

TURBINA FRANCIS CON ÁLABE CORTO Y BANDA CORTA

CAMPO TÉCNICO

La presente invención se refiere a turbinas hidráulicas, tales como las turbinas Francis. La invención se refiere de manera particular a los álabes y la banda de un rodete de una turbina Francis.

ANTECEDENTES DE LA DIVULGACIÓN

La Figura 1 muestra una turbina hidráulica Francis convencional 1 configurada para convertir la energía hidráulica en un esfuerzo de torsión para accionar un generador eléctrico (no mostrado). El agua fluye típicamente a través de una carcasa en espiral 2 dentro de un distribuidor 13 que rodea un rodete giratorio 3 de la turbina 1. El distribuidor 13 puede tener paletas de apoyo 132 y paletas guía 130. El agua fluye hacia el interior en el rodete con un movimiento generalmente en espiral a lo largo de una dirección horizontal dentro de una turbina que tiene un eje vertical. La velocidad de rotación del agua acciona el rodete para que gire alrededor del eje. A medida que el agua fluye a través del rodete, el componente de transporte del agua se transforma de un flujo horizontal a una descarga generalmente vertical. Desde el rodete, el agua fluye dentro de un cono vertical del tubo de aspiración 5 debajo del rodete.

En el caso de una turbina que tiene un eje horizontal, el agua fluye hacia dentro en el rodete con un movimiento generalmente en espiral. La velocidad de rotación del agua acciona el rodete para que gire alrededor del eje. A medida que el agua fluye a través del rodete, el agua cambia a una descarga generalmente horizontal. Desde el rodete, el agua fluye dentro de un cono horizontal del tubo de aspiración corriente abajo desde el rodete.

El rodete 3 de una turbina Francis incluye típicamente una corona 6 que tiene una superficie de revolución que se extiende hacia la banda 8 a lo largo de un eje 11 del rodete 3, y álabes 7 que se extienden hacia fuera desde la superficie de revolución de la corona 6 hacia una banda anular 8. Cada álabe 7 tiene un borde de ataque y un borde de posterior. Los extremos de estos bordes están unidos con la corona 6 y la banda 8. El rodete 3 puede estar localizado sobre un anillo inferior 22 en la turbina.

El agua ingresa en el rodete 3, fluye alrededor de los bordes de ataque de los álabes, fluye entre los álabes, y pasa sobre los bordes posteriores de los álabes, luego fluye dentro del tubo de aspiración 5.

La velocidad del agua es generalmente más rápida cerca de la banda que cerca de la corona en el rodete. El flujo de agua a alta velocidad da como resultado una fricción hidráulica relativamente alta en y cerca de la banda lo cual reduce la eficiencia de la turbina, como parte de la energía se pierde por fricción. El agua a alta velocidad ocasiona además una baja presión estática en el rodete. La baja presión puede originar la formación de burbujas de

cavitación que pueden dañar las superficies de los álabes, la banda, y la corona.

En el campo de las turbinas de agua, la banda del rodete también es conocida como un anillo de refuerzo o aro. La corona también es conocida como un núcleo de rodete. El borde de ataque de un álabe también es conocido como un borde de entrada o un borde de afluencia. El borde posterior de un álabe también es conocido como un borde de salida o un borde de descarga de un álabe de rodete. Esta divulgación puede usar los términos de manera intercambiable con referencia a los diferentes componentes de rodete.

Las Figuras 2 y 3 son vistas lateral e inferior, respectivamente, de un rodete de turbina Francis 9 convencional y ejemplar que gira en dirección (R) alrededor de un eje giratorio 11 del rodete 9. El rodete 9 incluye un conjunto anular de los álabes del rodete 10, una banda anular 12, y una corona 14. El rodete 9 gira en sentido horario cuando se ve desde la corona 14. La corona 14 tiene una superficie de revolución que típicamente hace frente a la banda 12 a lo largo del eje giratorio 11. Una abertura 23 en la corona 14 es coaxial con el eje 11, y puede recibir un eje para un generador.

