou Hz). Dans cette communication nous parlerons souvent de vibration à la fréquence de rotation. De cette façon il est établi que la fréquence de la vibration est égale à la vitesse de rotation de la machine.

$$f = n/60 \text{ [Hz]}; \; n \text{ [tr/min]}$$

D'une façon générale l'on parle de vibration proportionnelle à la vitesse de rotation (harmonique lorsque la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale, sous-harmonique lorsque la fréquence est un sous-multiple exact de la fréquence fondamentale) lorsque la condition suivante est satisfaite:

$$f = in/j60 \quad i,j = 1,2,3\ldots$$

Résonance

Un système mécanique peut être modelisé d'une façon élémentaire par une masse, une raideur ou son inverse la souplesse et un amortissement.

La figure 2 présente l'amplification (V) en fonction de la fréquence.

V se définit comme le quotient de l'amplitude par la force d'excitation, rapportée à $V(0) = V$ pour $f = 0$

$$V = S(f)/F(f)$$

On peut également définir V comme le quotient des déplacements

$$V = S(f)/S_1(f)$$

$S(f)$ étant l'amplitude de la vibration au point d'application de la force d'excitation.

V atteint son maximum lorsque la fréquence d'excitation coïncide avec f_0 (fréquence de résonance). La largeur de la courbe de résonance et V_{max} dépendent de l'amortissement du système. Pour les corps en rotation, on utilise le terme de «vitesse critique» au lieu de résonance. Lorsque la fréquence d'excitation (par exemple la vitesse de rotation) est inférieure à f_0 on parle d'un système hypocritique et lorsqu'elle est supérieure à f_0 d'un système hypercritique.

Après ces préliminaires, nous allons aborder les causes des vibrations dans les machines électriques. Comme toujours lorsqu'il s'agit de la description d'un grand nombre de phénomènes, une simple énumération peut engendrer une certaine confusion. Aussi avons-nous tenté de les ordonner de manière systématique.

Dans une centrale hydro-électrique on parle de vibrations lorsque les amplitudes sont pour le moins mesurables. Dans ce cas, elles atteignent généralement un niveau critique pour le bon fonctionnement des machines.

La plupart des mécanismes d'excitation que nous allons décrire sont toujours présents dans les machines électriques. Néanmoins des vibrations d'amplitudes considérables se produisent uniquement lorsque le mécanisme

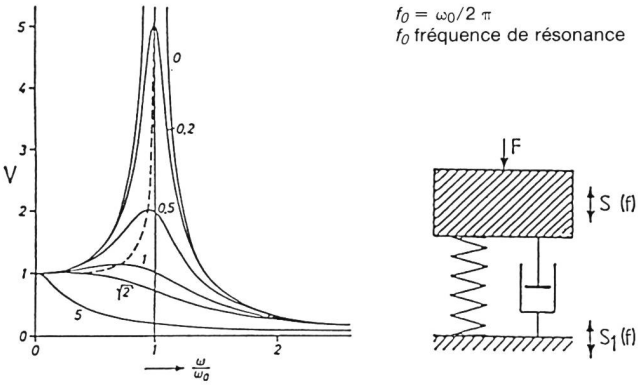


Figure 2. Amplification à fréquence propre.

d'excitation engendre une force suffisante, dans le cas d'un système instable par exemple, ou lorsque le système est en résonance.

Il est à noter que la fréquence de résonance peut se modifier en service en fonction des usures. De plus il faut distinguer entre vibrations du rotor et vibrations du stator.

Il est à remarquer que:

a) Les deux systèmes sont couplés par l'intermédiaire du film d'huile des paliers et du champ magnétique dans l'entrefer.

b) Certains mécanismes d'excitation agissent à la fois sur le rotor et sur le stator.

Les vibrations de torsion et celles de flexion seront considérées séparément.

