Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 86 (1995)

Heft: 2

Artikel: Generatoren für das weltgrösste Hochdruck-Wasserkraftwerk

Autor: Howald, Walther / Stöckli, Franz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902415

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: 13.07.2025

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

Die Staumauer des Val des Dix im Kanton Wallis, Schweiz, erlaubt es, 400 Millionen Kubikmeter Wasser zu speichern. Um speziell im Winter vermehrt hochwertige Energie zur Spitzenlastdeckung zu liefern, wird die hydroelektrische Anlage der Grande Dixence S.A. um das Kavernenkraftwerk Bieudron erweitert. ABB liefert hierfür drei durch Peltonturbinen angetriebene 465-MVA-Synchrongeneratoren. Mit 33,2 MVA pro Pol werden dies die weltgrössten, schnellaufenden Wasserkraftgeneratoren sein.

Generatoren für das weltgrösste Hochdruck-Wasserkraftwerk

■ Walther Howald, Franz Stöckli

Mit ihren 285 Metern Höhe ist die Staumauer der Grande Dixence, erbaut in den Jahren 1955 bis 1961, die höchste Staumauer der Welt (Bild 1). Dahinter warten 400 Millionen Kubikmeter Wasser oder 20% der gesamten gespeicherten hydraulischen Energie der Schweiz darauf, in den beiden Zentralen Fionnay (6 × 60 MVA) und Nendaz (6 × 80 MVA) in elektrischen Strom umgewandelt zu werden. Diese in Fionnay und Nendaz verfügbare Leistung beträgt aber nur ungefähr 8% der gesamten schweizerischen Kraftwerksleistung. Die wertvolle Energiereserve der Grande Dixence wird also nicht optimal genutzt.

Schon seit Mitte der 70er Jahre haben die *S.A. l'Energie de l'Ouest-Suisse* (EOS) und die *Grande Dixence S.A.* nach Lösungen gesucht, um das gespeicherte Wasser wirtschaftlicher zu verwenden und um, speziell im Winter, mehr hochwertige Spitzenenergie bereitstellen zu können. Aus der grossen Zahl der Varianten hat sich das Projekt Bieudron entwickelt.

In der neu zu erstellenden Zentrale Bieudron (Bild 2, Tabelle 1) wird das Wasser in einer einzigen Stufe zwischen der Staumauer Grande Dixence und der Rhone zusätzlich und parallel zu den bestehenden Werken Fionnay und Nendaz genutzt. Die Bauarbeiten, die Ende 1992 begonnen haben, umfassen einen 15,85 km langen Zuleitungsstollen, einen 4,23 km langen Druckstollen sowie das ebenfalls unterirdisch gebaute Kraftwerk. Die Inbetriebsetzung ist für das Jahr 1998 vorgesehen.

Das neue Kavernenkraftwerk Bieudron ist eine Anlage der Weltrekorde:

Bild 1 Die Staumauer der Grande Dixence im Kanton Wallis, Schweiz, erlaubt, 400 Mio. m³ Wasser zu speichern. Es handelt sich um eine Gewichtssteinmauer mit einem Betonvolumen von 6 Mio. m³.

Figure 1 Le barrage de la Grande Dixence dans le canton du Valais, Suisse, permet d'accumuler 400 millions de m³ d'eau. Il s'agit d'un barrage-poids avec un volume de béton de 6 millions de m³. De nombreuses galeries de contrôle permettent de surveiller cet ouvrage.

Adresse der Autoren:
Walther Howald, Franz Stöckli, ABB Kraftwerke AG, Postfach, 5242 Birr.

- mit 1883 m grösstes Gefälle der Welt
- mit 420 MW leistungsstärkste Peltonturbinen der Welt
- mit 33,2 MVA/Pol die weltgrössten, schnellaufenden Wasserkraftgeneratoren

Schnellaufende 465-MVA-Wasserkraftgeneratoren

Die Generatoren werden als vertikale Synchronmaschinen für die Erzeugung von Spitzenenergie gebaut. Ihre wichtigsten technischen Daten zeigt Tabelle 2.

