

Construcción de una central minihidráulica con turbina de doble impulsión en la presa de Wehra en Alemania

Klebsattel, G. Schneider, K., Wirth, D.

Síntesis

El embalse de Wehra es el embalse inferior de la central reversible de Schluchseewerk AG. El caudal de aporte debe descargarse simultáneamente al lecho original del río independientemente del nivel de agua existente en el embalse. La descarga se realiza a través de un túnel con obra de descarga. En la central de la presa debe utilizarse una parte de la descarga para obtener energía renovable. Como sea que el caudal de aporte y el salto independientemente el uno del otro experimentan fuertes fluctuaciones resulta económicamente factible únicamente la instalación de una turbina de doble flujo con dos celdas. La potencia instalada es de 1.135 kW, y la generación anual promedio es aproximadamente 3,8 Millones de kWh.

1. Introducción

La central reversible Wehr con una potencia instalada de aproximadamente 1000 MW en modo turbina y en modo bomba es desde 1976 una de las mayores centrales de este tipo existentes en Alemania. El caudal de aporte del río Wehra al embalse Wehr debe descargarse simultáneamente al lecho original del río independientemente del nivel de agua reinante en el embalse. La descarga se realiza por medio de un túnel de desvío de 290 m de longitud y con un diámetro de 3,7 m.

Al inicio existe una obra de toma con una boca superior y una inferior, provistas cada una de una reja y de una compuerta de ruedas. El túnel termina en una obra de descarga, donde se divide en dos tramos de tubería de $D = 2800$ mm. La regulación de caudal circulante de Wehra debe garantizar la descarga sincronizada de los aportes fuertemente variantes que entran al embalse de Wehra para cualquier nivel de agua comprendido entre el nivel máximo de 419 m + NN y el nivel mínimo de 395 m + NN. Para esta función se han dispuesto dos válvulas de anillo DN 300 y DN 900 para descargas hasta 0,9 y 8 m³/s respectivamente, así como también dos válvulas de chorro cónico DN 2800 para descargas superiores.

En la llamada central de la presa, debe utilizarse para la generación de energía renovable una parte del caudal que hasta ahora se descargaba sin ningún aprovechamiento energético.

La figura 1 muestra la obra de descarga existente con la construcción para la central de la presa.

2. Diseño hidráulico.

Para el diseño hidráulico de la turbina se investigaron las relaciones hidrológicas entre las estaciones de aforo Wehra y Wehr. Los valores hidrológicos esenciales son:

- Descarga media	2,63 m ³ /s
- Descarga anual media años secos:	0,42 m ³ /s
- Avenida anual media:	30,43 m ³ /s
- Escorrentía del embalse Wehra:	67,59 km ²
- Escorrentía de la estación de aforo:	60,63 km ²

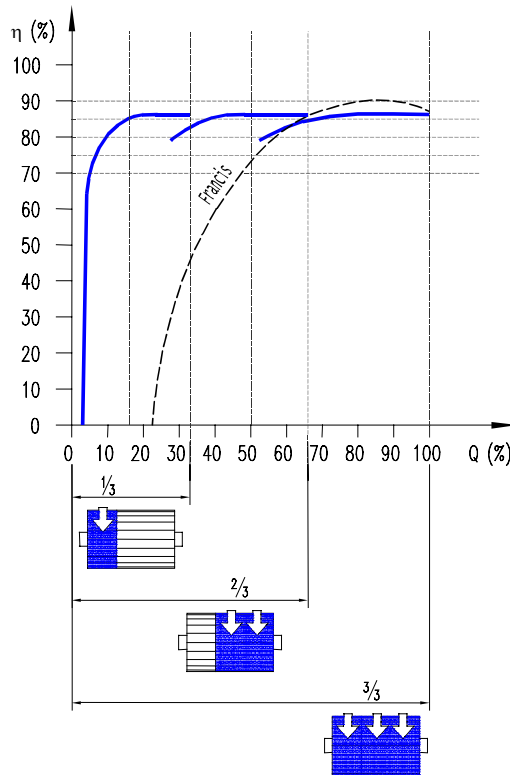


Fig. 1: Comparación de las curvas de rendimiento de una turbina OSSBERGER y de una turbina Francis.

Bajo la consideración de la menor elevación del resto de escorrentía puede esperarse un aporte útil de 2,8 m³/s.

Desde los puntos de vista de economía, de operación y de construcción se escogió un caudal de diseño de $Q_n = 4 \text{ m}^3/\text{s}$. Este corresponde aproximadamente al Q240.