La Figura 2 muestra los extremos 18 de los álabes 10 superpuestos sobre la banda 12 para fines de ilustración. Los extremos de los álabes 10 están unidos, por ejemplo, soldados, con la banda 12, pero no necesitan extenderse a través de la banda 12. Los extremos 18 de los álabes 10 pueden

no estar visibles a través de la banda 12 en una modalidad práctica del rodete 9.

Los álabes 10 están dispuestos en un conjunto anular entre la banda 12 y la corona 14 del rodete 9. Los álabes 10 dirigen el agua desde la carcasa en espiral 2 para que fluya entre la banda y la corona y dentro del tubo de aspiración 5 como se muestra en la Figura 1.

Cada álabe 10 tiene una forma similar que se extiende en forma de una curva desde el borde de ataque 16 hacia el borde posterior 20. El borde de ataque 16 está en la entrada al rodete 9 y el borde posterior 20 está en la salida. Las pseudo-líneas de corriente 17, 19 se dibujan sobre la imagen de los álabes 10 para ilustrar la forma de los álabes 10. Las pseudo-líneas de corriente continuas 17 se muestran en el lado de succión de los álabes 10, y las pseudo-líneas de corriente discontinuas 19 se muestran en el lado de presión de los álabes 10. Los lados de succión de los álabes 10 hacen frente hacia la dirección de rotación (R) del rodete, y los lados de presión se orientan hacia fuera de la dirección de rotación (R). Cada pseudo-línea de corriente 17, 19 se dibuja sobre la superficie del álabe 10 desde el borde de ataque 16 hacia el borde posterior 20.

Cada álabe 10 tiene cuatro esquinas P, Q, S y T. Las dos esquinas P y S del extremo de álabe 21 están en contacto con la corona 14 y las dos esquinas Q y T están en contacto con la banda 12. Las esquinas P, S están en contacto con la superficie exterior de la corona 14. La esquina P está próxima

a la región corriente arriba de la corona 14 y la esquina S está en la región corriente abajo 25 de la corona 14. Las esquinas Q y T del extremo de álabe 18 están en contacto con la banda 12, estando la esquina Q localizada cerca de un primer reborde de la banda 12 y estando la esquina T cerca de un segundo reborde de la banda 12.

La superficie exterior de la corona 14 soporta los extremos 21 de los álabes 10. Los extremos 21 se pueden unir a la corona 14 tal como mediante soldadura. La corona 14 puede tener una abertura interior para recibir un eje de accionamiento. Una porción 24 de la superficie exterior de la corona 14 se extiende más lejos de las esquinas S de los álabes 10 en dirección en sentido de la corriente. La porción 24 de la corona hace frente al tubo de aspiración 5.

La banda 12 es una estructura anular que soporta los extremos 18 de los álabes 10. La banda 12 puede tener una curvatura que se curva hacia el eje 11 del rodete de turbina 3. La curvatura se ajusta a los bordes 18 de los álabes 10. La banda tiene una longitud (L) y un diámetro (D). La longitud (L) es una distancia medida entre la parte inferior 15 del distribuidor 13 hasta el borde posterior T en la banda 8. El diámetro (D) es un diámetro de salida del rodete 3, que es un diámetro de la banda 12 en la unión con el borde posterior T. Una longitud de banda normalizada, denominada “proporción de longitud de banda” en el contexto de esta divulgación, puede estar caracterizada por la proporción de su longitud con su diámetro mínimo (L/D).

Los rodetes convencionales tienen una proporción de longitud de banda de por lo menos 17% (0.17). Estos son referidos como rodetes largos en el contexto de esta descripción.

En el contexto de esta descripción, los rodetes referidos como rodetes cortos tienen una proporción de longitud de banda de menos de 17% (0.17). Los rodetes cortos se han probado en el pasado, pero sufrieron severos daños de cavitación los cuales dañaron el rodete y redujeron su eficiencia hidráulica. La cavitación es usualmente menos excesiva en rodetes de banda larga con álabes largos. La sabiduría convencional dice que las bandas y los álabes deberán ser largos para evitar la cavitación.