Fünfdüsige Peltonturbinen werden die Generatoren antreiben. Der Betrieb mit nur zwei oder drei benachbarten Düsen ist nicht erlaubt.

Generatoren und Transformatoren werden in Blockschaltung gekoppelt und über das Unterwerk Chamoson auf das 220/380-kV-Netz im Kanton Wallis arbeiten.

Da die Generatoren in einer Kaverne (Bild 3) installiert werden, beeinflusst das Bauvolumen die Kosten sehr stark. Ein kleines Maschinenvolumen ist deshalb sehr wichtig. Kleine Abmessungen lassen sich durch vollständige Wasserkühlung und eine möglichst geringe Bauhöhe der Maschinen erreichen.

Maschinen dieser Leistungsgrösse (> 300 MVA) wurden bisher als dreilagrige Maschinensätze gebaut. Da das Gewicht der rotierenden Masse (Generatorrotor, Peltonturbinenrad und Turbinenwelle) 600 t nicht übersteigt, wird das Axiallager über dem Generatorstator normalerweise als kombiniertes Axial- und Führungslager ausgeführt. Unterhalb des Generatorrotors liegt das untere Führungslager, anschliessend folgt eine Zwischenwelle mit dem Turbinenrad und dem unmittelbar darüberliegendem dritten Führungslager.

Mit dieser Anordnung konnte die Bedingung, dass die biegekritische Drehzahl oberhalb der Durchbrenndrehzahl liegt, in der Regel erfüllt werden. Wie sich die Verhältnisse nun bei diesen schnellaufenden 465-MVA-Generatoren stellen, wurde in umfangreichen Studien ermittelt.

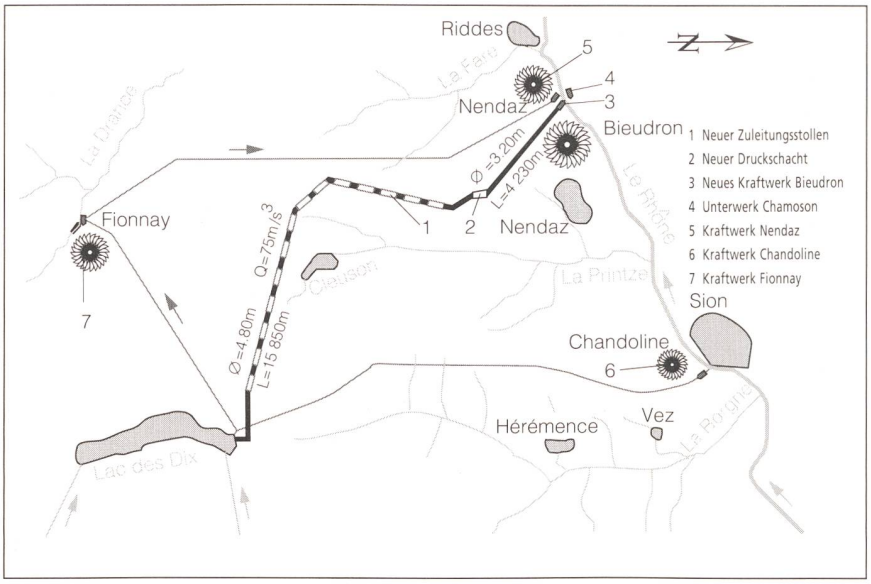


Bild 2 Anlage der Grande Dixence S.A. Der Stausee hat die Aufgabe, vor allem im Sommer das Wasser von 35 Gletschern im Mattertal und im Val d'Hérens zu fassen und über ein Netz von Stollen und vier Pumpstationen dem Lac des Dix zuzuführen. Das Einzugsgebiet überdeckt eine Fläche von 350 km².

Figure 2 Installation hydroélectrique de la Grande Dixence S.A. La mission du barrage consiste à collecter principalement en été l'eau de 35 glaciers du Mattertal et du Val d'Hérence et de la mener par un réseau de galeries et quatre stations de pompage au lac des Dix. Le bassin versant couvre une superficie de 350 km².