El salto bruto resulta del nivel de agua en el embalse Wehra, que es fuertemente variable a causa del funcionamiento de la central reversible. Aporte y salto son por tanto completamente independientes el uno del otro.

El uso óptimo de la distribución de caudal existente demanda la instalación de una turbina con una característica de rendimiento lo más plana posible a lo largo del rango de caudales existentes, con niveles de rendimiento aceptables aun bajo las condiciones de extremas fluctuaciones en el salto. La elección recae por tanto en una turbina de doble flujo con dos celdas y con tubo de aspiración.

La figura 1 muestra el comportamiento del rendimiento de una turbina de doble flujo en comparación con una turbina Francis. Aunque el rendimiento máximo es inferior, la conveniencia de la turbina de doble flujo se justifica de forma clara en el rango de los caudales reducidos.

Las características de diseño son:

- | | |
|---|--------------------------------|
| -Salto nominal : | $H_n = 30 \text{ m}$ |
| -Caudal nominal para $H_n = 30 \text{ m}$: | $Q_n = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| -Salto mínimo | $H_{\min} = 16 \text{ m}$ |
| -Salto máximo | $H_{\max} = 36 \text{ m}$ |

Con un salto nominal de $H_n = 30$ m la turbina de doble flujo tiene una velocidad de $nN = 214,3$ rpm. Como se pretende utilizar un generador con acople directo sin multiplicador (apartado 4.5), esto implicaría tener un generador con 28 polos.

Sin embargo, por razones económicas se utilizará un generador de 26 polos. Con esto se necesita una velocidad de rotación de $nN = 230,8$ rpm. Teniendo en cuenta la reducción de precio en el generador y las pequeñísimas pérdidas en rendimiento de la turbina esta solución se perfila como la económicamente óptima.

Con estos datos la potencia eléctrica máxima resulta ser $P_{el, max} = 1.135$ kW, con una generación media anual de 3,8 Millones de kWh.

3. Diseño constructivo y conducción del agua motriz

Se ha considerado un diseño constructivo optimizado desde el punto de vista de costes teniendo en cuenta las particularidades locales al pie de la presa Wehra, de la situación de estructuras en la obra de descarga existente, así como las condiciones generales de funcionamiento durante la etapa de construcción y en el período posterior de operación. Soluciones posibles dentro de la obra existente tuvieron que ser desechadas a causa de insuficiencia de espacio y diferentes riesgos técnicos de ejecución.

Como solución óptima se determinó la construcción de una casa de máquinas anexa a la obra de descarga existente. De esta forma se obtiene la siguiente conducción de agua motriz:

La conexión hidráulica en el sistema de tubería existente se realiza por medio de un entronque soldado en el ramal derecho de la tubería DN 2.800. Antes de la turbina se ha dispuesto un válvula de cierre a clapeta y una reja de protección. El flujo se desvía perpendicularmente hacia abajo dentro de la turbina.

La central de presa no tiene ningún tipo de influencia sobre la operación de la central reversible Wehr.

La evacuación de la energía se realiza por medio de un canal de cables existente. Para la instalación no fueron necesarios ningún tipo adicional de accesos. Para el operador existente la construcción y la operación de la central de la presa no ocasionan ningún tipo de alteraciones.

La construcción de la central de la presa tuvo lugar prácticamente sin ningún tipo de impacto ambiental, puesto que el agua motriz se toma directamente de una tubería existente dentro de la planta y se descarga directamente a la cuenca de amortiguamiento, sin desvíos adicionales y sin modificaciones medioambientalmente relevantes respecto al estado existente.

4. Equipamiento Electro-mecánico

4.1 Conexión a la tubería

La forma del entronque de desvío en el ramal derecho DN 2.800 se escogió bajo consideración de los aspectos hidráulicos, de fabricación y de montaje. A causa de la velocidad relativamente baja del flujo entrante la determinación del perfil hidráulico no puso ningún tipo de problemas.

El entronque fue preparado en taller lo máximo posible de manera que en obra los trabajos necesarios se redujeran a pequeños ajustes en la zona de conexión y a la soldadura circular de la unión. De esta forma se pudo minimizar el tiempo necesario de vaciado de la conducción existente. Todas las costuras soldadas se inspeccionaron con un 100% de ultrasonidos y de ensayo superficial de fisuras.

4.2 Válvula de cierre y conexión de la Turbina

La válvula de cierre DN 1.600 se diseñó para el cierre de emergencia bajo el caudal máximo.

