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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 82 (1990)

Heft: 1-2

Artikel: Höhere Generatorausnutzung : eine Chance bei der Erneuerung bestehender Wasserkraftwerkanlagen

Autor: Mez, Friedrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939775

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

konstant. Es herrschten ruhige Wetterbedingungen. Erwartungsgemäss sollte für jene Tage auch die Basis der Mauer stabil bleiben. Bild 14, untere Kurve, zeigt die Neigungsänderung an diesem Wochenende. Es handelt sich um die gleichen Rohdaten wie in Bild 10, nur sind sie wie durch die Lupe betrachtet stark vergrössert dargestellt. Dadurch werden die zweimal täglich auftretenden Erdgezeiten deutlich ersichtlich. Vergleicht man dieses Signal mit den theoretisch berechneten Erdgezeiten (Bild 14, obere Kurve), so besteht kein Zweifel mehr, dass dessen Ursache der Mond bzw. die Sonne ist. Die mit Kreuzen dargestellte theoretische Kurve schneidet die Nullinie. Diese Nullinie wäre die Position, wenn Mond und Sonne fehlen würden. Die Kurve mit den gemessenen Daten wurde der Übersichtlichkeit halber nach unten verschoben; sie ist nur relativ zu betrachten. Sowohl die Phase (zeitlicher Verlauf) der Auf- und-ab-Bewegungen als auch die Amplitude stimmen in erster Näherung gut mit der Theorie überein.

Schlussbetrachtung

Offenbar bewegt sich der gesamte Felsriegel, auf dem die Albigna-Staumauer steht, beim Auf- und Abstau. Interessant wäre, daraus die Elastizitätsparameter und Mächtigkeit des Granitriegels zu errechnen. Sicher wäre auch mit der erhaltenen Restneigung noch einiges zu analysieren, wie beispielsweise Hystereseeffekte infolge der Auffüllung von Hohlräumen, Luftdruckabhängigkeiten usw. Doch dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Das neue Tiltmeter erfasst die Neigungsänderung der Felsoberfläche an der Mauerbasis sehr genau. Für eine Vertiefung der Erkenntnisse und eine Quantifizierung wären parallel zueinander verlegte redundante Tiltmeter nötig. Ebenso wäre eine Zusammenführung solcher paralleler Messstrecken durch quer dazu angeordnete Tiltmeter sinnvoll, um ein zweidimensionales Bewegungsbild des Untergrundes zu erhalten.

Über die Nullpunktstabilität wurde nichts ausgesagt, denn dazu ist die Beobachtungsdauer zu kurz, und es fehlt an genügend präzisen Referenzmessungen. Ein Vergleich der Langzeitstabilität mit wissenschaftlichen Instrumenten: Im «Crustal Deformation Observatory» von Pinon Flat (USA) steht das mit Abstand stabilste Tiltmeter. Nach dreijähriger Beobachtungszeit wird über eine Nullpunktdriftrate von 0,1 μRad/Jahr berichtet [*Wyatt,* 1986]. Die Basis jenes Instrumentes ist 535 m lang. Das heisst, jenes Instrument zeigt einen Fehler in der Höhenänderung von 53,5 Mikrometer im Jahr, also rund 13mal soviel wie der gesamte Messbereich in Bild 14.

Wie dieser Test zeigt, eignet sich die neue Methode nicht nur für die Überwachung vulkanischer Aktivität zum Schutz von Menschenleben und zivilisatorischen Einrichtungen, sondern kann auch bei Talsperren eingesetzt werden.

Es wäre wünschbar, wenn weitere Anwendungen für diese Art der grossräumigen Bewegungsüberwachung geboten und damit auch von der Schweiz Schritte zur Weiterentwicklung der Präzisionsneigungsmessung beigetragen würden.

Literatur

Nunnari, G., and *Romano, R.:* Ground, Tilt Related to Volcanological Observations during the December 1985 Mt. Etna Eruption. C.N.R. Istituto Internazionale di Volcanologia, Catania, Italy.

Emter, D., Zürn, W., Mälzer, W., 1989: Underground Measurement at Tidal Sensitivity with a Long Baseline Differential Fluid Pressure Tiltmeter. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, 288, 74 p., 1989.

Emter, D., 1989: Rezente Krustenbewegungen. Studiengang Vermessungswesen Uni der Bundeswehr, Heft 39.

Horsfall, J.A.C., and *King, G.C.P.,* 1978: A new geophysical tiltmeter «Nature», 274, 675–676.

Krafft, Katia, und *Maurice,* 1986: Die Vulkane der Welt. Mondo-Verlag.

