

Mesure optique de vibration d'aubes libres de grande dimension, de turbines basse pression en exploitation

La tendance grandissante, visant à employer de grosses turbines à vapeur basse pression dans les centrales à cycle combiné, nécessite une extension du domaine d'utilisation comme de plus grandes variations de la vitesse de rotation, plus de cycles de démarrage ou encore des pressions de condenseur plus élevées. Les aubes de dernier étage de ces turbines sont les composants les plus sollicités mécaniquement. Le calcul des contraintes statiques et des fréquences propres, sous l'effet du champ de force centrifuge, représente depuis des années l'état des connaissances techniques dans ce domaine. Les forces d'excitation aléatoires, apparaissant à charge réduite ou sous une pression de condenseur élevée, sont aujourd'hui encore déterminées de manière expérimentale. Ceci peut être réalisé en centrale, sans perturbations notoires du fonctionnement habituel, avec la technique de mesure optique de vibration. Les mesures effectuées confirment l'aptitude des aubes libres ABB de dernier étage, ceci également pour les exigences de fonctionnement élevées dans les centrales à cycle combiné.

De sévères exigences sont posées aux turbines à vapeur en matière de disponibilité. Dans le domaine des turbines basse pression, des intervalles de révision allant jusqu'à 100 000 heures sont exigés. Ceci est particulièrement significatif pour l'aubage rotorique qui, en raison des dimensions nécessaires, est fortement sollicité mécaniquement [1].

ABB utilise, depuis plus de 30 ans déjà, des aubes mobiles libres (non-couplées) dans le dernier étage basse pression **1**. Il s'agit en règle générale de pièces de forge de précision en acier à 12 % de chrome, dans lesquelles est fraisée une géométrie en forme de sapin servant de fixation dans le rotor.

Une conception mécanique extrêmement rigoureuse est nécessaire en consi-

dération des contraintes statiques et dynamiques, afin de pouvoir garantir un fonctionnement sûr pour chacun des points de charge et pour toutes les conditions d'exploitation possibles.

Les procédés de calculs actuels permettent de déterminer la sollicitation statique dans le champ de force centrifuge, en tenant compte de l'influence des for-

ces de la vapeur, avec une précision satisfaisante également dans les domaines complexes de l'attache du pied de l'aube.

Lors de la conception dynamique, il est impératif d'éviter toute résonance de l'aube pour ses premières fréquences propres, les résonances d'ordre inférieur possédant généralement de grandes amplitudes.

Sur ce point, la conception d'aubes libres présente un avantage considérable en comparaison de l'aube conçue avec un couplage, dans la mesure où le calcul des fréquences propres est considérablement facilité par la simplicité des conditions aux limites. Les seules conditions de contacts à prendre en considération se situent au niveau de la fixation du pied et jouent un rôle négligeable pour une aube de grande dimension.

Même si l'aube bénéficie d'une conception dite « libre de résonance », il est possible que des contraintes dynamiques non négligeables apparaissent pour certains points de fonctionnement, comme par exemple pour:

- des traversées de résonance: de grandes amplitudes sont inévitables lors des démarrages et arrêts de la turbine.
- des pressions de condenseur élevées: les forces d'excitation aléatoires sont amplifiées en raison de l'augmentation de la densité de la vapeur.
- de faibles débits volumique: sous ces conditions il est possible d'obtenir un angle d'attaque de l'écoulement défavorable voire un décollement de ce dernier avec pour conséquence une augmentation des forces d'excitation aléatoires.
- d'importants débits volumiques: apparition possible du phénomène de flottement potentiel pour des aubes de faible rigidité. Les aubes vibrent alors le plus souvent d'une manière amplifiée dans leur fréquence fondamentale.
- un fonctionnement en survitesse respectivement en sous-vitesse: un nombre accru de possibilités de résonance sont attendues, cas typique des réseaux électriques faibles (instables).

Ces points de fonctionnement ont gagné en importance dans les années passées. En comparaison avec les centrales à vapeur conventionnelles d'autrefois, on observe un accroissement du nombre de démarrage et d'arrêts pour les centrales

Edwin Krämer
Eric Plan

ABB Production d'énergie SA



Aube libre de dernier étage de la partie basse pression d'une grosse turbine à vapeur. De telles aubes peuvent mesurer jusqu'à 1200 mm.