Synchronmaschine: Auslegung und mechanisches Konzept für Leistungen bis 500 MVA

Die vertikale Synchronmaschine (Bild 4) wird zweifach gelagert: über dem Rotor durch ein kombiniertes Trag- und Führungslager und unter dem Rotor durch ein Führungslager. Unmittelbar unter dem Führungslager liegt die Kupplung Generatorwelle/Peltonturbine.

Stator

Aus Transportgründen wird das Statorgehäuse mit den Schrägfedersäulen mehrteilig ausgeführt und in der Anlage zusammengeschweisst. Anschliessend erfolgt der Einbau des Magnetblechkörpers, und zwar ringförmig und ohne Trennungen, so dass sich die höchstmögliche Stabilität ergibt.

Die Statorwicklung wird mit Micadur® isoliert und erst in der Anlage eingebaut. Die Kühlung der Wicklung erfolgt durch wasserdurchströmte Hohlleiter, die in die Statorstäbe eingesetzt werden. Als Basis für Auslegung und Fabrikation dieser direkt wassergekühlten Statorwicklung dienen die für grosse Turbogeneratoren entwickelten Verfahren [1].

Rotor

Die Materialbeanspruchungen beim Durchbrennen des Generators und das Verhalten des Wellenstranges bei Störfällen, wie Klemmenkurzschluss, Polrad-Doppelerdschluss oder Fehlsynchronisierung, erfordern eine hohe Biegesteifigkeit des Wellenstrangs. Es darf in keinem Fall zu einem Streifen des Rotors im Stator kommen. Diese hohe Biegesteifigkeit wird erreicht, indem man den Rotor dreiteilig ausführt, und zwar mit einem Zentralkörper und zwei angeflanschten Wellenenden.

Auf den Zentralkörper werden drei geschmiedete Stahlringe aufgekeilt, auf de-

Daten der Anlage	
Maximale Bruttofallhöhe	1883 m
Totale Nennwassermenge	75 m³/s
Maximale Leistung der Anlage	1180 MW
Dauer der Arbeiten	6 Jahre
Anlagekosten	etwa 1 Mrd. sFr.

Technische Daten

- 3 Kugelschieber als Absperrorgane, Durchmesser 1,4 m, Gewicht 120 t
- 3 fünfdüsige Peltonturbinen mit 420 MW Nennleistung, Durchmesser 4,65 m, Gewicht 28 t, Wassergeschwindigkeit am Düsenaustritt 690 km/h
- 3 Dreiphasen-Synchrongeneratoren, Nennleistung 465 MVA bei 428 min⁻¹, vollständig wassergekühlt, Gesamtgewicht 800 t
- 3 Dreiphasen-Blocktransformatoren, Nennleistung 465 MVA

Tabelle 1 Hauptdaten des neuen Wasserkraftwerks Bieudron.

nen man die 14 Polkörper mittels Klauennuten verankert. Die Polspulen werden aus Hohlkupferprofilen geformt und im Betrieb direkt mit Reinwasser gekühlt.

Lagerung

Eine wichtige Voraussetzung für das einwandfreie Laufverhalten im ganzen Drehzahl- und Betriebsbereich ist die stabile Lagerung der Gruppe. Mit dem patentierten Schrägarm-Lagerstern lässt sich das Lagerspiel – trotz temperaturbedingter Armverlängerungen – vom kalten bis zum betriebswarmen Zustand konstant halten. Bei diesem Konzept entstehen keine zusätzlichen thermisch bedingten Druckkräfte auf das Fundament. Durch entsprechende Dimensionierung der Armquerschnitte erhält der Schrägarmstern (Bild 5) die geforderte Steifigkeit. Die Verbindung zum Fundament wird so gestaltet, dass die betriebsbedingten Erwärmungen, die eine Längenänderung des Stators verursachen, die Steifigkeit der Lagerung nicht beeinflussen.

Kühlung

Der Generator ist vollständig geschlossen. Stator- und Rotorwicklung werden direkt mit aufbereitetem, entionisiertem Wasser gekühlt. Ein zweiter Kühlkreis mit nichtaufbereitetem Frischwasser dient zur Kühlung der Rückenpartie des Statorblechkörpers. Zum Abführen der Ventilationsverluste des Rotors und der auf den Poloberflächen entstehenden Zusatzverluste fördert eine Motor-Ventilator-Gruppe die notwendige Kühlluft durch den Generator. Diese wird durch einen im Strömungskreis eingebauten Wasser/Luft-Kühler rückgekühlt.

