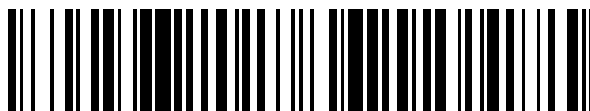


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 541 666**

51 Int. Cl.:

F03D 11/00 (2006.01)

F03D 3/06 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.02.2009** **E 09713132 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2015** **EP 2304232**

54 Título: **Procedimiento para el dimensionado de una instalación eólica de energía**

30 Prioridad:

18.02.2008 DE 102008009740

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.07.2015

73 Titular/es:

IMO HOLDING GMBH (100.0%)
Imostrasse 1
91350 Gremsdorf, DE

72 Inventor/es:

SCHRÖPPEL, WERNER

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 541 666 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para el dimensionado de una instalación eólica de energía

El invento se refiere a un procedimiento según la reivindicación 1 para el dimensionado de una instalación eólica de energía cuya potencia eléctrica nominal $P_{W,nom}$ sea igual o mayor que 1,5 MW y/o cuyo diámetro del rotor sea igual o mayor que 70 m y/o que posea al menos un cojinete de la hoja del rotor con un diámetro D_{pw} de rotación 1.500 mm o superior, pudiendo ser ajustadas también las hojas del rotor para minimizar la carga estructural estática y/o dinámica y/o la amortiguación de oscilaciones, generando por ejemplo fuerzas antagonistas para la compensación de fuerzas y pares perjudiciales, aun cuando no lo exija una velocidad v_8 constante del viento.

Las instalaciones eólicas de energía se componen usualmente de una torre alta en cuya punta se halla una góndola, que puede girar alrededor de un eje vertical. En ella se halla un generador, cuyo rotor está acoplado con un cubo de rotor, que se halla en el extremo delantero de la góndola y posee varias hojas de rotor, que sobresalen aproximadamente en el sentido radial, que recogen el viento y que debido a su ángulo de ataque animan el rotor con un movimiento de rotación.

A pesar de que esta técnica dio entretanto buenos resultados en miles de casos, existen a pesar de ello determinados inconvenientes, que el preciso tener en cuenta en el proyecto. Un grave inconveniente es que la torre, por ejemplo con altura de 80 m, no puede ser construida por naturaleza de una manera totalmente rígida, sino que representa una estructura capaz de oscilar con una frecuencia de resonancia propia. Estas oscilaciones pueden ser generadas por todos los factores posibles, por ejemplo por rachas de viento aire o durante un huracán, etc. Para que la torre pueda soportar estas oscilaciones sin destrucción se construye usualmente de una manera muy maciza, lo que causa considerables costes adicionales. A pesar de ello, la góndola de una instalación eólica de energía oscila con frecuencia un metro e incluso más de un lado para otro, lo que en modo alguno es ventajoso para la estructura de la torre, que es usualmente de acero y/o de hormigón, pero también para la estructura de la caseta de la torre (góndola) y el cubo del rotor.

El documento WO 01/77524 A1 intenta soslayar en lo posible estas oscilaciones evitando en lo posible un número de revoluciones correspondiente a la frecuencia propia de la torre. Sin embargo, esto no tuvo éxito, ya que la frecuencia propia de una construcción de torre también es excitada por otras frecuencias, dado que el sobreincremento de la frecuencia no equivale a una punta estrecha, sino que es relativamente ancha, es decir, que cubre una banda de frecuencias no desdeñable.

Además, es preciso tener en cuenta, que el aire, que ataca el rotor de una instalación eólica de energía depende de altura debido a la fricción contra el suelo y ello de tal modo, que en la zona inferior próxima al suelo de la instalación reina una velocidad menor, mientras que en la zona superior reina una velocidad mayor. Por esta razón ataca, incluso con una corriente laminar con velocidad no variable en el tiempo, en una hoja de rotor, dirigida verticalmente hacia arriba una fuerza mayor que en la dirigida verticalmente hacia abajo.