Les divers mécanismes d'excitation seront classés en fonction de l'influence prépondérante:

a) d'origine mécanique

b) d'origine magnétique

c) due à un écoulement (ventilation)

Vibrations de flexion/Rotor

Excitations d'origine mécanique

Vibrations dues à un balourd

C'est la cause prépondérante, elle est responsable de plus de 70% des cas de vibrations. Lorsque l'axe de rotation ne coïncide pas avec l'axe neutre, le rotor est soumis à une force tournante de vitesse égale à celle du rotor. Cette force est transmise aux paliers, les forces de réaction de ces derniers maintiennent le rotor en place. Il se produit une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude croît proportionnellement au carré de la vitesse en-dessous de la première vitesse critique. Les causes du balourd, en plus des tolérances de fabrication et de montage, en grande partie compensées par l'équilibrage, sont les déplacements de masses se produisant en service ou après une révision. Comme exemple nous citerons le déplacement d'une jante empilée ou de l'enroulement rotorique, l'alignement insuffisant et un accouplement inadéquat. La libération de tensions internes ou de frettage occasionne une déformation de l'arbre ayant pour conséquence un balourd pouvant atteindre une valeur importante.

Un échauffement irrégulier entraîne également une déformation de l'arbre. Comme causes nous pouvons citer les répartitions irrégulières de température occasionnées par des court-circuits entre spires, les asymétries du circuit de refroidissement, les variations du coefficient de transmission de chaleur et le degré d'encrassage. Même dans le cas d'un échauffement régulier le rotor peut se déformer suite à des résistances irrégulières à la dilatation produite par des forces de frottement ou les raideurs axiales de l'empilage rotorique, des pôles et des enroulements.

De fortes déformations peuvent se produire lorsqu'un rotor se refroidit de façon irrégulière, la machine étant à l'arrêt. Ceci provoque une variation du niveau de vibration si la machine est remise en service avant que les températures ne soient stabilisées. Après un certain temps de fonctionnement le niveau antérieur de vibrations se rétablit.

Un cas particulier de vibrations d'origine thermique est connu sous le nom de vecteur de vibration tournant (Vektorkreisen). Ceci se produit lorsqu'un rotor entre légèrement en contact avec des parties fixes comme par exemple les labyrinthes d'étanchéité. Le frottement engendre un échauffement local, l'arbre se déforme et un autre point de ce dernier se met à frotter. Le phénomène est amplifié lorsque la vitesse de rotation est proche d'une vitesse critique. Il se traduit par une variation sinusoïdale de l'amplitude de la vibration (vecteur tournant dans la représentation du diagramme polaire).

Des balourds constants et des modifications permanentes peuvent être corrigés par un rééquilibrage. Les déformations thermiques ont un caractère non stationnaire et ne peuvent être corrigées par équilibrage que pour un seul état de charge (par exemple froid ou chaud).

Les variations du déséquilibre résiduel en service sont en général constantes. Des variations brusques et importantes sont l'indice d'une avarie.

Excitations dues à l'anisotropie du rotor

Des variations de la résistance à la flexion suivant divers plans axiaux de l'arbre qui ne peuvent être évités dans les rotors bipolaires, ont pour conséquence une vibration de fréquence double de la fréquence de rotation. Considérant un modèle simple, nous pouvons expliquer ce phénomène de la façon suivante:

Soit une poutre rectangulaire en rotation appuyée aux extrémités suivant la figure 3. Le centre de gravité accomplit un cercle complet alors que la poutre ne tourne que de 180°. Une résonance se produit approximativement à la moitié de la vitesse critique.

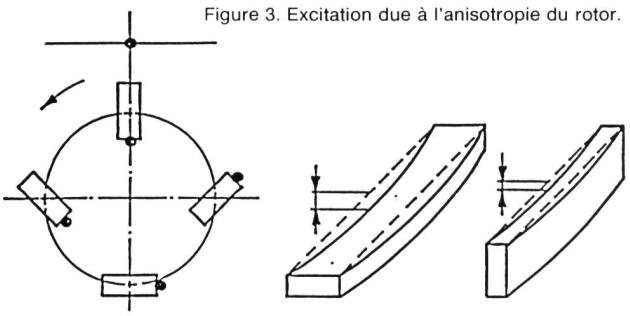
Ce mécanisme d'excitation peut se produire dans les générateurs hydrauliques bien que des rotors bipolaires soient rarement utilisés. Pour un rotor horizontal, un frettage insuffisant peut occasionner le même effet.