Nennleistung	465 MVA
Leistung pro Pol	33,2 MVA
Überlast, dauernd	500 MVA
Nennspannung	21 kV ±10%
Nennstrom	12 784 A
Leistungsfaktor	0,9/0,84
Frequenz	50 Hz ±2%
Nenndrehzahl	428,6 min^{-1}
Durchbrenndrehzahl	800 min^{-1}
Trägheitsmoment	1500 tm^2
Bauform	IM 8415
Gewicht des Stators	281 t
Gewicht des Rotors	454 t
Axialkraft auf das Traglager	5198 kN
Antriebsmaschine	Peltonturbine
Kühlsystem:	
Statorwicklung	Reinwasser
Statorblechkörper	Rohwassser
Rotorwicklung	Reinwasser

Tabelle 2 Technische Daten der Wasserkraftgeneratoren.

Bild 3 Das neue Kavernenkraftwerk Bieudron.
1 420-MW-Peltonturbinen
2 465-MVA-Wasserkraftgeneratoren
3 Generatorableitungen

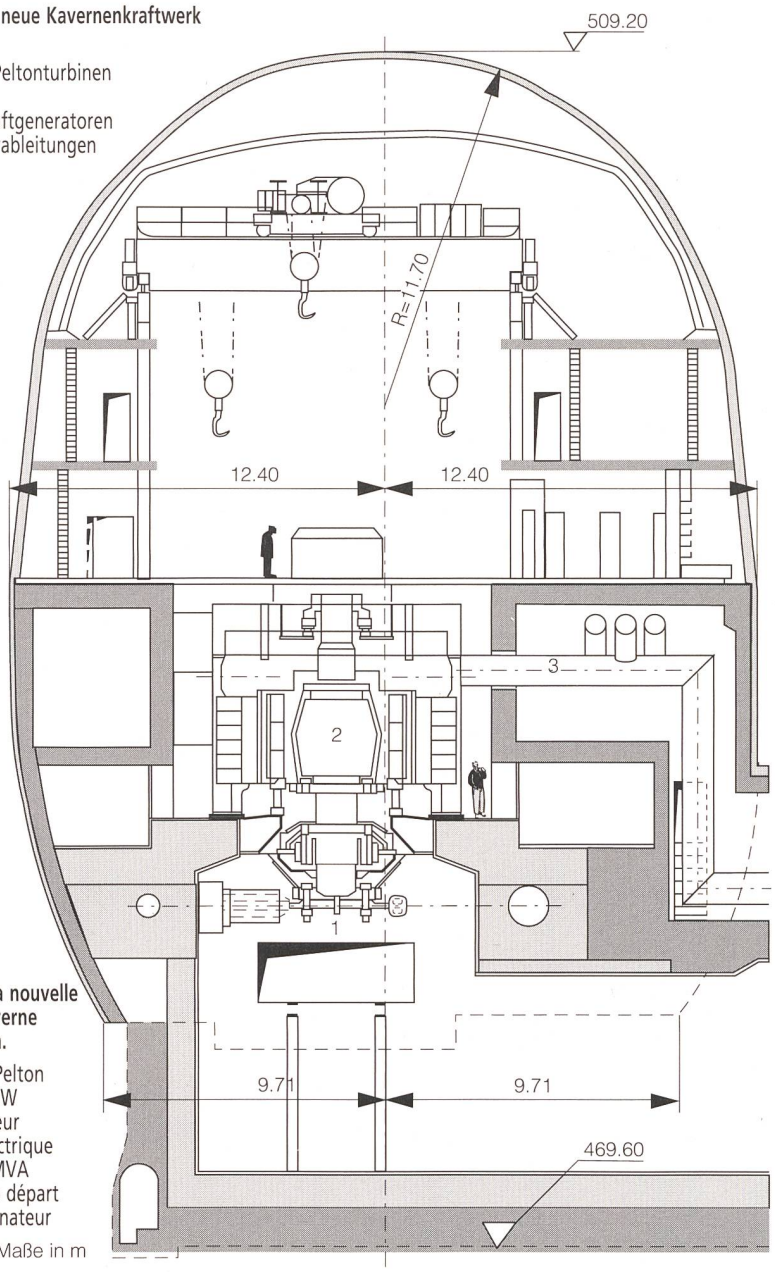


Figure 3 La nouvelle centrale-caverne de Bieudron.
1 Turbine Pelton de 420 MW
2 Alternateur hydroélectrique de 465 MVA
3 Barres de départ de l'alternateur

