Schwingungen an hydraulischen Maschinen : frühzeitliche Erkennung von Schäden durch elektronische Überwachung = Comment empêcher les turbines de vibrer?

Autor(en): **Waldschmidt, Helmut**

Objekttyp: **Article**

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

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

Heft 1-2

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940613

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

Schwingungen an hydraulischen Maschinen

Frühzeitige Erkennung von Schäden durch elektronische Überwachung

Helmut Waldschmidt

Das friedliche Summen der Maschinen in Wasserkraftwerken, aus dem der Laie auf die problemlose Erzeugung von Strom aus Wasserkraft zu schliessen pflegt, kann täuschen: Selbst wenn Turbinen und Generatoren ein stattliches Alter von fünfzig, sechzig oder mehr Jahren zu erreichen pflegen, so treten möglicherwise auch in diesen tonnenschweren Maschinen unerwartet stärkere Schwingungen (etwa durch Abnützung) auf, die das Material bis zur Belastungsgrenze beanspruchen und schliesslich zu Schäden führen können. Um über die Verhütung derartiger Schäden und ihre Früherkennung mit Hilfe geeigneter Messverfahren Erfahrungen auszutauschen, trafen sich am 18. September 1986 gegen 200 Spezialisten aus der Schweiz und den umliegenden Ländern an einer Fachtagung in Interlaken, zu welcher der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband eingeladen hatte.

Wenn bei gewissen Tönen ein Glas im Schrank klirrt, wenn bei einer bestimmten Geschwindigkeit des Autos plötzlich des Lenkrad vibriert, dann hat das ein und denselben Grund: Sowohl das Glas als auch das Lenksystem des Autos werden in ihrer *Eigenfrequenz* erregt; sie geraten in *Resonanz* und damit in kräftige Schwingungen. Im Gegensatz zu Musikinstrumenten, wo je nachdem Saiten (Streich- und Zupfinstrumente, Klavier), Luftsäulen (Blasinstrumente, Orgel) oder feste Körper (Xylophon usw.) gewollt in ihrer Eigenfrequenz (und deren Vielfachen) erregt werden, sind derartige Erscheinungen sowohl bei Maschinen als auch bei Bauwerken grundsätzlich unerwünscht.

Vielfältige Ursachen

Unerwünschte Schwingungen müssen es auch gewesen sein, welche die Zerstörung der legendären Stadtmauern von Jericho verursachten: Laut Bibel wurden sie bekanntlich allein durch Posaunenklang zum Einsturz gebracht – ein Ereignis, das, wenn es tatsächlich stattgefunden hat, nach Meinung heutiger Techniker ebenfalls auf Resonanzerscheinungen zurückzuführen war. Schliesslich: Die Gefahr von Resonanzen mit ihren gefährlichen Schwingungsaufschaukelungen ist auch der Grund, warum Brücken – zumindest ältere – vom Militär nicht im Gleichschritt überquert werden dürfen.

An der Interlakener Tagung brachte ein Referent, Repräsentant eines bedeutenden schweizerischen Turbinenherstellers, die Problematik der Schwingungen bei Maschinen im allgemeinen und Wasserkraftmaschinen im besonderen auf den kurzen, in typisch nüchternem Ingenieurdeutsch formulierten Nenner: «Mechanische Schwingungen sind allgemein als Folge dynamischer Kräfte zu betrachten, die an elastischen Strukturen angreifen. Sie sind deshalb an sich nichts Schlimmes. In den meisten Fällen sind sie aber unerwünscht, oft störend und hie und da auch schädlich. Sie sollen auf ein zulässiges Niveau beschränkt bleiben. Deren Analyse ist eine wichtige Voraussetzung dazu.»

Nun versuchen zwar schon die Konstrukteure, unerwünschte Schwingungen erst gar nicht aufkommen zu las-

Bild 1. Francis-Turbine für die Wasserkraftanlage «Song Loulou» in Kamerun (Enelcam) auf der Karusselldrehbank, auf der sehr genaues Bearbeiten möglich ist.
(Bild: Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A.)

Notre approvisionnement énergétique en dépend

Comment empêcher les turbines de vibrer?