Excitation due au faux-rond des tourillons

Un tourillon centré mais non cylindrique (après un réussinage de l'arbre suite à une avarie de palier par exemple) occasionne à chaque tour un déplacement de l'axe de rotation dans le coussinet et provoque ainsi des vibrations de l'arbre. La forme géométrique du tourillon définit la fréquence de la vibration. Dans le cas le plus simple, un tourillon oval produit une vibration de fréquence égale à deux fois la fréquence de rotation.

D'une façon générale, plusieurs fréquences apparaissent ($f' = i \cdot f$; f = fréquence de rotation, $i = 2, 3, 4$ --). Certaines

Figure 3. Excitation due à l'anisotropie du rotor.



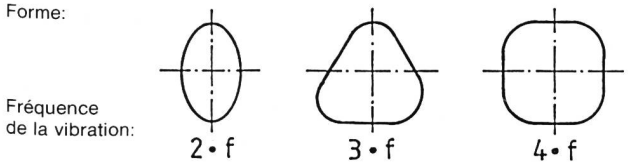


Figure 4. Excitation due à des tourillons non cylindriques.

d'entre elles peuvent être amplifiées par le phénomène de résonance.

Excitation axiale

Contrairement aux turbines, les machines électriques sont rarement soumises aux vibrations axiales. Cependant des vibrations axiales importantes peuvent se produire.
Certains arbres auxiliaires, par exemple ceux des excitatrices, sont reliés à celui du générateur par un accouplement flexible. Ce système ressort/masse peut conduire à des résonances. Etant donné que l'amortissement du système est faible, de très petites excitations produisent des vibrations importantes.
Des vibrations axiales importantes peuvent se produire dans les groupes verticaux lorsque la surface du pivot n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'axe de rotation. Considérant le rapport des masses, ces vibrations à la fréquence de rotation se manifestent surtout dans les parties stationnaires de la machine. Ce mécanisme de vibration est également présent dans les machines horizontales.
Il est encore à remarquer que pour les groupes verticaux, des vibrations radiales importantes à la fréquence de rotation se produisent lorsque la glace du pivot est oblique. En disposition horizontale, ces forces sont négligeables par rapport au poids propre du rotor.
Ce mécanisme tend à s'amplifier avec le temps, étant donné que les forces alternatives agissant sur la fixation de l'anneau porteur peuvent provoquer des desserrages et des déplacements supplémentaires. Pour cette raison, ce phénomène a été découvert seulement dans des machines en service depuis de nombreuses années.

Excitation non linéaire

Pour des raisons de simplification, des modèles linéaires sont généralement considérés pour les calculs de vibration. Les grandes amplitudes peuvent conduire à des comportements non linéaires importants. Mais ceci n'est pas suffisant en soi pour produire des vibrations. Cependant une excitation non linéaire de fréquence fA engendre d'autres fréquences

$$f = \frac{i}{j} fA \quad i,j = 1,2,3\ldots \text{ etc.}$$

appelées harmoniques ($j = 1$) sous-harmoniques ($i = 1$) et ultraharmoniques. La résonance peut amplifier certaines de ces composantes de telle façon que l'on peut mesurer des amplitudes supérieures à celle produite par la fréquence fondamentale.