Système de mesure optique de vibration d'aubes

Déjà dans les années 70, ABB a commencé à développer un système de mesure optique de vibration d'aubes (OSS) [2]. Ce système a été continuellement amélioré au cours de ses diverses utilisations [3].

Les avantages de la technique de mesure optique de vibration d'aube sont les suivants:

- aucune fixation d'objets sur les éléments en rotation
- enregistrement de toutes les aubes d'un étage
- sensibilité élevée en comparaison du système à capteurs électromagnétiques

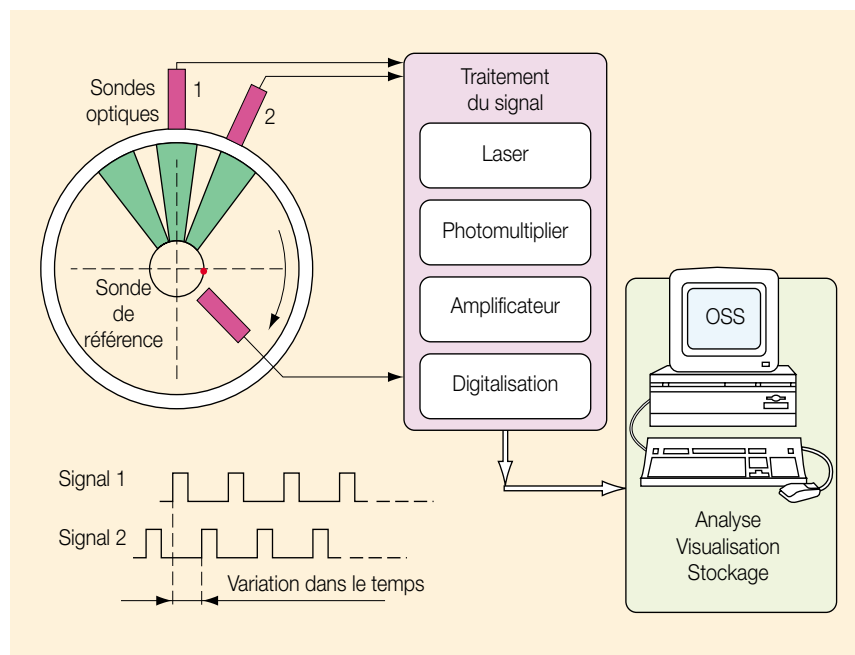
Le principe du système OSS repose sur la mesure de la différence de temps que nécessite la pointe d'une aube vibrant, pour parcourir un angle défini dans la direction circonférentielle, avec celui nécessité par la pointe d'une aube ne vibrant pas. Cette mesure est effectuée à l'aide de deux sondes optiques montées sur le bâti dans le plan des aubes mobiles. Ces sondes envoient un rayon laser sur la pointe des aubes. Le faisceau lumineux réfléchi par la pointe de l'aube est capté par les sondes et dirigé vers un appareil récepteur (photo-

tomultiplier) via fibres optiques [2]. La différence de temps entre les impulsions de lumière réfléchies est une mesure pour la vibration de l'aube. L'identification des signaux pour chacune des aubes est possible grâce à la mesure de la vitesse de rotation et de la génération d'un signal de référence par une sonde supplémentaire. Les différences de temps mesurées sont enregistrées, analysées et représentées à l'aide d'un ordinateur. De cette manière, il est possible d'une part de surveiller en temps réel la mesure et, d'autre part, de procéder par la suite à une analyse plus détaillée en laboratoire.