Helmut Waldschmidt

Le paisible ronron des machines d'une centrale hydraulique est parfois trompeur. Turbines et alternateurs ne sont pas toujours à l'abri d'un mal qui, s'il n'est pas détecté à temps, peut se révéler particulièrement nuisible: l'excès de vibrations. Plus de 200 spécialistes internationaux viennent de se réunir le 18 septembre 1986 à Interlaken pour faire le point. Leur recommandation: améliorer le dépistage électronique.

Des verres s'entrechoquent dans l'armoire sous l'effet de sons particuliers; le volant se met à vibrer dès que l'auto atteint une certaine vitesse. Deux phénomènes qui résultent d'une même cause: l'excitation de la fréquence propre, du verre ou de la direction du véhicule. Ils sont soumis à une résonance, c'est-à-dire à de fortes vibrations.

Contrairement aux instruments de musique à cordes ou à vent, dont il faut accroître la fréquence propre pour en tirer des sons, ces effets sont indésirables dès lors qu'il s'agit de centrales en général et de machines hydrauliques en particulier.

De Jéricho aux barrages alpestres

La Bible nous apprend que les célèbres murailles de Jéricho se sont écroulées sous l'effet du son des trompettes. Cet événement, s'il s'est vraiment produit, serait donc imputable à des phénomènes de résonance. Et c'est à cause du risque d'accroissement des vibrations que les soldats ont l'habitude de ne pas traverser les vieux ponts au pas cadencé.

Pour ce qui touche aux machines hydrauliques, dont on sait l'importance pour l'approvisionnement énergétique de la Suisse, le problème se pose dans les termes suivants: les vibrations mécaniques doivent être considérées comme une conséquence de forces dynamiques qui s'exercent sur des structures élastiques. Sans être véritablement dangereuses en tant que telles, ces vibrations peuvent néanmoins présenter certains risques à la longue. Il convient de ne pas les laisser dépasser un certain niveau.

Les constructeurs s'efforcent de prévenir leur apparition au stade de la fabrication des machines. Il s'agit notamment d'éviter que les fréquences d'excitation (par exemple le

Figure 1. Une turbine Francis destinée à la centrale hydraulique «Song Loulou», au Cameroun. Le tour vertical qui la supporte permet un usinage très précis. (Photo: Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A.)

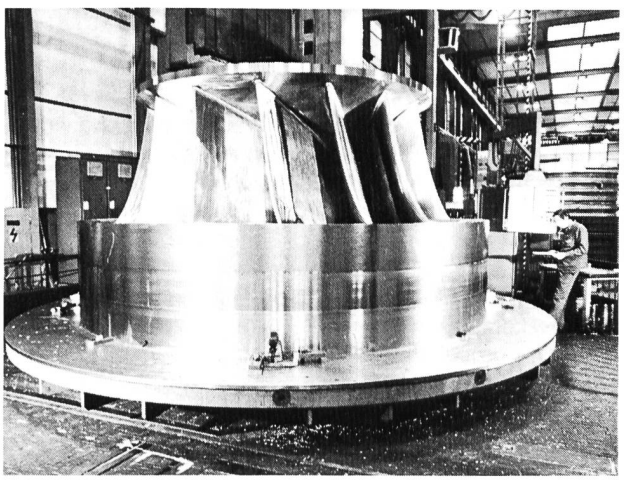

Bild 2. Montage des Leitapparates zur Francis-Turbine für «Song Loulou» in Kamerun (Enelcam) in den Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A.

sen, indem sie es vermeiden, Anregungsfrequenzen (z.B. die Drehzahl von Turbine/Generator oder das Vielfache davon) mit Eigenfrequenzen von Bauteilen zusammenfallen zu lassen. Gleichzeitig achten sie darauf, die dynamischen, Schwingungen auslösenden Kräfte so klein als möglich zu halten. Indes: Eine Turbine mitsamt Generator, mitsamt dem durchfliessenden – strömungstechnisch wiederum eigenen Gesetzen gehorchenden – Wasser ist ein derart komplexes Gebilde, dass sein dynamisches Verhalten genaueren Berechnungen erst in jüngster Zeit durch den Einsatz besonders leistungsfähiger Computer einigermassen zugänglich wurde.