Excitation occasionnée par un arbre fissuré

Nous devons distinguer deux cas, à savoir fissure ouverte et fissure «respirante». Pour les machines verticales, la fissure est généralement ouverte, pour les machines horizontales, la fissure s'ouvre et se ferme à chaque rotation de l'arbre. Dans le premier cas, les vibrations ont la fréquence de rotation et un comportement identique à celui d'un déséquilibre résiduel. Dans le second cas, elles ont une fréquence égale, double et triple de la fréquence de rotation. Il est à remarquer qu'au début, le défaut peut se traduire par une diminution du niveau de vibration avant que des amplitudes très grandes ne se manifestent.

Excitation magnétique

Les asymétries du champ magnétique dans l'entrefer provoquent de très grandes forces agissant à la fois sur le rotor et le stator. Dans les vieilles machines à pôles massifs, les asymétries peuvent être occasionnées par un matériel non homogène. Après un temps de fonctionnement prolongé, des courts-circuits entre spires, dans le cas extrême, un pôle complet en court-circuit peuvent se présenter. Pour des machines de 4 pôles et plus, ceci se traduit par une force tournante importante et la possibilité d'un contact entre rotor et stator n'est pas à exclure. L'elasticité du stator renforce ce mécanisme.
Le remontage des pôles après révision dans une position différente de la position originale produit le même phénomène.
Dans le cas d'un champ magnétique parfaitement symétrique, le balourd résiduel occasionne une asymétrie et la vibration est renforcée par le champ magnétique. Ceci a pour conséquence un abaissement de la vitesse critique. Le comportement du générateur peut être influencé de manière significative si la vitesse critique est déjà proche de la vitesse nominale à la suite d'un desserrage de la fixation des paliers par exemple.
Des forces périodiques de direction fixe à la fréquence double de celle de rotation ($= 2\,p \cdot f$; p = nombre de paires de pôles) agissent sur le rotor et le stator lorsque l'axe de rotation est décentré par rapport au centre de la machine (montage décentré du rotor).
Pour les machines asynchrones les forces et les vibrations dues au mécanisme décrit ci-dessus sont modulées à la fréquence fm

$fm = 2\,p \cdot fs$ (fs = fréquence de glissement)

Des barres rotoriques cassées ou des court-circuits produisent des forces à la fréquence double ou quadruple de celle du réseau. Ces forces sont modulées à la fréquence double de celle du glissement. Cette modulation est un paramètre caractéristique du diagnostic de vibration d'une machine asynchrone.

Excitations dues aux écoulements

Contrairement aux turbines, ce type d'excitation est peu important dans les générateurs. Un type d'excitation connu est produit par une instabilité dans le circuit de ventilation. Suite à l'encrassement de ce dernier, il peut arriver que le point de fonctionnement du ventilateur se déplace dans la zone turbulente.
Dans la pratique, une vibration dont l'origine est liée directement aux écoulements n'a pas été constatée jusqu'à présent. Ceci s'explique par la comparaison des masses et des vitesses du fluide de refroidissement avec la masse et la rigidité des éléments de la machine.
Un exemple d'excitation de ce type a pour origine une instabilité du film d'huile. L'explication physique du phénomène est que le parlier peut introduire une certaine quantité d'énergie dans le mécansime de vibration de flexion. De cette façon, le coefficient d'amortissement devient négatif et des vibrations se produisent. Les paramètres influençant le phénomène sont la vitesse de rotation, la charge et le jeu du palier, la viscosité et la température de l'huile. La fréquence de vibration se situe pour des machines sous-critiques dans le domaine de la demi-vitesse de rotation. L'amplitude des vibrations est limitée uniquement par le jeu des paliers. Ce type de vibration conduit généralement à des avaries de palier. Typiquement, la vibration présente un caractère d'hysteresis c'est-à-dire que si, pour une variation

d'un certain paramètre – par exemple la vitesse ou la température – un comportement vibratoire de caractère instable se produit, il ne suffit pas de ramener le paramètre en question à sa valeur antérieure, mais il faut la dépasser si l'on veut éliminer la vibration.