Objet de la mesure

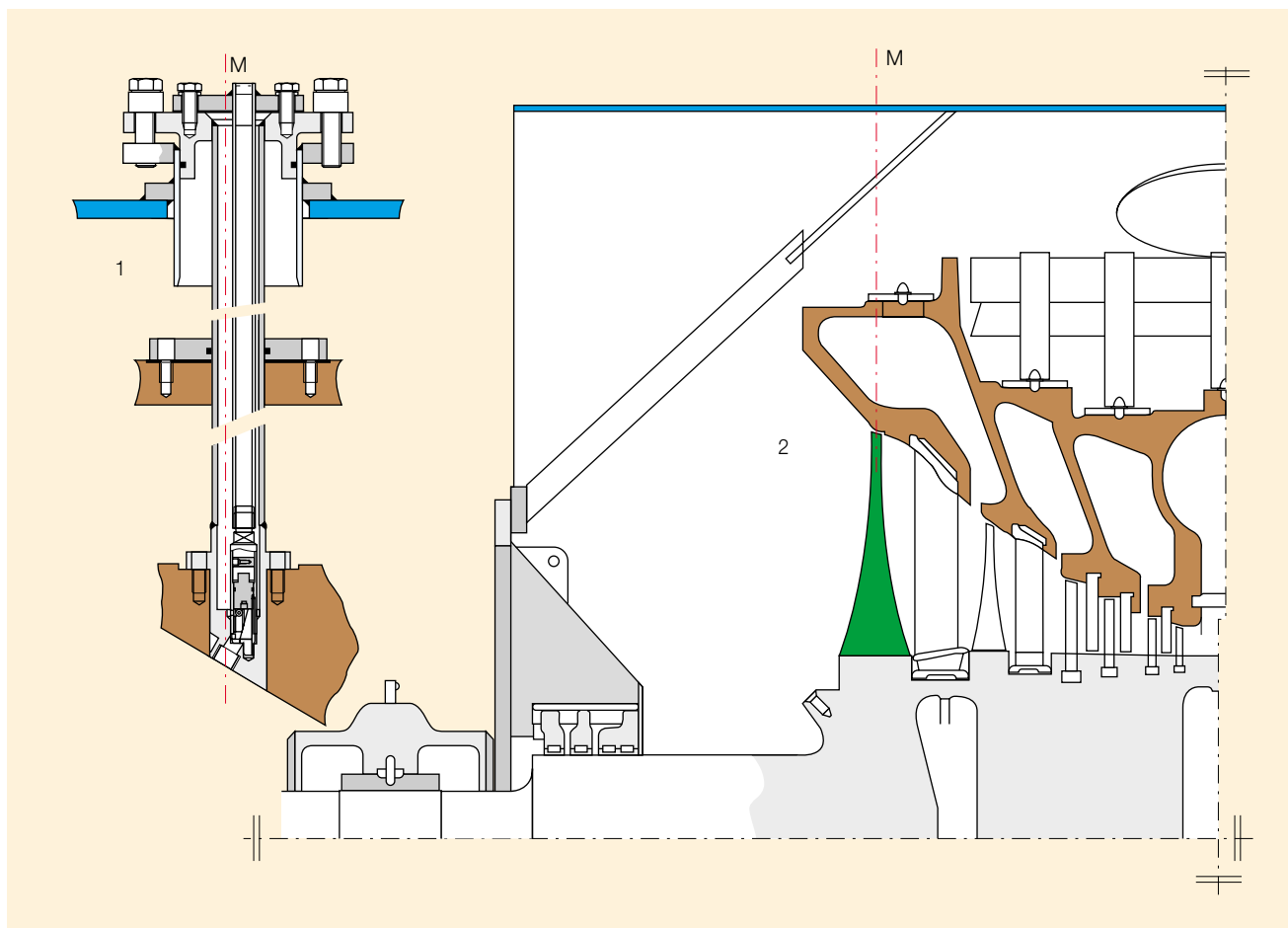
Les mesures optiques de vibrations d'aubes décrites ci-après ont été effectuées dans une centrale à cycle combiné aux Etats-Unis. La turbine à vapeur est constituée d'un corps combiné haute pression-moyenne pression monoflux ainsi que d'un corps basse pression à double flux du type ND34 [3]. La puissance nominale de la turbine est de 134 MW. La longueur des aubes de dernier étage est d'environ 880 mm. Après le dernier étage la vapeur est conduite vers le bas en direction du condenseur. Le refroidissement de l'eau

Principe de fonctionnement du système optique de mesure de vibration d'aube OSS.