Praktisch immer Prototypen

Da tun sich – beispielsweise – die Konstrukteure von Automotoren etwas leichter: Auch wenn sie es angesichts der Umwandlung der Hin- und Herbewegung der Kolben in eine Drehbewegung schwingungsmässig im Prinzip schwerer haben, so ist der Automotor doch ein *Massenprodukt,* an dem sich derartige Probleme bis zur Serienreife an (fast) beliebig vielen Exemplaren testen lassen. Anders Turbinen und Generatoren von Wasserkraftwerken: Sie sind allemal *Prototypen.* Das hängt nicht nur mit den geringeren Stückzahlen und dem ungleich höheren Preis zusammen, sondern auch damit, dass sich bei einer Turbinen-/Generatoreinheit für ihr dynamisches Verhalten selbst bei einigermassen gleicher Fallhöhe und Menge des verarbeiteten Wassers nur bedingt Erfahrungen früherer Anlagen anwenden lassen: Schwingungstechnisch bildet die Turbine mit ihrem Generator aufgrund der riesigen sich drehenden Massen, zusammen mit *Fundament* und *Bauwerk,* wiederum ein (schwingungsfähiges) System, das als Ganzes in Resonanz geraten kann.
Bei Maschinen, die bereits seit kürzerer oder längerer Zeit in Betrieb sind, stehen indessen Schwingungen im Vordergrund, die unerwartete Änderungen zeigen. Solche Erscheinungen stellen meist ein *Alarmzeichen* dar, da sie auf Veränderungen im System hinweisen. Weil solche verstärkten Schwingungen die verschiedensten Ursachen haben können, ist hier die frühzeitige Erkennung als Prophylaxe zur Vermeidung grösserer Schäden besonders wichtig; ebenso eine *Analyse,* die Rückschlüsse auf die Herkunft der Schwingungen erlaubt. Denn der Ausfall oder gar die Havarie einer Maschinengruppe bedeutet nicht nur hohe Reparaturkosten; dazugerechnet werden muss immer auch der entstehende Produktionsausfall.

Hilfreiche Elektronik

Waren es früher hauptsächlich die Ohren erfahrener Maschinisten, auf die man sich bei der Früherkennung von Schäden bei Turbinen und Generatoren verlassen musste, so sind es heute zunehmend direkt an die Maschine gebaute *Sensoren* bzw. *Messwertaufnehmer,* welche auch feinste Abweichungen der Lagerschwingung, abnormale Auslenkung der Welle oder abweichende Werte ihres axialen Spiels registrieren und – oft über Kilometer hinweg – an eine zentrale elektronische Auswertungseinheit weitergeben. Übersteigen die Messwerte ein bestimmtes (vorher festgelegtes) Mass, wird automatisch ein Alarm ausgelöst oder – bei allzu hohen Werten – die Maschine abgestellt.
Die Tendenz zur Elektronik auch auf der mechanischen Seite im Kraftwerksbereich hat im wesentlichen zwei Gründe: Sensoren reagieren nachweislich empfindlicher und schneller auf Veränderungen am Verhalten der Ma-

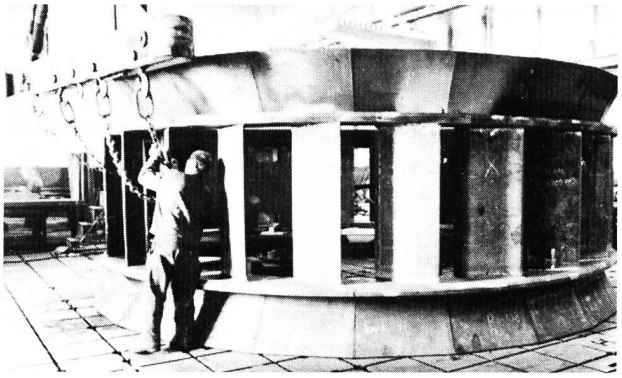

Figure 2. Montage du redresseur pour la turbine Francis destinée à «Song Loulou» (Cameroun), aux Ateliers de Constructios Mécaniques de Vevey.

nombre de tours par minute de la turbine ou son multiple) ne coincident avec les fréquences propres de certaines pièces de la machine. Simultanément, on réduit tant que possible les forces dynamiques génératrices de vibrations.
Ces mesures préventives ne suffisent pas toujours. La turbine et l'alternateur, ainsi que l'eau utilisée, obéissent à leurs propres lois. Le comportement dynamique de cet ensemble n'a pu être calculé avec une certaine précision que tout récemment grâce à des ordinateurs performants.