Untersuchung kritischer Belastungsfälle

Die kritischen Belastungsfälle wurden in verschiedenen Studien untersucht.

Biegekritische Drehzahl

Wie erwähnt, wird die Gruppe Generator/Turbine zweilagrig ausgeführt. Die Machbarkeit dieser Lösung war zu überprüfen. Bei der dreilagrigen Ausführung kann das untere Führungslager näher am Generatorrotor plaziert werden, so dass sich eine kürzere Lagerdistanz und somit auch eine höhere biegekritische Drehzahl ergibt. Es ist jedoch aus physikalischen Gründen nicht möglich, Rotor- und Lagersteifigkeit so gross zu wählen, dass die biegekritische Drehzahl oberhalb der Durchbrenndrehzahl liegt. Somit muss die Lage der Biegekritischen so bestimmt werden, dass sie sich mit Sicherheit oberhalb der maximalen Abschaltdrehzahl befindet.

Aufgrund von Messungen an gelieferten Grösstmaschinen stehen sehr gute Grundlagen über Steifigkeiten der verschiedenen Konstruktionselemente zur Verfügung. So konnten auch die Rechenprogramme überprüft und verfeinert werden, so dass die Lage der biegekritischen Drehzahl gemäss Bild 6 bestimmt werden konnte. Dabei sind selbstverständlich alle wichtigen Nebeneinflüsse wie Statormasse, Ölfilm und -temperatur, Lager- und Fundamentsteifigkeiten berücksichtigt. Bild 7 zeigt das physikalische Modell.

Fundamentkräfte

Die Fundamentkräfte resultieren aus dem Eigengewicht der Maschinengruppe,

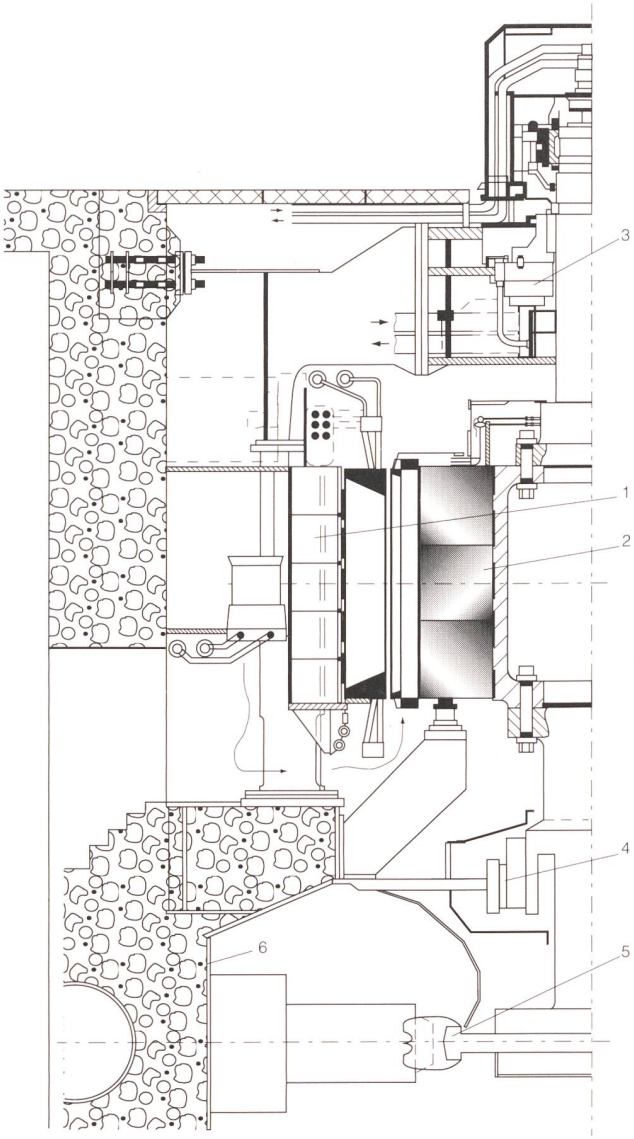


Bild 4 Längsschnitt durch einen vertikalen Hydrogenerator für Leistungen bis 500 MVA.