à cycle combiné. Les débits volumiques et les pressions de condenseur de la turbine basse pression sont, pour les installations avec tour de refroidissement sèche ou avec un couplage de chaleur, fortement dépendants des températures du milieu environnant.

Une meilleure compréhension du comportement vibratoire des aubes rotoriques de dernier étage, ainsi qu'une amélioration des programmes de calcul nécessite de réaliser des mesures dans des installations de grandes dimensions.



Vue méridienne de la moitié d'une turbine basse pression double flux, dans laquelle a été menée une mesure de vibration des aubes.

3

1 Sonde optique, support inclu

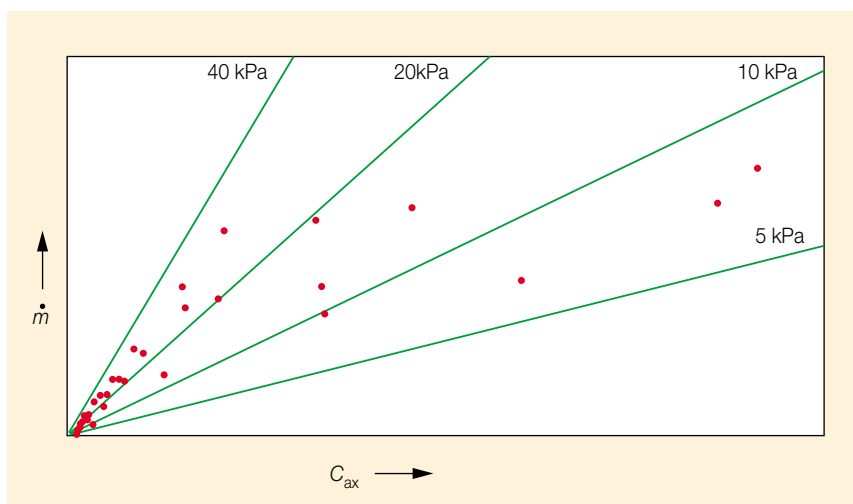
2 Vue méridienne de la moitié d'une turbine basse pression

M Plan de mesure

Points de fonctionnement mesurés pour la turbine basse pression présentée en 3.

4

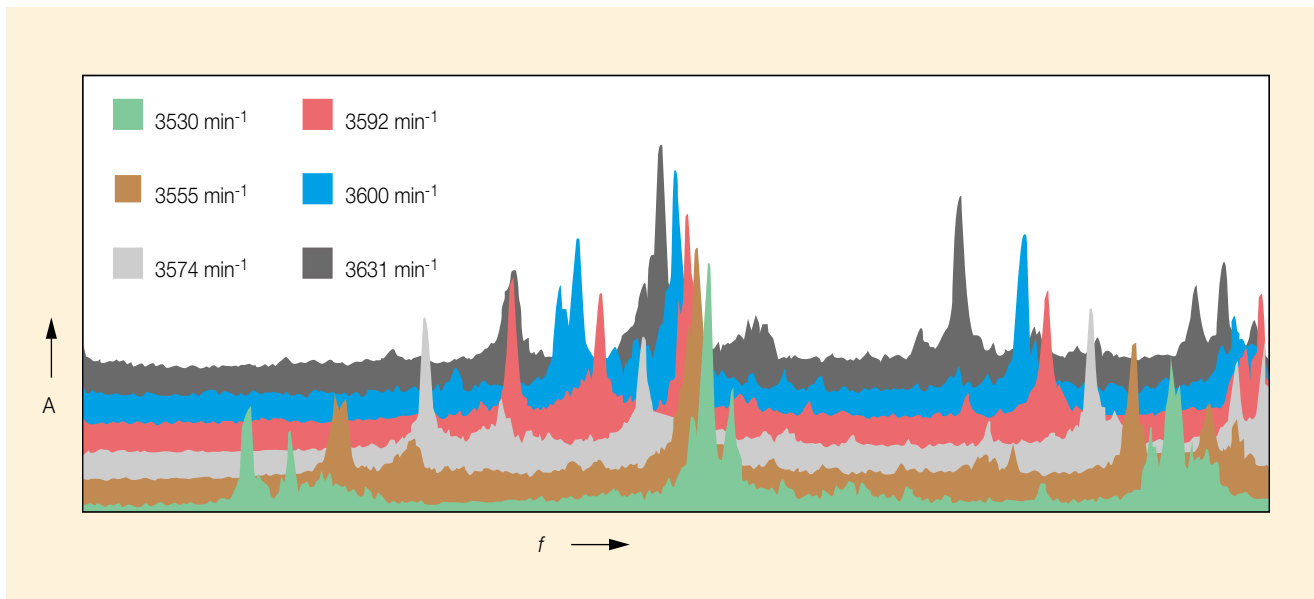
\dot{m} Débit massique
 C_{ax} Vitesse axiale à la sortie
 Vert Pression du condenseur