Vibrations de flexion/stator

Excitation mécanique

Etant donné que des forces périodiques d'origine mécanique n'agissent pas directement sur le stator, il faut comprendre ici l'effet de toutes les vibrations transmises au stator (par exemple du rotor par l'intermédiaire des paliers ou de l'assise de la machine). A la résonance, des vibrations d'amplitudes très grandes se produisent.
Un cas spécial se présentant souvent dans la pratique est celui de la vibration des balais. Ce type de vibration est très complexe et ne sera décrit que très brièvement. Les facteurs influençant les vibrations des balais sont l'humidité, la température, la densité de courant, l'état de surface. De grandes amplitudes dans le domaine de 500 à 2000 Hz provoquent une détérioration de la patine, une usure accélérée des balais et une grande résistance de contact. Les vibrations à la fréquence de rotation, observables à l'œil nu dans certaines machines, n'ont qu'une importance secondaire si leur amplitude n'est pas trop grande.

Excitation magnétique

Les vibrations d'origine magnétique du rotor ont pour conséquence des forces de réaction dans le stator produisant des vibrations importantes dans le cas de résonance.
Le champ magnétique du rotor peut provoquer une déformation du stator se déplaçant à la même vitesse. Les harmoniques du champ tournant du stator peuvent également conduire à des ondes de déformation et à des vibrations importantes de l'empilage statorique pour autant que la forme de l'onde de déformation coïncide avec un mode de résonance du stator (carcasse-empilage). L'onde peut se déplacer soit dans le sens de rotation soit en sens inverse. Une caractéristique de ce mode d'excitation est que la fréquence des vibrations statoriques est toujours le double de celle du réseau. Les fréquences de résonance de l'empilage statorique dépendent de sa fixation à la carcasse. Lorsque cette fixation est lâche, le comportement est fortement influencé par la température (charge et temps). Des stators en plusieurs parties, dont les fixations sont desserrées présentent le même comportement (figure 5).
Les enroulements statoriques et principalement les têtes de bobines sont très sensibles aux vibrations d'origine electromagnétique. Lorsque les cales d'encoche sont lâches, les forces magnétiques produisent des vibrations des barres ou des bobines dans les encoches. Ceci endommage inévitablement l'isolation. Le courant statorique, le champ de fuite du rotor et les vibrations de l'empilage produisent des vibrations dans les têtes de bobine. Les défauts tels que les court-circuits brusques peuvent provoquer un relâchement de la fixation des têtes de bobine. Le résultat en est une modification de la fréquence de résonance qui se trouvait précédemment en dehors de la zone dangereuse. Dans le cas le plus défavorable, elle se rapproche de la fréquence double de celle du réseau. En service normal de grandes vibrations, une usure accentuée de l'isolation par frottement et éventuellement des ruptures de conducteurs apparaissent.

Excitations dues aux écoulements

Il est rare que la vitesse élevée de l'air de refroidissement provoque des vibrations des guides d'air ou des tôles de fermeture. Cependant de grandes vibrations peuvent se produire à la fréquence de résonance de l'élément considéré.

Figure 5. Le bobinage statorique vibre à la fréquence double du réseau lorsque le blocage mécanique dans les encoches est insuffisant. Ceci à pour conséquence une dégradation de l'isolation. Pour cette raison un contrôle de calage du bobinage à intervalles réguliers s'impose. Une nouvelle méthode, basée sur une mesure spéciale des vibrations, permet de réaliser ce contrôle de manière fiable, l'influence de l'opérateur étant éliminée. (Photo BBC Brown Boveri)