Wyatt, F.; Agnew, D.C.; Zumberge, M.A.: Recent development in long-base strainmeters and tiltmeters. EOS, Trans. AGU, *67,* p.914, 1986.

Dank

Der Verfasser dankt *Guy Peter* vom Ingenieurbüro für Bauliche Anlagen der Stadt Zürich für die Zurverfügungstellung der Albigna-Staumauer für die beschriebenen Versuche.

Zu besonderem Dank ist er Dr. *D. Emter* vom Observatorium Schiltach (BRD) verpflichtet, der ihn bei der Lösung von theoretischen Fragen unterstützte und ihn mit der neuesten Fachliteratur vertraut machte.

Adresse des Verfassers: *Edi Meier,* Geophysikalische Instrumente, Hard4, CH-8408 Winterthur.

Für das Tiltmeter wurden vom Verfasser verschiedene Patente angemeldet.

Höhere Generatorausnutzung

Eine Chance bei der Erneuerung bestehender Wasserkraftwerksanlagen

Dr. Friedrich Mez

Zusammenfassung

Durch den Einsatz von verlustarmem Elektroblech, durch die Verwendung neuer Isoliermaterialien an den Statorstäben und durch ein aufgrund zahlreicher Messungen verbessertes Engineering, insbesondere im Bereich der Maschinenkühlung, kann die Ausnutzung von Wasserkraftgeneratoren heute im Vergleich zu 1960 nennenswert gesteigert werden. Dies ermöglicht die Umrüstung bestehender Wasserkraftgeneratoren auf höhere Leistungen allein durch den Austausch entsprechender Komponenten. Eine solche Umrüstung ist besonders für Anlagen von Bedeutung, bei welchen durch Verringerung der Verluste im Wasserweg eine höhere Leistung an der Turbinenkupplung erreicht werden kann.

Einleitung

Die ausreichende Versorgung der Schweiz mit Strom aus einheimischen Kraftwerken wird im Laufe der nächsten Jahre immer problematischer, zumal im Winterhalbjahr.

Die politisch bedingten Schwierigkeiten bei der Realisierung neuer Kernkraftwerksprojekte, der weithin fehlende Konsens der Bevölkerung für den Ausbau der allerdings nur noch spärlich vorhandenen ungenutzten Wasserkräfte und die Vorstellungen über eine generelle Anhebung der Restwassermenge stehen im krassen Widerspruch zum stetig wachsenden Stromverbrauch in der Schweiz.

Die Stromerzeugung aus alternativen, erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne wird trotz erheblichen Anstrengungen von allen Seiten in absehbarer Zeit nicht einmal den Stromverbrauchszuwachs zu decken vermögen, geschweige denn den heute im Winterhalbjahr schon vorhandenen Stromfehlbetrag ausgleichen können.

Eine Stromproduktion über fossile Energieträger ist wegen der damit in jedem Fall verbundenen Erzeugung von Schadstoffen, insbesondere von CO_2, kaum vertretbar.

Es bleibt uns daher neben dem heute schon praktizierten Stromimport nur der Versuch, die einheimischen Energien rationell einzusetzen.
Unter Berücksichtigung der genannten Gesichtspunkte gewinnt die Erneuerung bestehender Wasserkraftwerksanlagen immer mehr an Bedeutung, wenn damit gleichzeitig eine höhere Ausnutzung der aus Wassermenge und Fallhöhe vorgegebenen potentiellen Energie verbunden ist.

Die Möglichkeiten im Bereich des Stahlwasserbaus und der Turbinen

Auf diesbezügliche Möglichkeiten im Bereich des Stahlwasserbaus und der Turbinen wird in internationalen Konferenzen mit unterschiedlichen Angaben hingewiesen. Deutlich zeigen sich aber Möglichkeiten zur Reduktion der bei der Strömung des Wassers entstehenden Verluste im Bereich der Einlaufbauwerke, der Rohrleitungen bei Hochdruckanlagen, der Leitschaufeln und der Turbinenauslegung. Es ist jedoch nicht am Platz, im Rahmen dieses Artikels auf mögliche Grössenordnungen einzugehen, zumal diese von Fall zu Fall zu überprüfen sind.