La longitud incrementada de los álabes y la banda en un rodete largo aumenta la masa del rodete. La eficiencia hidráulica del rodete largo sufre debido al aumento de las pérdidas de fricción hidráulica debido a las áreas incrementadas de superficie mojada de los álabes y bandas más largos. Los esfuerzos para reducir la cavitación en un rodete y mejorar por el contrario el rendimiento se divulgan en las Patentes Estadounidenses Nos. 6,135,716 y 4,479,757. Queda la necesidad de mejorar el rendimiento del rodete y reducir la cavitación en un rodete.

RESUMEN DE LA DIVULGACIÓN

Se ha concebido un rodete corto que tiene álabes cortos con bordes de ataque delanteros. El rodete corto tiene menor área de superficie mojada en

comparación con un rodete largo, lo cual da como resultado una fricción hidráulica reducida y un rendimiento mejorado. El rodete corto puede tener una banda o puede no tener una banda (sin refuerzo).

En un borde de ataque delantero, el borde de ataque une la banda por adelantado de donde el borde de ataque une la corona en dirección de rotación del rodete. Un borde de ataque delantero también puede estar referido como un borde de ataque inverso.

Un borde de ataque delantero desplaza la carga de presión de un álabe hacia la corona y lejos de la banda. La carga se refiere a la fuerza hidráulica aplicada a varias posiciones en la superficie de un álabe como resultado de la diferencia de presión entre la presión y el lado de succión. Debido al desplazamiento de la carga, los álabes son cargados de manera más uniforme entre la banda y la corona.

El desplazamiento de la carga del álabe lejos de la banda reduce el riesgo de cavitación en la banda y en las superficies del álabe cerca de la banda. Reduciendo el riesgo de cavitación, se torna práctico un álabe corto. Otros parámetros de álabe, tales como el espesor del álabe y la distribución de los ángulos del álabe se pueden seleccionar para reducir y el riesgo de daño al rodete debido a la cavitación.

La combinación de álabes cortos que tienen bordes de ataque delanteros da como resultado un rodete corto con fricción hidráulica reducida

en comparación con un rodete corto convencional. El riesgo de cavitación en el rodete corto está dentro de los niveles aceptables. El rodete corto tiene menos peso que un rodete largo convencional lo cual da como resultado menores costos de materiales y costo de producción para fabricar el rodete.

Los bordes posteriores de un álabe corto pueden estar invertidos. Un borde posterior invertido tiene una curvatura que se curva hacia el borde de ataque del álabe. La curvatura se extiende a lo largo de toda la longitud del borde posterior desde la banda hacia la corona de un rodete. Un borde posterior invertido reduce la longitud del álabe a lo largo de las pseudo-líneas de corriente 17, 19, especialmente en las regiones de alcance medio del álabe. Acortar la longitud de los álabes reduce el área de superficie mojada de los álabes y reduce de este modo la fricción hidráulica.

El rodete corto se puede usar para reemplazar un rodete existente, especialmente donde hay muy poco espacio disponible en una turbina hidráulica existente dentro de la cual se va a insertar el rodete. El rodete corto permite además que los nuevos diseños de ensamblaje de turbina tengan un tamaño reducido y menores costos de material y producción que los tamaños y los costos para producir una turbina convencional.

Un rodete corto puede incluir una banda, una corona, un grupo de álabes cortos que tienen bordes de ataque delanteros, y una proporción de longitud de banda de menos de 17% (0.17). Además, los bordes posteriores

de los álabes pueden estar invertidos, es decir, son curvos hacia el borde de ataque entre la corona y la banda.

Un rodete de turbina sin banda (sin refuerzo) puede incluir una corona, un grupo de álabes cortos que tiene bordes de ataque delanteros, y una periferia exterior del rodete que tiene una proporción de longitud de periferia de menos de 17% (0.17). Además, los bordes posteriores de los álabes también pueden estar invertidos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 es una vista lateral, mostrada en una sección transversal parcial, de una turbina Francis vertical convencional que tiene un distribuidor con paletas de apoyo y paletas guía, un rodete, un tubo de aspiración y una carcasa en espiral.

La Figura 2 es una vista lateral de una ilustración esquemática de un rodete convencional para una turbina Francis.

La Figura 3 es una vista inferior del rodete convencional.