Vibrations de torsion

Ce vaste domaine présente un grand nombre d'excitations possibles, mais nous ne les décrirons que très brièvement. Le rotor du générateur, la roue de la turbine et l'arbre (éventuellement des masses additionnelles en rotation) constituent un système torsionnel possédant pour le moins une fréquence de résonance. Une excitation à cette fréquence – qui peut provenir de la turbine – provoque des vibrations de torsion très élevées, l'amortissement du système étant faible. Ce mécanisme est très dangereux sans dispositif spécial de surveillance étant donné que la vibration est difficilement décelable avant qu'elle ne conduise à une avarie sérieuse. Dans la phase de conception d'une machine, des études intensives et des calculs étendus sont effectués pour éviter les résonances à la torsion.
Les moteurs asynchrones sont excités en torsion à une fréquence égale ou multiple de la fréquence de glissement. L'excitation apparaît surtout au démarrage.
Certains comportements du réseau comme la résonance sous-synchrone et les excitations statiques peuvent occasionner de grandes oscillations de puissance et des vibrations de torsion. Lorsque la fréquence d'excitation coïncide avec la fréquence naturelle de torsion du stator, des oscillations de plusieurs mm peuvent se produire.
Les stators de machines monophasées ont depuis de nombreuses années une fixation élastique afin de neutraliser les excitations de torsion à la fréquence double du réseau (33⅓ Hz) et désacoupler la machine de sa fondation. La fréquence de résonance du système est inférieure à la fréquence d'excitation afin de maintenir les oscillations au minimum.

Contrôle des vibrations

De l'exposé on peut conclure que les machines électriques sont soumises aux excitations les plus variées. Cependant, des vibrations importantes ne se produisent que lorsque certaines conditions défavorables se présentent simultanément. Considérant le grand nombre d'excitations possibles, chaque machine semble être dans une situation favorable à l'apparition de vibrations. Dans la pratique, ce n'est heureusement pas le cas. Par l'étude, par des contrôles de fabrication et de montage adéquats, on peut s'assurer que le niveau de vibration restera dans des limites tolérables. Il

faut cependant détecter les variations qui se produisent en service avant qu'elles ne deviennent dangereuses.
Nous disposons de deux outils complémentaires pour cette détection:
a) une installation de surveillance permanente des vibrations
b) un diagnostic de vibrations (finger print)
L'installation de surveillance protège la machine contre les vibrations intempestives d'une façon permanente et nous informe des modifications de l'état vibratoire. Elle doit être conçue de manière adéquate c'est-à-dire remplir les besoins spécifiques de la machine considérée. Il ne s'agit pas seulement de choisir les capteurs et dispositifs d'amplification adéquats, mais encore les points de mesure, les paramètres à mesurer et les critères d'évaluation. Il est évident que le comportement de la machine en service et ses réactions possibles doivent être connus.
Le diagnostic de vibrations exécuté tous les 5 ans environ, nous fournit des informations sur la position des résonances et sur les amplitudes et les effets des diverses excitations. Le premier diagnostic (finger print ou mesure de base) doit être réalisé immédiatement après la mise en service de la machine ou après une grande révision. Elle sert de base de comparaison pour tous les diagnostics ultérieurs. Dans le cas de perturbations, la mesure de base est un outil précieux pour la résolution rapide d'un problème.

Adresse des Verfassers: *Dieter Briendl,* BBC, Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., CH-5242 Birr.

Traduction par M. *Guy Schrobiltgen,* ingénieur électricien, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Abt. KWHZ 1, CH-5242 Birr.
Conférence lors des journées techniques «sur les vibrations de machines dans les usines hydro-électriques, 18 et 19 septembre 1986 à Interlaken.

Der deutsche Text des Vortrages «Ursache von Schwingungen bei elektrischen Maschinen» findet sich in der Verbandsschrift 47 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Rütistrasse 3a, CH-5401 Baden. Darin sind alle an der Fachtagung Schwingungen in Wasserkraftanlagen vom 18. und 19. September 1986 in Interlaken gehaltenen Vorträge enthalten.