du cycle est assuré par des tours de refroidissement humide. Pour la campagne de mesure, la turbine à vapeur a été exploitée à différents points de fonctionnement, principalement dans le domaine de charge partielle. Le débit volumique ainsi que la densité de la vapeur à la sortie de l'aubage sont déterminants pour la sollicitation des aubes. Pour cette raison, les points de mesure sont représentés dans le domaine \dot{m}/C_{ax} .

Fréquences propres de l'aube en fonctionnement

Comme nous l'avons déjà mentionné, les aubes rotoriques de dernier étage sont conçues « libre de résonance » en ce qui concerne leur formes propres inférieures.



Spectre de fréquence d'une aube de dernier étage mesuré pour des valeurs de la vitesse de rotation légèrement différentes

5

A Amplitude f Fréquence

Jusqu'à présent, lors de la première exécution d'un nouvel aubage, les fréquences propres de quelques aubes étaient confirmées expérimentalement dans le tunnel d'accélération à l'aide de jauges de contraintes et d'une transmission des signaux par télémétrie. Parallèlement, une fonction de transfert en était déduite pour la mesure des fréquences propres sur le stand d'essai à l'arrêt, fonction obligatoire pour chacune des aubes libres. Ce procédé est utilisé depuis des années, les fréquences naturelles des aubes devant se trouver en dehors des domaines interdits ainsi définis.

Dans l'éventualité d'une exploitation de ces réserves, par exemple pour une augmentation du domaine de vitesse de rotation admissible, il est alors possible de mesurer directement les fréquences de chacune des aubes de l'étage alors que la machine est en exploitation. De plus, la détermination de la fonction de transfert pour les mesures de fréquences sur le banc d'essai à l'arrêt est améliorée par la mesure effectuée pendant l'exploitation, de sorte que les domaines de sécurité peuvent être déterminés avec une plus grande fiabilité.

Les fréquences propres de l'aube sont reconnaissables sous formes de pics dans le domaine fréquentiel après que les

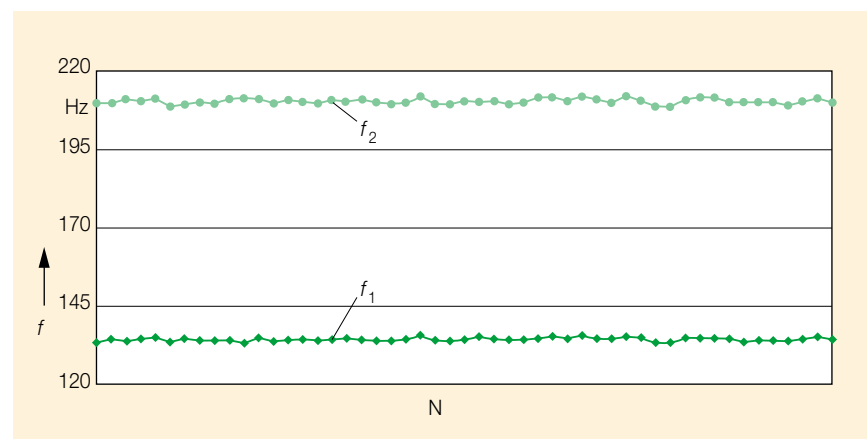
signaux de temps générés par la mesure de vibrations aient été soumis à une transformation de Fourier. Toutes les fréquences propres sont «repliées» dans un domaine allant jusqu'à la moitié de la valeur de la vitesse de rotation, ceci en raison du phénomène de sous-échantillonnage provoqué par les deux sondes. Un «dépliage» de ce spectre est théoriquement possible sur la base de considérations générales et de la connaissance approximative de la