La Figura 4 es una vista lateral de una ilustración esquemática de un rodete corto que tiene una banda corta y álabes cortos.

La Figura 5 es una vista inferior de un rodete corto mostrado en la Figura 4.

La Figura 6 es una vista superior del rodete mostrado en la Figura 4 donde la corona se muestra en líneas discontinuas con la finalidad de ilustrar los álabes.

La Figura 7 es una vista en perspectiva de un álabe de rodete corto que muestra el borde de ataque, donde las pseudo-líneas de corriente están dibujadas en la superficie del álabe.

La Figura 8 es una vista en perspectiva del álabe del rodete mostrado en la Figura 7, y proporciona una vista desde arriba del álabe.

La Figura 9 es una vista en perspectiva del álabe del rodete mostrado en la Figura 7, y proporciona una vista del borde posterior.

La Figura 10 es una vista meridional de un álabe de rodete corto.

La Figura 11 es una vista en perspectiva del lado y la parte inferior de otra modalidad de un rodete corto.

La Figura 12 es una vista transversal del rodete corto mostrado en la Figura 11.

La Figura 13 es una vista en perspectiva del lado y la parte inferior de otra modalidad de un rodete corto que tiene un borde posterior invertido.

La Figura 14 es una vista transversal de un rodete corto mostrado en la Figura 13.

La Figura 15 es un gráfico que compara las eficiencias hidráulicas de un rodete corto y un rodete largo convencional.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS DIBUJOS

Las Figuras 4 y 5 ilustran un rodete corto 26 para una turbina Francis con álabes 30 que tienen un borde de ataque delantero. El rodete corto 26 gira en dirección (R) alrededor de un eje 28. La proporción de longitud de banda (L/D) es menor de 17% (0.17) y puede ser menor de 15% (0.15) y en un rango de 11% a 7% (0.11 a 0.07).

El rodete corto 26 incluye un grupo anular de álabes de rodete 30, una banda anular 32 y una corona 34. La dirección (R) es una dirección en sentido horario cuando el rodete 26 es visto desde la corona 34. La corona 34 puede tener una superficie de revolución que se extiende hacia la banda 32 a lo largo del eje 28 del rodete 26. Cada álabe 30 incluye un borde de ataque 36 y un borde posterior 40.

Los bordes de ataque 36 están en la entrada corriente arriba hacia el rodete 26 y están corriente abajo desde la carcasa en espiral y el distribuidor para agua y otro fluido hidráulico. Los bordes posteriores 40 están en el extremo corriente abajo del rodete 26 y hacen frente a un tubo de aspiración que puede estar corriente abajo del rodete 26. Las pseudo-líneas de corriente continuas 17 se muestran en el lado de succión de la ilustración del álabe, y las pseudo-líneas de corriente discontinuas 19 se muestran en el lado de presión de la ilustración del álabe. Las pseudo-líneas de corriente 17, 19 están para fines de ilustración, y no indican la estructura en las superficies de los álabes, ni representan las líneas de corriente reales.

Un primer borde 33 de cada álabe 30 se fija a la superficie exterior de la corona 34 y un segundo borde 38 se fija a una superficie interior de la banda 32. Las esquinas P, S del primer borde 33 están en la región corriente arriba y la región corriente abajo, respectivamente, de la superficie exterior de la corona. Las esquinas Q, T están en las regiones corriente arriba y corriente debajo de la banda 32, respectivamente.

La longitud de banda L es corta comparada con las bandas convencionales. Para acomodar la longitud de banda más corta L, la longitud del álabe se ha acortado a lo largo del borde 38. Una comparación de las Figuras 2 y 4 muestra que la longitud de banda L y la longitud del borde 38 de los álabes 30 del rodete corto 26 son más cortas que los álabes del rodete largo 9.

La curvatura del álabe 30, como se ilustra mediante las pseudo-líneas de corriente discontinuas 19 y las pseudo-líneas de corriente continuas 17, tiene proporciones para acomodar un borde corto 38 y una banda corta 32.