Chaque turbine un «prototype»

Ce problème de vibrations se retrouve partout. Les constructeurs automobiles le rencontrent au niveau du va-et-vient des pistons. Or la voiture est un produit de série. Le problème peut être résolu par d'innombrables tests, jusqu'à la mise au point d'un moteur standard.
Tel n'est pas le cas des machines hydrauliques. Chaque turbine et chaque alternateur sont en fait des «prototypes». Ils doivent être adaptés aux conditions particulières des centrales électriques auxquelles ils sont destinés. Et ces conditions ne sont jamais identiques d'une installation à l'autre. Hauteur de chute, quantités d'eau ou fluctuations saisonnières ne cessent de changer.
Compte tenu des immenses masses en mouvement, la turbine et son alternateur constituent, en interaction avec les fondations et la construction de l'ouvrage, un autre système vibrant qui peut se trouver en résonance. Les machines en activité présentent surtout des vibrations provoquées par des modifications inattendues. A ce titre, elles sont d'utiles signaux d'alarme.
Cet accroissement des vibrations peut avoir plusieurs causes. D'où la nécessité d'une détection rapide pour éviter l'apparition de dommages plus importants. A commencer par une analyse destinée à révéler l'origine précise du phénomène. Et il faut agir vite. Toute interruption ou avarie d'un groupe de machines nécessite souvent des réparations coûteuses, auxquelles s'ajoutent les chutes de production d'énergie équivalentes.

Détecteurs électroniques

Autrefois, la détection précoce des vibrations anormales reposait sur l'oreille aiguisée des machinistes expérimentés. Aujourd'hui, les machines sont directement équipées de «tâteurs» – de capteurs de mesure – qui enregistrent les plus infimes changements de taux vibratoires, et les communiquent à une unité de dépouillement de données, située parfois à des kilomètres de distance. Dès qu'un certain seuil de changement est dépassé, une alarme est déclenchée, voire la machine arrêtée.
Cette intrusion de l'électronique dans la partie mécanique des centrales a deux raisons principales: d'une part, les

schine, als selbst das geschulteste – dazu alternde – Ohr des erfahrenen Maschinisten es je könnte. Zudem werden je länger je häufiger auch grössere Kraftwerkszentralen *unbemannt* betrieben, so dass hier der frühzeitigen Erkennung einer Störung besondere Bedeutung zukommt.

Als «Versicherungsprämie» zu werten

Der Einbau elektronischer Systeme zur Schwingungsüberwachung ist notgedrungen nicht eben billig. Angesichts der Millionenwerte, die in Wasserkraftwerken buchstäblich rotieren, muss der Preis solcher Überwachungseinrichtungen daher sozusagen als «Versicherungsprämie» betrachtet werden. Dass der (finanzielle) Aufwand sich dabei aber durchaus lohnt, zeigt der wachsende Markt für Einrichtungen dieser Art.

tâteurs réagissent avec infiniment plus de sensibilité que l'oreille humaine la plus exercée. D'autre part, le nombre des centrales électriques automatisées – et commandées à distance – ne cesse d'augmenter.
Ces systèmes électroniques de surveillance des vibrations sont coûteux. Mais compte tenu des sommes engagées dans la production énergétique, ils peuvent être en quelque sorte considérés comme des «primes d'assurance» dont le rôle dans notre approvisionnement énergétique est loin d'être négligeable.

Adresse des Verfassers: *Helmut Waldschmidt,* Journalist, Rebstrasse 5, Postfach, 8156 Oberhasli.