Die Möglichkeiten beim Generator

Bei der Erneuerung einer bestehenden Wasserkraftwerksanlage wird der Betreiber in den meisten Fällen bestrebt sein, seine bestehenden Fundamente beibehalten zu können, um die Umbaukosten möglichst klein zu halten. Gleiches trifft auch auf wiederverwendbare Bauteile wie Statorgehäuse und Rotor des Generators zu. Falls es nun durch geeignete Massnahmen auf der Wasserseite möglich ist, die Leistung an der Turbinenkupplung zu vergrössern, so stellt sich die Frage, ob diese Leistung dann von einem Generator modernster Auslegung auf dem bestehenden Fundament und – wenn immer möglich – mit vorhandenem Statorgehäuse übernommen werden kann. Ganz sicher hängt die Beantwortung dieser Frage vom Alter der zu ersetzenden Maschine ab, weil in den vergangenen Dezennien eine Steigerung der Maschinenausnutzung durch neue Techniken ermöglicht wurde.
Um diese Aussage näher zu begründen, soll im folgenden am Beispiel ausgeführter Generatoren im Leistungsbereich zwischen 25 und 60 MVA und Drehzahlen zwischen 600 und 750 U/min bei einer Nennspannung von 10 kV dargelegt werden, in welchem Mass mit fortschreitender Entwicklung diese höhere Ausnutzung der Maschinen realisiert werden konnte. Als Mass für die Ausnutzung gilt dabei die Essonsche Zahl in der Form

$$C = P_s / D^2 L n$$

mit	P_s	Scheinleistung	in kVA
	D	Bohrungsdurchmesser	in m
	L	Eisenlänge	in m
	n	Drehzahl	in 1/min

Da Wasserkraftgeneratoren eine durchschnittliche Erstlebensdauer von 30 bis 40 Jahren haben und man kaum eine jüngere Anlage zugunsten höherer Ausnutzung ersetzen wird, genügt es, eine Zeit von 30 Jahren zu überblicken.
In dieser Zeitspanne war es möglich, die Ausnutzung der Generatoren um durchschnittlich 50% zu steigern (Bild 1), was in mehreren Schritten erreicht werden konnte.
Ein erster Schritt betraf das Statorblechpaket. Der Übergang von Elektroblechen mit Verlustwerten von 1,7 W/kg zu solchem mit nur 1,3 W/kg brachte eine Reduktion der Eisenverluste. Der gleichzeitig vollzogene Übergang von Papierisolation zu Lackisolation erhöhte den Eisenfüllfaktor. Beide Verbesserungen erlaubten eine Steigerung der Ausnutzung um rund 5%.

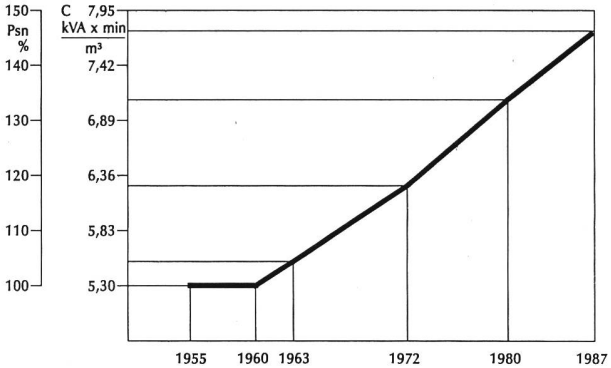

Bild 1. Die Ausnutzung von Wasserkraftgeneratoren im Leistungsbereich 25 bis 60 MVA bei Drehzahlen von 600 und 750 1/min und einer Nennspannung von 10 kV zwischen 1955 und 1987.