Para resistir las fuerzas y momentos actuantes sobre el disco de la válvula durante el cierre bajo flujo se dispuso un actuador oleohidráulico con cilindros hidráulicos de doble acción. El trabajo máximo para cerrar se desarrolla en el tramo final del proceso de cierre al entrar del disco de válvula en contacto con la junta de estanqueidad. Para asegurar el desarrollo del trabajo necesario aún en el caso del fallo de la bomba hidráulica se dispuso un acumulador de pistón. Esta solución ofrece la ventaja, que las pérdidas de aceite y de gas se identifican por medio de finales de carrera dispuestos sobre el eje del pistón que sale al exterior.

En la pieza de tubería de conexión DN = 1.600 entre la válvula de cierre y la turbina se dispone una reja interna con paso $L_w = 30$ mm para protección de la turbina contra broza basta. El colmataje de la reja puede determinarse por medio del equipo dispuesto de presión diferencial de la reja. La limpieza de la reja puede realizarse por medio de una tubería de contracorriente o a través del acceso de hombre.

4.3 Turbina

La turbina instalada fue una de doble flujo de la firma Ossberger GmbH+Co, Weissenburg/Bayern, con un rodete de diámetro $D = 1.000$ mm. La carcasa de la turbina tiene dos partes con la relación 1:2. Las dos directrices pueden ser abiertas independientemente, lo cual permite un campo muy amplio de operación bajo un nivel de rendimiento favorable.

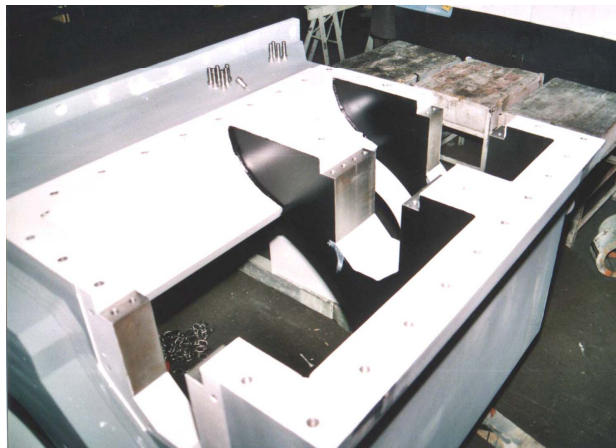


Fig. 2: Carcasa de la turbina OSSBERGER de dos celdas con los alojamientos fresados para los álabes directriz.

La turbina de doble flujo es por su principio una turbina de impulsión radial y con impacto parcial con una velocidad específica baja, la cual se dispone por encima del nivel de aguas abajo. Por medio de la conexión de un tubo de aspiración se utiliza también la altura de succión para la transformación energética. El chorro libre se forma por medio de los álabes que a modo de alas portadoras se encuentran dentro de la cámara de presión de sección rectangular. El chorro atraviesa la corona de álabes del rodete cilíndrico primero desde su exterior hacia su interior y después de atravesar el interior del rodete desde el interior hacia el exterior.

Como todas las turbinas de chorro libre la turbina de doble impulsión requiere una cámara de descarga libre, para que el rodete no se sumerja parcialmente y con ello se frenara. Para esto se controla el nivel de agua en el tubo de aspiración por medio de dos válvulas de aireación con precarga por muelle. El canal de descarga es de lámina libre.

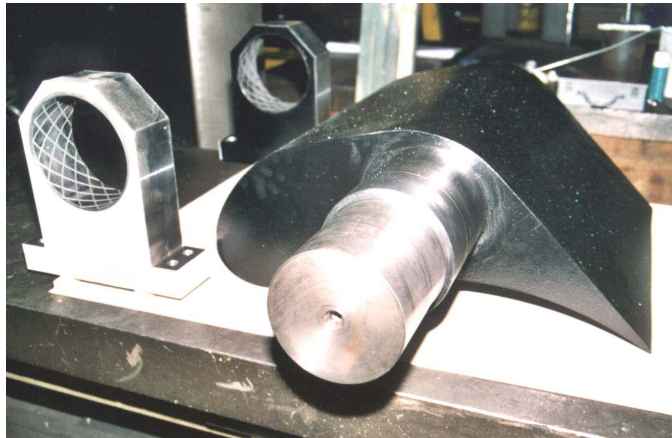


Fig. 3: Alabe directriz y conjunto calibrado del buje del álabe directriz.