La Figura 6 ilustra el borde de ataque delantero 36 de cada álabe 30. En un borde de ataque delantero 36, la esquina Q del borde en la banda 32 es forma ángulo frente a la esquina P en la corona 34, en la dirección de rotación R del rodete. Un ángulo de inclinación (θ) es el ángulo entre las esquinas Q y P del borde de ataque 36 del álabe 30 que se mide desde el eje 28 del rodete corto 26 hacia las esquinas Q y P. Un ángulo de inclinación positivo existe cuando la esquina P está por delante de la esquina Q en la dirección de rotación R. Un ángulo de inclinación negativo ($\theta < 0^\circ$), tal como se muestra en la Figura 6, indica un borde de ataque delantero.

Una unión de borde de ataque delantero Q desplaza la carga hidráulica del álabe lejos de la banda 32 y hacia la corona 34. Este desplazamiento reduce la carga hidráulica cerca de la banda 32 y reduce de este modo el riesgo de cavitación en la banda 32 y las porciones de los álabes 30 cerca de la banda 34. El desplazamiento de la carga hidráulica hacia la corona 34 proporciona además una carga más uniforme a lo largo del tramo del álabe 30.

Las Figuras 7, 8 y 9 son vistas de un álabe 30 en el rodete corto 26 desde diferentes puntos de vista. El álabe 30 se puede apreciar en forma de "V" en la vista mostrada en la Figura 7, visto en un ángulo que se ve hacia el lado de succión del álabe 30. El borde 33 del álabe 30 se une a la corona y el

borde 38 se une a la banda. Las esquinas P, Q, S y T del álabe corresponden con las esquinas mostradas en las Figuras 4, 5 y 6.

La Figura 10 es una vista meridional de un rodete corto para ilustrar el borde de ataque 36 y el borde posterior 40 del álabe 30, mostrados en las Figuras 7 a 9. El borde 33 del álabe 30 se muestra en contacto con una línea de perfil 42 que representa la superficie exterior de la corona 34. El borde opuesto 38 del álabe 30 está en contacto con una línea de perfil 44 de la superficie interior de la banda. El eje vertical (Z) del gráfico representa el eje de rotación y el radio horizontal (r) representa la distancia desde el eje 28 del rodete hacia la unión del borde posterior con la banda (punto T).

Una inversión del borde posterior 40 en el álabe corto 30 es evidente desde la curvatura del borde posterior 40 en comparación con una línea recta 46 entre las esquinas de S y T del borde posterior. El borde posterior 40 tiene una forma curvada hacia el borde de ataque 36 del álabe 30. En contraste con el borde posterior invertido, un borde posterior convencional 20 (mostrado en líneas discontinuas en la Figura 10) se curva lejos del borde de ataque 36 y de este modo se arquea hacia fuera lejos de la línea recta 46.

El borde posterior invertido 40 acorta la longitud del álabe 30, particularmente en la región de alcance medio (M) del álabe. Acortar el álabe 30 reduce el área de superficie mojada 30, y reduce de este modo la fricción hidráulica entre los álabes 30 y el agua. La fricción reducida aumenta la

eficiencia de la turbina Francis en la conversión de energía en el agua a esfuerzo de torsión aplicado al eje.

El área total de superficie mojada del rodete corto se puede reducir en comparación con el área de superficie mojada de un rodete largo convencional en quince por ciento (15%) o más. La reducción del área de superficie mojada del rodete corto se debe a la banda más corta y álabes más cortos en comparación con un rodete largo convencional. La reducción del área de superficie mojada se torna incluso mayor, por ejemplo, más de veinte por ciento (20%), invirtiendo los bordes posteriores de los álabes en el rodete corto.

La fricción de la superficie hidráulica se puede cuantificar midiendo el esfuerzo de cizallamiento en las superficies mojadas de un rodete. El esfuerzo de cizallamiento en las superficies es un resultado de la fricción entre el agua que fluye sobre las superficies mojadas del rodete, y la superficie del rodete. Reducir el área de superficie reduce el área en la que se produce el esfuerzo de cizallamiento por el agua para crear fricción hidráulica. El área de superficie mojada reducida de un rodete corto puede reducir el esfuerzo de cizallamiento hidráulico integrado en la superficie en treinta por ciento (30%) o más en comparación con un rodete largo. Reduciendo la cantidad del esfuerzo de cizallamiento hidráulico, se reducen las pérdidas de energía debido a la fricción y de este modo más energía se puede convertir en un esfuerzo de torsión para accionar el eje del rodete.