Der nächste Schritt betraf die Isolation der Statorwicklung. Die Entwicklung einer vakuumimprägnierten Kunstharzisolation war im Labor erfolgreich abgeschlossen. Eine Anwendung in der Praxis zeigte sich an. Sicherheitshalber wurde jedoch die Wandstärke gleich belassen wie bei der vorhergehenden Asphalt-Micafolium-Isolation, bis weitere Erkenntnissen aus der Praxis über das elektrische und mechanische Verhalten der neuen Isolation eine laufende Reduktion der Wandstärke erlaubten. Hatte schon die Kunstharzisolation wegen ihres homogenen und dichteren Aufbaues bei der ursprünglichen Wandstärke die Wärmeabfuhr erleichtert, so wurde dieser Effekt durch die spätere Reduktion der Wandstärke noch erheblich verbessert. Hinzu kam die Möglichkeit, bei gleichbleibender Nutbreite (zum Beispiel bei vorhandenem Stanzwerkzeug) mehr Kupferquerschnitt unterzubringen. In Verbindung mit einer feineren, dem Temperaturprofil längs des Stabes angepassten Verteilung der Lüftungskanäle im Statorblechpaket war eine Steigerung der Ausnutzung um weitere etwa 20% möglich.
In einem dritten Schritt wurde die Luftkühlung der Maschinen in Stator und Rotor untersucht und verbessert. Die Kühlung einer elektrischen Maschine hängt ab vom Volumenstrom des Kühlmediums durch die Maschine, von seiner Geschwindigkeit, mit welcher es an den erwärmten Teilen vorbeifliesst, und damit auch von der Art der Strömung, ob turbulent oder laminar, sowie von der geometrischen Ausbildung der dem Kühlmediumstrom ausgesetzten Oberfläche.
Aus dieser Aufstellung geht schon hervor, dass die Kühlung eines Generators ein System darstellt, das aufgrund der zahlreichen voneinander abhängenden Einflussgrössen ganzheitlich behandelt werden muss.
Auf diesem Gebiet konnten in den vergangenen Jahren ebenfalls nennenswerte Fortschritte erzielt werden. Zum einen war es bald einmal möglich, für den gasförmigen Kühlmediumsfluss (die Wasserkühlung sei bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt) in der Maschine ein nachbildendes Netzwerk aufzustellen mit Strömungswiderständen verschiedenster Art und mit allen Druckerzeugern, um die Kühlstromverteilung zu ermitteln, analog zu den bekannten Verfahren in elektrischen Netzen. Zum anderen konnten umfassendere Informationen über Wärmeübergangszahlen gewonnen werden, sei es aus Messungen an Maschinen, sei es durch systematische Messungen dieser Kennwerte an Versuchseinrichtungen, wie dies für die Polspulenkonfiguration an Wasserkraftgeneratoren unter Berücksichtigung von Pollückengeometrie, Anströmwinkel der Kühlluft, Verrippungsverhältnis der Polwicklung und Drehzahl mit erheblichem Aufwand erfolgreich durchgeführt werden konnte (Bild 2).

Eine wesentliche Hilfe bei der Vorausberechnung der Erwärmung der Maschinen stellt der Computer dar, der es unter Verwendung anpassbarer Programme ermöglicht, in kurzer Zeit variantenreiche Rechnungen zur Optimierung der Kühlung durchzuführen. Aber erst das Zusammenwirken von Kühlungsberechnung und konstruktiver Gestaltung ermöglicht die Konzeption einer höher ausgenutzten Maschine. Es muss gewährleistet sein, dass das Kühlmedium auch wirklich in ausreichender Menge und mit vorgesehener Geschwindigkeit an den heissen Stellen vorbeizuströmen in der Lage ist, was durch konstruktive Massnahmen wie Leitbleche, Zuströmkanäle, Blenden, Füllkörper in der Pollücke und strömungsgünstige Umlenkungen erreicht werden kann (Bild 3). Dabei darf sich die Konstruktionstätigkeit nicht nur auf die Ausbildung der Strömungswege innerhalb der Maschine beschränken. Mit in den Strömungskreislauf müssen auch Kühler und Ventilatoren einbezogen werden. Mit Hilfe der erwähnten Berechnungsmethoden ist es heute möglich, den Ventilator so auszulegen, dass sein auf die jeweilige Maschine angepasster Betriebspunkt nicht nur im stabilen Bereich der Betriebskurve liegt, sondern dass er auch hinsichtlich seines Wirkungsgrades optimiert ist. Heutige Ventilatoren erreichen mit dieser individuell angepassten Auslegung und mit entsprechenden Dichtungen zwischen stehenden und rotierenden Teilen Wirkungsgrade, welche 25 bis 30% höher liegen als noch vor wenigen Jahren.

Die beschriebenen Verbesserungen bei der Auslegung des Kühlkreislaufes brachten eine weitere Steigerung der Maschinenausnutzung von 20 bis 25%, immer als Durchschnittswert betrachtet.

Konsequenzen

Aus den vorangegangenen Ausführungen lässt sich erkennen, dass je nach Ursprungsjahr eines alten Generators ein Steigerungspotential der Ausnutzung durch zielgerichteten Austausch von Komponenten in neuer Technik vorhanden ist. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass diese Steigerungsmöglichkeit nicht zuletzt durch verbesserte, erprobte Berechnungsverfahren ermöglicht wird. Diese Berechnungsverbesserungen beziehen sich natürlich nicht nur auf die Kühlung, sie erstrecken sich über den gesamten Bereich einer Maschine, von der Verlustminimierung über die verbesserte Kühlung zur Leichtkonstruktion der tragenden Bauteile. Eine genauere Kenntnis der Beanspruchungen in den einzelnen Elementen, eine elastische, den Abbau von Zwangskräften ermöglichende Konzeption und eine genaue Vorausberechnung aller im Betrieb auftretenden Schwingungen – bei gleichzeitiger Kenntnis der Lage von Resonanzfrequenzen in der Maschine – haben die Sicherheit bei der Generatorauslegung erhöht. Der Ingenieur hat dadurch heute die Möglichkeit, beim Umbau alter Maschinen die geeigneten Neukomponenten auszuwählen und zu dimensionieren mit dem Ziel, der Maschine auch bei höherer Ausnutzung eine befriedigend lange Zweitlebensdauer zu ermöglichen.