Con procedimientos modernos de mecanización con control numérico permiten la fabricación de la turbina con recargos como una construcción soldada sin tolerancias de fundición.

La carcasa (fig. 2) acoge los bujes ajustados de cojinete para el apoyo de las directrices. Los ejes de regulación con camisas inoxidables entradas con dilatación, endurecidas y rectificadas deslizan en cojinetes libres de mantenimiento DEVA-Cojinetes Deslizantes (fig. 3). Esto permite un montaje y desmontaje fáciles de las directrices en dirección radial (fig. 4), aunque los ejes macizos continuos de regulación se encuentran soldados con las directrices. Las directrices mecanizadas con plantilla se ajustan de forma estanca a la carcasa de la turbina y sirven por tanto como órgano de cierre.



Fig. 4: Montaje de los álabes directrices con el conjunto de buje en la carcasa de la turbina.

El rodete tiene un diámetro de 1000 mm y está provisto de 37 álabes, los cuales reforzados con varios discos soporte se encuentran soldados a los discos extremos. A causa de los aspectos hidráulicos se omite la disposición de un eje continuo. El apoyo y la transmisión del par torsor tienen lugar a través de los dos muñones, sobre los cuales se han fijado a presión por contracción los discos extremos del rodete. Camisas recambiables para la protección del eje evitan el daño del sello del eje.

Para el montaje se introduce primeramente el rodete en la carcasa (fig. 5). A continuación se deslizan los cuerpos de los cojinetes principales, por medio de una espiga de paso centrada en la carcasa y enroscada con ella. Se apoyan directamente sobre la bancada de fundamento y no transmiten prácticamente ningún momento flector a la carcasa de la turbina.

Las carcasas de los cojinetes llevan los sellos del eje y el conjunto de los cojinetes, que contienen un cojinete basculante de rodillos y un buje de tensión.



Fig. 5: Montaje del rodete en dirección radial al eje de la turbina.

La separación espacial del sello del eje y del conjunto del cojinete así como los cojinetes libres de mantenimiento de las directrices garantizan que ningún lubricante pueda verterse en el agua motriz. La tapa desmontable cubre el rodete y permite una accesibilidad sin dificultades.

En conformidad con la especificación de la propiedad Schluchseewerk AG todas las soldaduras portantes de la turbina y de la tubería fueron examinadas y aceptadas por la organización MPA de Stuttgart.

Dos cilindros hidráulicos actúan mediante un brazos de palanca sobre el eje de los dos álabes de regulación determinando su apertura y con ello el caudal turbinado. Sensores angulares sin rozamiento captan el valor de apertura para la función del regulador.

En los brazos de palanca se disponen, como es habitual en las turbinas OSSBERGER, contrapesos de cierre adicionales, que en el caso de perturbancias cierran la turbina de forma segura y sin la necesidad de una fuente externa de energía.

Un grupo hidráulico común con válvulas de regulación proporcional alimenta a través del tanque de pistón los cilindros de la turbina y de la válvula de cierre.

4.4 Generador

Para la potencia de máquina en cuestión pierde ventaja, desde los puntos de vista técnico y económico, el uso de un generador asíncrono con banco de compensación sobre el uso de un generador síncrono.

A fin de aumentar la confiabilidad y reducir los gastos de mantenimiento se declina la incorporación de multiplicador entre turbina y generador. Para obtener la velocidad de sincronismo óptima para la turbina,

que sería de 214,3 rpm, se requiere un generador con 28 polos, sin embargo el generador con 26 polos resulta en un ahorro que compensa ampliamente la disminución de rendimiento en la turbina que se ocasiona a causa del incremento de la velocidad.

La energía generada se entrega directamente a la red de media tensión de la central reversible de Wehr. Por ello se eligió una tensión para el generador de 6,3 kV y así se eliminó la necesidad de disponer de un transformador de salida.

4.5 Evacuación de la Energía

Para la evacuación de la energía se tuvo que disponer solamente un cable enterrado de la potencia correspondiente con una longitud de 770 m entre la central de presa y la obra de descarga de la central reversible Wehr. A partir de la obra de descarga pudo utilizarse un cable ya existente. Conducciones nuevas de cables o líneas aéreas de transmisión no fueron necesarias.

5. Desarrollo de la Construcción

La construcción lateral para la instalación de las maquinas de la central de presa se realizó de hormigón armado.

La plataforma de cimentación de la nueva construcción se encuentra 2,8 m por debajo de la placa de cimentación de la obra de descarga existente. Por ello fue necesario realizar una protección inferior durante el desarrollo de la excavación del pozo de la obra.