Schwingungen in Wasserkraftzentralen

Vibrations de machines dans des usines hydro-électriques

Zusammenfassungen der an der Fachtagung vom 18. September 1986 in Interlaken gehaltenen Vorträge

Résumés des conférences lors du symposium du 18 septembre 1986 à Interlaken

Schwingungsanalysen bei hydraulischen Maschinen – Grundlagen und Nebenwirkungen

Es wird über die Analyse mechanischer Schwingungen bei hydraulischen Maschinen berichtet. Neben der Darstellung einiger Grundlagen der Maschinendynamik wird Bezug auf aktuelle Probleme und Entwicklungen bei der rechnerischen und experimentellen Schwingungsanalyse genommen. Wegen ihrer Bedeutung stehen die Rotorschwingungen im Vordergrund. Einige Hinweise zur Schwingungsüberwachung und Schwingungsbeurteilung ergänzen die Ausführungen.

Verfasser: *Richard Angehrn,* dipl. Ing. ETH, Leiter Maschinendynamik, Sulzer-Escher Wyss AG, Postfach, CH-8023 Zürich.

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.

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

Schwingungsanregende Strömungsvorgänge in hydraulischen Maschinen

Mehrere sehr verschiedenartige Strömungsmechanismen verursachen Schwingungen in Wasserkraftmaschinen. Als wichtigste sind die folgenden Störungen zu unterscheiden: tieffrequente Pulsationen bei Francisturbinen (besonders bei Teillast), schaufelfrequente Schwingungen, Plattenschwingungen infolge Von Kármánscher Wirbelstrassen, breitbandige hochfrequente Schwingungen infolge Strömungsturbulenz (bei Betriebsübergängen) und infolge von Kavitation.

Verfasser: *Peter Dörfler,* dipl. Ing. Dr. techn., Projektierung, Sulzer-Escher Wyss AG, Postfach, CH-8023 Zürich.

Ursachen von Schwingungen bei Hochdruckanlagen – Versuch einer Bilanz

Dieser Beitrag betont die Wichtigkeit einer guten Zusammenarbeit zwischen Maschinenbauer, Bauherr und Betreiber, um Schwingungen zu vermeiden. Die Schwingungsursachen sind vielfältig und sind für die verschiedensten Etappen: Projekt, Fabrikation, Montage und Betrieb, beschrieben.

Verfasser: *Albert Bezinge,* ing. SIA, Chef d'exploitation, und *Franz Schafer,* Service d'exploitation, CH-1950 Sion.

Schwingungen bei Pumpen

Mit den Erfahrungen an 3 verschiedenen Pumpentypen wird gezeigt, wie Schwingungen diverser Art verursacht werden, was sie für Folgen haben und wie sie behoben werden können. Bei nicht vermeidbaren Schwingungen wird auf die möglichen Schutzmassnahmen und Wartungspraktiken hingewiesen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit.

Verfasser: *Hans Wüest,* Ing. HTL, Projektingenieur Hydraulik, Kraftwerke Oberhasli AG, CH-3862 Innertkirchen.

Schwingungsüberwachung bei Maschinen von Laufkraftwerken

Permanente Schwingungsüberwachungsanlagen in Turbinen/Generator-Gruppen sind für die Minimierung von zusätzlichem Materialverschleiss bei ungünstigen Betriebszuständen unerlässlich. In fernbedienten oder pikettbetriebenen Kraftwerken können bei beginnender Materialschädigung diese Schutzeinrichtungen einen wesentlichen Einfluss auf die Minderung des Schadenausmasses ausüben, insbesondere wenn durch frühzeitiges Alarmieren die Materialschäden und der Produktionsausfall gering gehalten werden können.

Verfasser: *Ulrich Jampen,* El.-Ing. HTL, Bernische Kraftwerke AG, Postfach, CH-3000 Bern 25.

Vibrations dues aux tourbillons de Karman – observées sur des turbines

Les tourbillons de Karman, fréquents dans les turbines, peuvent donner lieu à des vibrations, en cas de résonance avec une fréquence propre d'un organe interne. L'article décrit plusieurs cas concrets et indique les moyens utilisés pour éliminer les vibrations.

Auteur: *André Chaubert,* ing. dipl. EPFL, conseiller technique, Ateliers de construction mécaniques de Vevey SA, CH-1800 Vevey.