1 Stator
2 Rotor
3 Kombiniertes Trag- und Führungslager
4 Führungslager
5 Peltonrad
6 Turbinengehäuse

Figure 4 Coupe longitudinale à travers un alternateur hydroélectrique d'une puissance jusqu'à 500 MVA.

1 Stator
2 Rotor
3 Palier pivot et guide combiné
4 Palier-guide inférieur
5 Roue Pelton
6 Bâti de la turbine

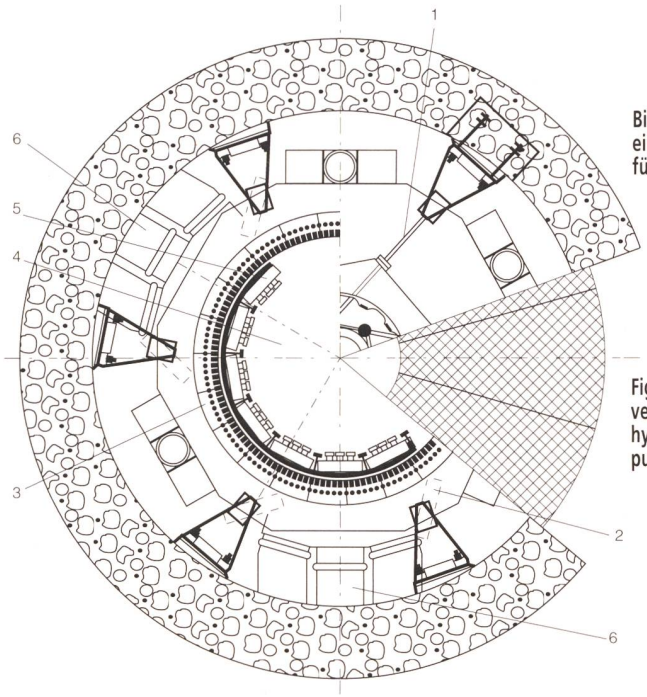


Bild 5 Querschnitt durch einen Hydrogenerator für Leistungen bis 500 MVA.

1 Schrägarm-Lagerstern
2 Stator-Schrägfeder
3 Stator-Blechkörper
4 Rotor
5 Pol
6 Generatorklemmen

Figure 5 Coupe transversale d'un alternateur hydroélectrique d'une puissance jusqu'à 500 MVA.

1 Croisillon à bras obliques
2 Lames-ressorts obliques du stator
3 Paquet des tôles statoriques
4 Rotor
5 Pôle
6 Bornes de l'alternateur

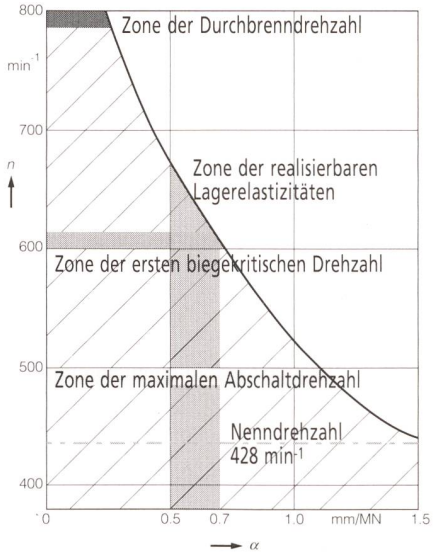


Bild 6 Lage der biegekritischen Drehzahl.
n Drehzahl (min⁻¹) α Lagerelastizität (mm/MN)

Figure 6 Position de la vitesse critique en flexion.
n Vitesse (min⁻¹) α Elasticité du palier (mm/MN)