Como consecuencia de la carga relativamente elevada de la obra existente fue necesaria la fijación por medio de pernos de una pared de hormigón de proyección armada con un paso de entre pernos de 1,1 m x 1,3 m, una resistencia mínima de 154 kN por perno y una longitud de perno de 4 m.

Aprovechando el equipo de montaje existente para la protección inferior se realizó todo el pozo de la obra, empleando el mismo sistema de fijación por pernos. Solamente la parte sur se realizó con un relleno como rampa de acceso.

Siendo que el fondo del pozo de obra se encontraba aproximadamente unos 3,5 m por debajo del nivel freático fue necesario el achique.

Con un pozo todavía existente de la época de construcción de la presa Wehra se pudo bajar el nivel de agua hasta las proximidades del fondo. El resto del achique se realizó con un desagote abierto suplementario.

En el pozo de obra, que para minimizar el volumen de excavación y el de construcción tiene las dimensiones finales, se encofraron las paredes por un solo lado y hormigonaron directamente contra el hormigón proyectado.

Para la conexión de la turbina a la tubería en el fondo de la obra existente era necesaria una apertura de 5 m de ancho y 4 m de alto. Puesto que esta apertura ocasionaba una intervención mayor en la obra existente fue necesario de disponer un disco en la pared para garantizar la correcta transmisión de las cargas.

La excavación se realizó con una combinación de sierra de cable y un equipo hidráulico de excavación. La sierra de diamante permitió el corte por los contornos exteriores de la apertura. También se utilizaba para el corte de los bloques grandes que se desmenuzaban con el equipo hidráulico.

Para la descarga del agua en el compartimento existente de salida se realizaron con la sierra de diamante tres perforaciones 2 m x 1m a través del muro exterior de 1 m de espesor.

6. Desarrollo del Montaje

Después de la construcción e instalación de la grúa se realizó la adaptación del ramal de desvío con el túnel de desvío de Wehra lleno. Después del drenaje del túnel se cortó la tubería y se empezó inmediatamente con los trabajos de soldadura. De esta forma se pudo minimizar el tiempo de túnel vacío requerido.

Con el objetivo de optimizar el coste de la grúa y de su obra se montó el rotor del generador sobre el terreno después de haber descargado el estator. Por esto tuvo que montarse primeramente el estator antes que la turbina. Entre la cimentación de la turbina y la carcasa se dispuso una bancada intermedia desmontable para que en caso necesario se pudiese extraer el rotor después de desmontar la carcasa de la turbina.

Inicialmente se consideró también la variante con un techo desmontable, sin grúa y montaje de las máquinas por medio de una grúa móvil. A parte de los perjuicios para la operación resultaba que la variante del techo desmontable estanco y la eliminación de la grúa era significativamente más cara que la otra.

La figura muestra la maquinaria después del montaje.

7. Integración de la central de presa en la regulación de la descarga del Wehra

La turbina se integra como un elemento adicional de regulación en el control de la regulación de descarga de Wehra, de forma que aportes pequeños y medios se turbinan. En caso de exceder la capacidad de la turbina entran en funcionamiento las compuertas.

La velocidad de ajuste del aparato de regulación de la turbina y de la válvula de cierre se fijaron en consideración de las velocidades máximas de ajuste posibles en los otros órganos de regulación ya existentes, de forma que la condición Aporte = Descarga se cumpliera incluso en el caso de transientes de operación y perturbancias.

8. Resumen

La central de presa en el embalse Wehr muestra una posibilidad única del desarrollo provechoso de la energía hidráulica sin influir adicionalmente sobre el medio ambiente.

Tanto durante la fase de construcción como también para el período de operación todos los aspectos desde el punto de vista económico y del de impacto ambiental pudieron ser coordinados armónicamente sin conflicto de objetivos.

Los usualmente presentes puntos problemáticos a causa de la nueva construcción, tales como: tolerancia ambiental, uso de agua residual, trazado de la descarga y perjuicios a los ríperos aguas abajo no fueron influenciados.

Dirección de los autores:

Dipl.-Ing. Gundo Klebsattel
Schluchseewer AG
Rempartstr. 12-16
79098 Freiburg

Dipl.-Ing. Klaus Schneider
Schluchseewerk AG
In der Würze 14
79837 Häusern

Dipl.-Ing. Dieter Wirth
Ossberger GmbH +Co
Otto-Rieder-Str. 7
91781 Weissenburg