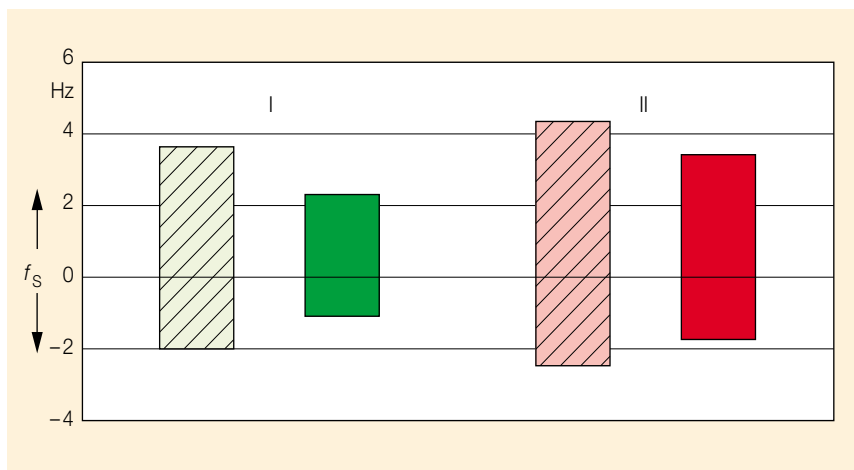
position des fréquences propres. L'analyse des signaux pour de légères variations de la vitesse de rotation a fait ses preuves lorsque les pics sont très proches les uns des autres dans les spectres «replié» ou que les forces d'excitations sont trop faibles pour générer des signaux se détachant distinctement du bruit de fond. Le nombre de «pliages» différent pour chacune des fréquences propres influe sur la position de ces dernières dans le

Position des deux premières fréquences propres de l'aube à vitesse de rotation nominale

6

f Fréquence N Fixation de l'aube





Dispersion maximale des fréquences propres des aubes sur le banc d'essai à l'arrêt et en fonctionnement

7

f_s Dispersion de fréquence maximale
I, II 1. et 2. fréquence propre

Hachuré Banc d'essai à l'arrêt
Vert, rouge Fonctionnement

spectre de fréquence «plié» de manière fort distincte, ce qui facilite l'identification des pics 5.

En suivant ce procédé, il a été possible d'identifier sans équivoque les 5 premières

fréquences propres de chaque aube. La distribution des deux premières fréquences naturelles est représentée dans l'illustration 6.

La comparaison des valeurs ainsi obtenues,

avec celles mesurées sur le banc d'essai à l'arrêt, montre que la dispersion des fréquences propres des aubes à vitesse de rotation nominale est sensiblement inférieure 7. Cela signifie que la dispersion mesurée à l'arrêt est réduite par la force centrifuge apparaissant lors de la rotation. Celle mesurée à l'arrêt s'explique principalement par la variation des conditions d'encastrement dans le stand d'essai en raison de la précision d'usinage des pièces. Dans tous les cas, les grandeurs ici considérées sont suffisamment petites pour être entièrement comprises dans les domaines de sécurité actuels.