Geothermische Energienutzung in der Schweiz – Möglichkeiten und Grenzen

Vortrag von Prof. Ladislaus Rybach, Inst. Geophysik an der ETH Zürich, gehalten vor der «Geologischen Gesellschaft in Zürich» am 17. November 1986 in Zürich

Im Inneren der Erde sind immense Wärmemengen gespeichert. Eine Nutzung der geothermischen Energie ist überall dort möglich, wo ein Arbeitsmedium (Dampf, Wasser) vorhanden ist, um die Erdwärme tieferen Schichten zu entziehen und zur Erdoberfläche zu befördern. Man unterscheidet vier Haupttypen von geothermalen Lagerstätten: 1) natürliche Dampfvorkommen (in der Schweiz nicht zu erwarten), 2) Kluft-Aquifere (Thermalquellensysteme), 3) Schicht-Aquifere (Tiefengrundgewässer) und 4) «Hot dry rock» (künstliches Zirkulationssystem, noch im Experimentierstadium u.a. in den USA, in England, Frankreich, BRD und Japan).

In der Schweiz sind zahlreiche Thermalquellensysteme bekannt, ferner ausgedehnte Schicht-Aquifere, insbesondere im Mittelland und Jura. Die geothermische Karte der Schweiz zeigt einige Stellen mit erhöhten geothermischen Gradienten, so z.B. in der Region Basel, im Gebiet zwischen Koblenz und Lenzburg sowie am Jura-Südfuss bei Yverdon. Die erwähnten, für die Schweiz in Frage kommenden geothermischen Energieträger können durch Tiefbohrungen erschlossen werden, wobei die Förderung der warmen Tiefenwässer mittels elektrisch betriebener Pumpen erfolgt. Die geothermische Wärme kann insbesondere für Raumheizung und Warmwasserbereitung eingesetzt werden in Wohngebieten, welche sich zur Fernwärmeversorgung eignen. In der Umgebung von Paris werden heute bereits 80000 Wohnungen aus geothermischen Quellen beheizt, unter Einsatz von Wärmepumpen. Dabei wird das abgekühlte Wasser durch Reinjektionsbohrungen wieder in den Untergrund geleitet; durch das geschlossene System können die Umwelteffekte der z.T. stark mineralisierten Tiefenwässer eliminiert werden. Weitere ökologische Einflüsse wie Bodenauskühlung, -absenkungen und -erschütterungen werden nicht beobachtet.

Bohrtiefe, Temperatur, Fördermenge sowie die Abnehmerstruktur sind die wesentlichen Parameter, welche die Wirtschaftlichkeit geothermischer Energienutzung bestimmen. Die Nutzung der einheimischen Geothermie in der Schweiz im grösseren Massstab ist technisch realisierbar mit bekannter, im Ausland erprobter Technologie. Unter bestimmten Voraussetzungen ist die Geothermie bereits heute wirtschaftlich (Wärmegestehungskosten unter 10 Rp./kWh). Angesichts der hohen Investitionskosten und des Bohrrisikos ist ein koordiniertes Vorgehen von Gemeinden, Kantonen, Bund und dem privaten Sektor unerlässlich. Gegenwärtig sind Bestrebungen im Gange (bundesrätliche Botschaft an das Parlament, zur Behandlung an der Frühjahrssession 1987), um eine Risikogarantiebeteiligung des Bundes zu institutionalisieren.

Neben den obenerwähnten Nutzungsarten tiefliegender geothermischer Energieträger, die kurzfristig nur einen Bruchteil des schweizerischen Energieverbrauchs decken können, gibt es in unserem Land bereits gegen 1000 Heizsysteme der «untiefen Geothermie» (Erdwärmesonden mit 50 bis 100 m Bohrtiefe). Längerfristig eröffnet das Potential der trockenen Tiefenerdwärme («Hot dry rock») interessante Perspektiven; hierzu sind noch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig.

P.S. Auf schriftlichen Antrag der Eidgenössischen Energiekommission hat der Nationalrat am 11. Dezember 1986 dem Bundesbeschluss über die Finanzierung der Risikodekkung von Geothermiebohrungen mit 84 zu null Stimmen zugestimmt. Es geht um einen Verpflichtungskredit von 15 Mio Franken, beschränkt auf 10 Jahre.