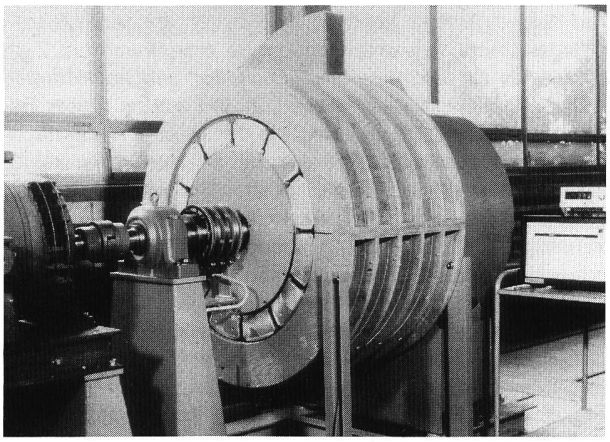

Bild 2. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Wärmeübergangszahlen an Polspulen in Abhängigkeit von Umfangsgeschwindigkeit, Anströmwinkel, Verrippungsverhältnis und Pollückengeometrie.

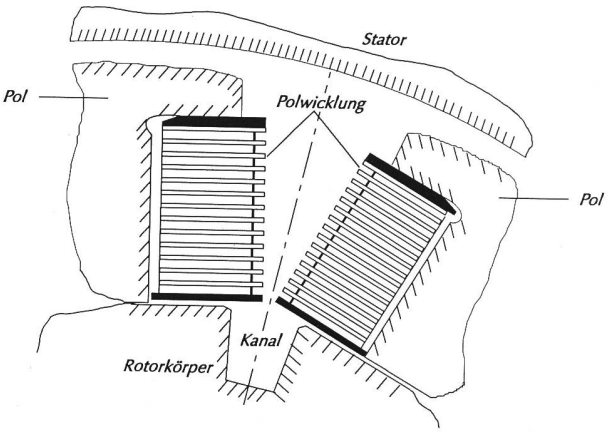

Bild 3. Luftführungskanal in der Pollücke unter den Polspulen für die Zufuhr kalter Luft an die Maschinenmitte.

Dieses Bestreben wird dadurch unterstützt, dass beim Umbau bestehender Anlagen auf jahrelangen Betriebserfahrungen basierende Informationen über die zu erwartenden Betriebszustände, Störungen und Umwelteinflüsse bereits vorliegen, dass diese Gegebenheiten im Pflichtenheft des Kunden ihren Niederschlag finden und vom umrüstenden Ingenieur also berücksichtigt werden können. Sicherheitszuschläge bei der Dimensionierung der Bauteile zur Begegnung unbekannter Gefahren, wie sie in der Graugussepoche des Maschinenbaus üblich gewesen sind, erübrigen sich.

Sollten sich jedoch bei einem weitgehenden Umbau der Anlage, insbesondere auf der Wasserseite, die während der vergangenen Betriebsperiode gesammelten Erfahrungen nicht mehr als voll übertragbar erweisen, so lässt sich der Generator durch heute verfügbare, rasch reagierende Schutzeinrichtungen besser gegen unvorhergesehene Betriebszustände schützen als durch eine Überdimensionierung der Bauteile.

Eine weitere Hilfe zur Erzielung einer langen Zweitlebensdauer besteht in der den Betrieb begleitenden kontinuierlichen Überwachung der Maschine mit einem Monitoringsystem. Diese Überwachung lässt Änderungen im Betriebsverhalten schon frühzeitig als Trend erkennen und gibt dem Betreiber die Möglichkeit, rechtzeitig Massnahmen für die Gesunderhaltung seiner Maschine zu ergreifen.

Schlussbetrachtung

Es wurde in der vorliegenden Abhandlung auf das Potential der Ausnutzungssteigerung bestehender Wasserkraftgeneratoren durch den zielgerichteten Austausch von Komponenten hingewiesen. Die genannten Zahlen sind Durchschnittswerte. Voraussetzung für eine erfolgreiche Maschinenumrüstung ist in jedem Fall die genaue, auf Messungen basierende, individuelle Kenntnis der vorhandenen Maschine, ihres Zustandes und ihres Umfeldes. Das aber erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Betreiber.

Adresse des Verfassers: Dr. *Friedrich Mez,* Public Affairs Manager, Asea Brown Boveri, CH-5401 Baden.