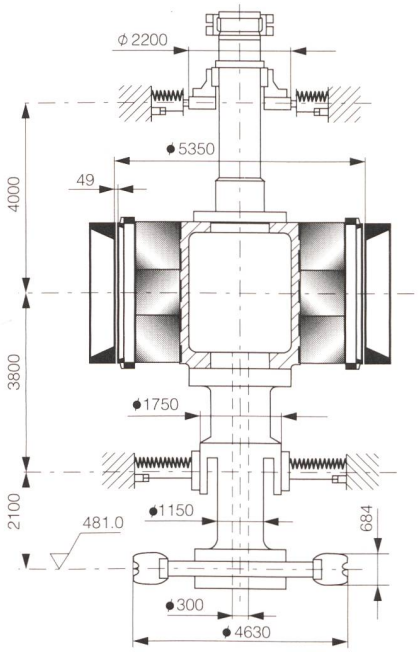
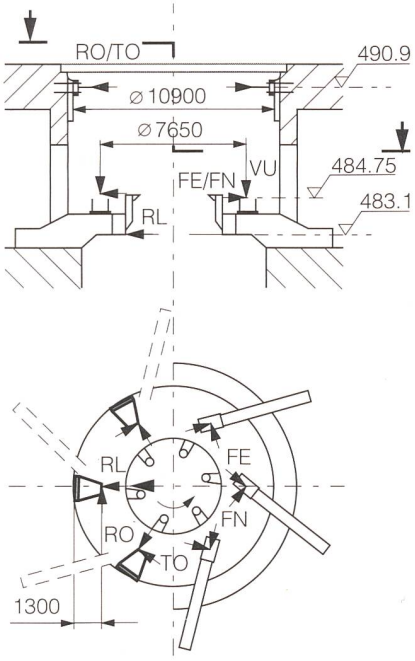


Bild 7 Modell zur Berechnung der biegekritischen Drehzahl.

Figure 7 Modèle servant au calcul de la vitesse critique en flexion.

der Betriebserwärmung und dem Drehmoment sowie aus Kräften und Drehmomenten bei Störfällen.

Beim Generator der Anlage Bieudron treten im Normalbetrieb nur sehr kleine dynamische Kräfte von der Restunwucht und dem möglichen einseitigen magnetischen Zug auf. Alle anderen Betriebskräfte sind konstant oder quasi konstant. Grosse dynamische Kräfte treten nur bei Störfällen auf.



Störfall		Auftretende Kräfte in kN					
		RO	TO	FE	FN	VU	RL
Durchbrenndrehzahl, Wuchtgüte Q 2.5		150 ± 70	25 ± 10	40	40	1500	± 160
Durchbrenn-drehzahl	mit zusätzlicher Unwucht der Turbine (70kg)	150 ± 500	25 ± 80	40	40	1500	±1040
bei Resonanz-durchgang		150 ± 790	25 ± 140	40	40	1500	±3150
Polrad-Doppelerdschluß und Schnellentregung		150 ± 210	25 ± 35	40 ± 590	40	1500	± 640
Fehlsynchronisation 2-polig		–	–	±4510	±105	1500	–
2-phasiger Klemmen-kurzschluß		–	–	±1145	± 66	1500	–

Bild 8 Übersicht über die bei den verschiedenen Störfällen auftretenden Kräfte.

RO Radialkraft, oben
TO Tangentialkraft, oben
FE, FN Horizontalkräfte, auf Fundament wirkend
VU Vertikalkraft, auf Fundament wirkend
RL Radialkraft, auf Fundament wirkend

Figure 8 Synoptique des forces qui se produisent dans les différents cas de dérangements.

RO Force radiale en haut
TO Force tangentielle en haut
FE, FN Forces horizontales agissant sur la fondation
VU Force verticale agissant sur la fondation
RL Force radiale agissant sur la fondation

Durch die «schräge» Anordnung von Lagerstern und Statorgehäusefuss ergeben Temperaturunterschiede zwischen Lager und Fundament kleine Kräfte. Zudem kann durch die richtige Dimensionierung der Statorschrägfüsse die Dreheigenfrequenz des Stators auf einen Wert gelegt werden, der die Störmomente von Kurzschluss und Fehlsynchronisation genügend reduziert [2].