Las Figuras 11 y 12 muestran otra modalidad de un rodete corto 48. El rodete 48 está adaptado para recibir un eje 60. Los álabes 50 tienen cada uno un borde de ataque delantero 52 con esquinas P y Q. El borde posterior 54 de cada álabe 50 se muestra y tiene una curvatura que se curva lejos del borde de ataque 52. El extremo corriente abajo de la corona 58 es perpendicular al eje 28 del rodete 48. La banda 62 puede tener una superficie cilíndrica exterior que es escalonada para ajustarse al anillo inferior estacionario en la turbina Francis.

Las Figuras 13 y 14 muestran otra modalidad de un rodete corto 64 que es similar al rodete corto 48 mostrado en las Figuras 11 y 12, excepto por el borde posterior 66. El borde posterior 66 del rodete corto 64 está invertido como es evidente del borde curvado entre los bordes T y S del borde posterior 66 que se curva hacia el borde de ataque 52.

La Figura 15 es una comparación gráfica de la eficiencia hidráulica de un rodete largo convencional con la de un rodete corto tal como los rodetes 26, 48 y 64. La eficiencia en el eje y es normalizada con la eficiencia pico del rodete largo convencional. La descarga en el eje x es normalizada con la descarga de la eficiencia pico. La eficiencia de rendimiento 68 del rodete corto es consistentemente más alta que la eficiencia de rendimiento 70 de un rodete largo convencional. La eficiencia está definida como la proporción de la energía que se convierte en esfuerzo de torsión en el eje, con la energía que entra en el sistema hidráulico en la entrada de la carcasa en espiral menos la energía que sale del sistema hidráulico en la salida del tubo de aspiración.

El rodete corto también puede ser usado en una turbina horizontal. Un rodete corto para una turbina horizontal tendría en cambio un eje horizontal como el eje de un rodete. Un rodete corto puede desempeñarse de modo que las ventajas de un rodete corto en una turbina vertical también se ven en una turbina horizontal.

Además, los rodetes sin banda (sin refuerzo) pueden tener un álabe corto y un borde de ataque delantero. Se pueden usar rodetes sin banda en las turbinas Francis y Kaplan. El borde de ataque delantero de un rodete sin banda se puede definir por tener un borde de ataque en la periferia exterior del rodete que está por delante de donde el borde de ataque se une a la corona en la dirección giratoria del rodete sin banda.

Un rodete corto sin banda tiene una proporción de longitud de periferia del rodete que es menos de 17% (0.17). La proporción de longitud de la periferia (L/D) es una proporción entre una longitud (L) que es una distancia medida entre un distribuidor inferior del rodete a un punto del borde posterior en la periferia exterior del rodete, y el diámetro (D) que es un diámetro exterior del rodete sin banda, el cual es un diámetro del rodete en una periferia exterior del rodete.

Los bordes periféricos exteriores de los álabes cortos en el rodete sin banda se pueden adaptar para hacer frente a una superficie de un anillo inferior de una carcasa estacionaria, y los álabes se pueden adaptar para no dejar que el agua fluya entre el borde periférico del álabe y la superficie de la carcasa

estacionaria. Por ejemplo, los bordes periféricos exteriores de los álabes cortos pueden formar un sello contra una superficie estacionaria. El rodete corto sin banda tiene ventajas similares que el rodete corto con una banda.

Las ventajas de un rodete corto en una turbina pueden incluir, y no se limitan a, proporcionar un rodete de peso más ligero, reducir la fricción hidráulica, aumentar la eficiencia hidráulica y mantener un comportamiento de cavitación aceptable.

Si bien la invención se ha descrito en conexión con lo que actualmente se considera la modalidad más práctica y preferida, tiene que entenderse que la invención no debe limitarse a la modalidad divulgada, sino por el contrario, está destinada a cubrir varias modificaciones y disposiciones equivalentes incluidas dentro del espíritu y ámbito de las reivindicaciones que se acompañan.