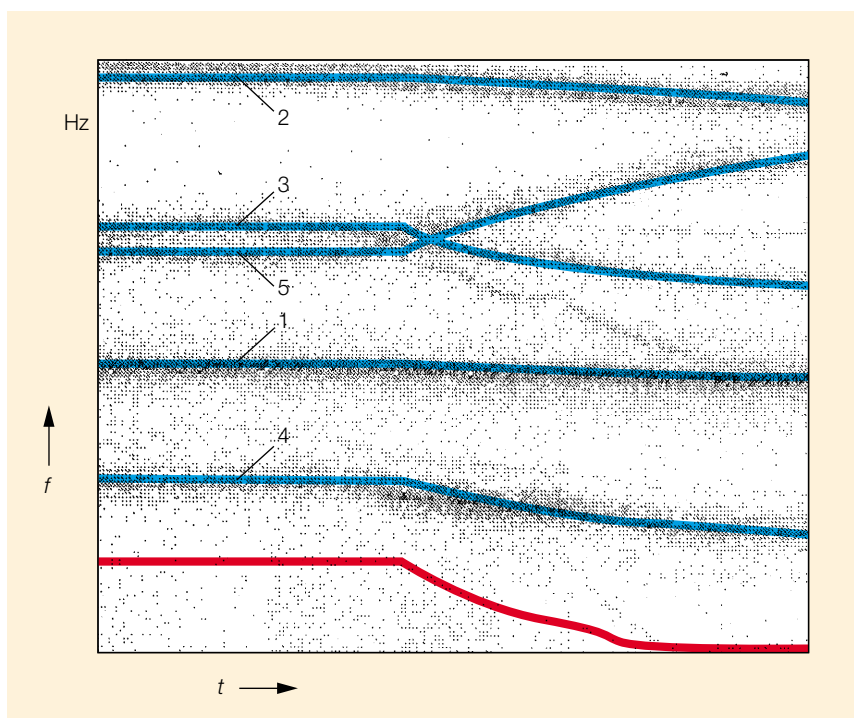
La planche 8 illustre parfaitement la qualité de la technique de mesure optique. Le phénomène de ventilation apparaît dans le domaine du dernier étage pour de faibles débits volumiques, entraînant une augmentation de la température des aubes. Les variations des fréquences propres de l'aube, dues à la dépendance du module d'élasticité en fonction de la température, sont facilement reconnaissables. Dans la mesure ici présentée, la résolution des fréquences est estimée à 0.1 Hz.

Dépendance mesurée des fréquences propres des aubes en fonction de la charge

8

f Fréquence («pliée»)
 t Temps

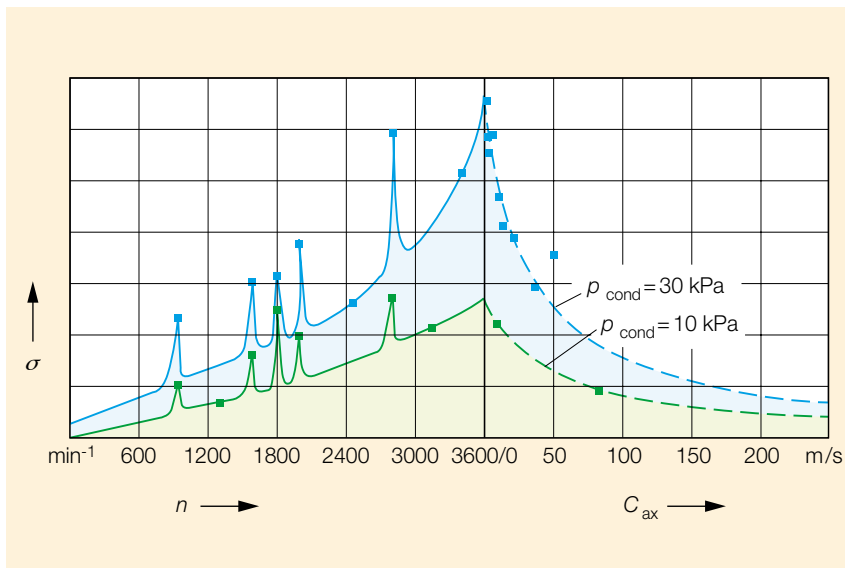
1 ... 5 1ère jusqu'à la 5ème fréquence propre
Rouge Puissance donnée par le générateur



Vibrations des aubes lors de traversées de résonances

Les aubes libres présentent une quantité d'avantages en comparaison des aubes couplées, à condition toutefois que la construction complète ne provoque pas un renforcement de l'excitation de certaines fréquences propres. Comme les aubes libres ne comportent pas d'importants mécanismes d'amortissement, il est possible que des forces d'excitation déjà de l'ordre d'un pour cent conduisent à des amplitudes de vibrations importantes lors des traversées de résonance.