Die Kräfte von den Statorfüssen und dem unteren Führungslager werden direkt in die Stahlkonstruktion des Turbinenfundaments eingeleitet. Nur ein Teil muss vom Bauwerk übernommen werden.

Umlaufende Störkräfte

Unwuchten treten als umlaufende Kräfte auf und werden über die Lager auf das Fundament übertragen. Sie nehmen quadratisch mit der Drehzahl zu, wobei die grössten anregenden Kräfte bei der Durchbrenn-Drehzahl auftreten. Sie werden jedoch noch wesentlich verstärkt, wenn biegekritische Drehzahlen durchfahren werden. Beim Hochlauf des Generators wird dieser Bereich sehr schnell durchfahren, so dass sich keine Resonanz ausbilden kann. Beim Auslaufen erfolgt dies etwas langsamer, so dass der Generator längere Zeit im Bereich der Resonanz läuft. Es ist daher wichtig, dass die Unwucht so klein wie möglich gehalten wird und die Lagerung der Maschine diesen Gegebenheiten angepasst ist.

Bei einem Polraderdschluss entstehen keine auf das Fundament wirkenden Kräfte. Treten am Polrad jedoch gleichzeitig zwei Erdschlüsse um 180° versetzt auf, so spricht man von einem Polrad-Doppelerdschluss. Dabei treten grosse magnetische Kräfte zwischen Stator und Rotor auf. Die Rotorkräfte werden über die Lager, die Statorkräfte über die Statorfüsse auf das Fundament übertragen. Da das Schutzsystem Polraderdschlüsse erfasst, sind Polrad-Doppelerdschlüsse sehr unwahrscheinlich.

Störmomente

Störmomente können durch einen Statorklemmenkurzschluss oder durch Fehlsynchronisation entstehen. In beiden Fällen enthalten sie sinusförmige Anteile mit unterschiedlicher Frequenz, die mit der Zeit abklingen. Die Störmomente sind zwischen Rotor und Stator wirksam. Im Rotor bewirken sie eine überlagerte Drehschwingung und wechselnde Drehmomente. Diese werden bei der Dimensionierung des Wellenstrangs und deren Verbindungsstellen berücksichtigt.

Die Übertragung der Statormomente auf das Fundament hängt vom Verhältnis der Stör- zur Eigenfrequenz des Stators ab. Mit der von ABB entwickelten Stator-Schrägblattfeder kann der Statorfuss als Verbindungselement zwischen Stator und Fundament optimal dimensioniert werden, was zu einer Reduktion der in das Fundament einzuleitenden Kräfte führt.

Die Fehlsynchronisation (betrachtet man den ungünstigsten Fall) ergibt die grössten auf das Fundament einwirkenden Kräfte. Durch entsprechende Gestaltung der Stahlkonstruktion können auch diese ohne Beschädigungen des mechanischen Teils der Anlage aufgefangen werden.

Bild 8 zeigt eine Übersicht über die bei den beschriebenen Störfällen auftretenden Kräfte.

Betriebssicherheit gewährleistet

Mit umfangreichen Studien wurde das definitive Konzept für den Bau dieses Grösstgenerators erarbeitet. Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, diese grosse Maschinengruppe in zweilagriger Ausführung zu bauen. Einen wesentlichen Beitrag haben die aus Messungen und Betriebserfahrungen gewonnenen Daten von ähnlichen Anlagen geleistet. Dank der über 10jährigen Erfahrung mit Schrägarm- und Schrägfederkonzepten kann die Betriebssicherheit dieser komplett wassergekühlten Maschinen gewährleistet werden.

Literaturhinweis

[1] Generatoren für grosse Dampfkraftwerke. ABB-Druckschrift CH-T 070 022 D.

[2] *Kellenberger, W.*: Der optimale Winkel für die Abstützung von vertikalen Wasserkraftgeneratoren mit schrägen Armen oder Blattfedern. Brown Boveri Mitteilungen 67 (1980) 2, S. 108–116.