La contrainte dynamique maximale dans le profil de l'aube a été obtenue par la superposition des participations des cinq premières fréquences propres lors de l'analyse des mesures pour différents processus de démarrage, respectivement d'arrêt de la machine. Il est apparu que la contrainte dynamique maximale, lors des passages à travers les résonances, atteint une valeur seulement 2 à 3 fois plus grande que le bruit de fond. 9 (partie de gauche). L'accélération respectivement la décélération de la turbine correspond aux gradients de vitesse habituels.



Sollicitations dynamiques mesurées sur une aube de dernier étage

σ	Sollicitation dynamique	C_{ax}	Vitesse axiale à la sortie
n	Vitesse de rotation	p_{cond}	Pression du condenseur

Vibrations des aubes dues à une contrepression élevée

Les domaines d'utilisation de pratique toutes les aubes de grandes dimensions, quelles soient libres ou couplées, sont limités dans leurs parties supérieures en regard de la valeur de pression du condenseur. Ceci s'explique par l'apparition de forces d'excitation renforcées en raison de la densité élevée de la vapeur et des débits volumiques faibles qui en découlent fréquemment, ceci avec la manifestation possible du phénomène de ventilation au niveau de l'aube de dernier étage.

De nombreux points de mesure ont été étudiés à puissance partielle avec des pressions de condenseur élevées, dans le but de définir clairement le plus grand domaine d'utilisation de ce type de turbine basse pression.

Les résultats de la mesure peuvent être résumé de la sorte 9 (partie de droite):

- les vibrations des aubes sont négligeables en présence d'un vide de bonne qualité ($p_{cond} < 20$ kPa), ceci autant pour de grandes que pour de faibles valeurs de vitesse axiale de la vapeur à la sortie de la turbine.
- une vitesse axiale minimale doit être assurée pour le fonctionnement continu sous un vide moyen (20 kPa <

$p_{cond} < 30$ kPa). Cela revient à dire que si l'aube terminale est soumise à un écoulement régulier, alors le fonctionnement de la turbine est possible sans problème avec ces valeurs élevées de pression de condenseur.

- un fonctionnement prolongé est déconseillé pour un mauvais vide ($p_{cond} > 30$ kPa). Les contraintes maximales obtenues expérimentalement atteignent des valeurs qui, bien qu'elles soient toujours largement en deçà de la limite de résistance à la fatigue du matériau de l'aube, sont toutefois à éviter pour des conditions limites défavorables, du point de vue de la mécanique de la rupture.

L'objectif – une disponibilité élevée

De nombreuses mesures, pour différents points de fonctionnement, sous diverses valeurs de pression de condenseur et lors des démarrages et arrêts de la machine, ont confirmé l'aptitude, sans restriction aucune, de la validité de la conception des aubes libres pour les exigences accrues des centrales à cycle combiné.

Aussi longtemps qu'une valeur minimale de la vitesse axiale de la vapeur n'est

pas enfreinte, assurant ainsi un écoulement favorable de l'aube de dernier étage, les aubes peuvent être utilisées sans problèmes avec un vide pouvant atteindre 30 kPa. En raison de la conception de l'aube apportant une rigidité élevée, il est possible d'opérer avec des densités de débit massique supérieures à 20 kg/sm².

L'avantage essentiel pour l'exploitant repose dans l'accroissement de la disponibilité de son installation en relation avec sa très grande flexibilité d'utilisation.

Bibliographie

- [1] Gyarmathy, G., Schlachter, W.: On the design limits of steam turbine last stages. Internat. Conf. on Technology of Turbine Plant Operating with Wet Steam, 1988.
- [2] Roth, H.: Vibration Measurements on Turbomachine Rotor Blades with Optical Probes. Joint Fluids Engineering Gas Turbine Conference, New Orleans, 1980.
- [3] Bloemers, D., Heinen M.; Krämer E., Wüthrich C.: Optische Überwachung von Turbinenschaufelschwingungen im Betrieb. SIRM-Tagung 1995, Kaiserslautern.

Adresse des auteurs

Edwin Krämer
Eric Plan
ABB Kraftwerke AG
CH-5401 Baden/Schweiz
Telefax: +41 (0) 56 205 5605
E-Mail:
edwin.kraemer@chkra.mail.abb.com