Esto conduce en una instalación eólica de energía con una hoja a una fuerza transversal oscilante sobre la torre y con ello a una oscilación de flexión, que se compone de una componente estática así como de una componente periódica, cuya duración del periodo equivale al valor inverso del número de revoluciones del rotor. En las instalaciones eólicas de energía con más de una hoja decrece la componente periódica con relación a la desviación estática y se anula siempre que con una cantidad suficiente de hojas las hojas cubran totalmente la zona de rotación barrida por ellas. Para las instalaciones eólicas de energía con tres hojas se puede demostrar, sin embargo, que el momento de flexión sobre la torre resultante de una corriente laminar no variable en el tiempo depende de acuerdo con la ecuación siguiente del ángulo de rotación del rotor y con ello del número de revoluciones del rotor:

$$M = A - B \cos(2\varphi) - C \sin(b\varphi)$$

respectivamente $M = A - B \cos[(2\pi/60)2nt] - C \sin[(2\pi/60)bnt]$

en la que

M = Momento de flexión

A, B, C = Factores constantes

b = Cantidad de hojas de rotor

φ = Ángulo de rotación del rotor

n = Número de revoluciones del rotor

t = Tiempo

El momento de flexión contiene en este caso, además de la desviación estática dos componentes periódicas, que con una frecuencia doble del rotor, respectivamente una frecuencia del rotor multiplicada con la cantidad de hojas

del rotor anima la torre de la instalación eólica de energía con oscilaciones de flexión. Debido estas dos componentes periódicas con una frecuencia distinta en un factor de por ejemplo 1,5 apenas es posible barrer con rapidez el margen de resonancia de la construcción de la torre, de manera, que la propuesta según el documento WO 01/77524 A1 no es practicable.

- 5 Por otro lado, el movimiento de flexión debido a los elementos rotativos genera fuerzas giroscópicas, que se manifiestan en forma de un par alrededor del eje de la torre. Además, para el par de giro del rotor también es preciso prever una componente periódica, que a través del apoyo del generador y/o del engranaje conduce a una excitación de flexión adicional de la torre. Debido a la dependencia de la altura de la velocidad del viento es, por ello, preciso prever pares de giro dependientes del número de revoluciones en las tres direcciones de las coordenadas así como
- 10 fuerzas transversales horizontales.

Por otro lado, con el ajuste en función del ángulo de rotación de la posición de las hojas del rotor es posible reducir la influencia del gradiente del viento en la fuerza del viento así como las oscilaciones provocadas por él y con ello los esfuerzos, que actúan sobre los componentes, que se hallan en el flujo de fuerzas, en especial de la torre.

- 15 Por ello, algunos inventores ya propusieron reducir los esfuerzos, que actúan sobre la torre de una instalación eólica de energía, debido en especial a estas oscilaciones contrarrestándolos de una manera activa. El documento EP 1 701 034 A2 por ejemplo describe un procedimiento para generar en función de las oscilaciones pendulares de la torre de una instalación eólica de energía por medio de una orientación distinta, en especial en contrafase de las hojas del rotor una fuerza con la fase correcta para el frenado de las oscilaciones. El contenido de la divulgación del documento DE 101 13 038 A1 es análogo.

- 20 El documento DE 197 39 164 A1 intenta compensar los momentos de guiñada y de cabeceo.

El documento WO 01/33075 A1 así como el documento WO 2007/104306 A1 describen medidas para compensar en lo posible los esfuerzos asimétricos, que actúan sobre el rotor y con ello sobre la totalidad de la estructura de apoyo, provocados por cargas (vientos) distintos ajustando las hojas del rotor de una manera definida.

- 25 Sin embargo por los anteriores inventores no fue tenido en cuenta hasta ahora, que una instalación eólica de energía es, contemplando sólo su comportamiento mecánico, un sistema muy complejo. Por ejemplo, las oscilaciones de la estructura de apoyo son tanto más críticas, cuanto mayor es la masa en el extremo superior de la torre, ya que con ella se reduce la frecuencia de resonancia de las oscilaciones mecánicas de la torre y, por naturaleza, las oscilaciones de baja frecuencia poseen mayor energía que las de alta frecuencia. Por ello es preciso, que la masa en la zona de la góndola y del rotor se mantenga lo más pequeña posible. Esto es válido para todos los
- 30 componentes allí instalados, en especial también para el rotor y todos sus componentes, por ejemplo también para todos los cojinetes, es decir el cojinete principal del rotor así como los cojinetes de las hojas del rotor. Por ello no se pueden sobredimensionar arbitrariamente estos componentes sin tener que aceptar graves inconvenientes en la estática. Este problema es tanto mayor, cuanto mayor es la instalación eólica de energía, es decir, cuando la potencia $P_{W,nom}$ eléctrica nominal de la instalación es igual o mayor que 1,5 MW y/o cuando el diámetro del rotor es
- 35 igual o mayor que 70 m y/o cuando en al menos un cojinete de la hoja del rotor el diámetro $D_{p,w}$ de la circunferencia de rotación, es decir el diámetro de todas la línea de circunferencia, que pasa por los centros de todos los cuerpos rodantes de un hilera, es igual o mayor que 1.500 mm.

- Además, una acción "activa" de contrarresto de esta clase de los ángulos de ataque de las hojas del rotor puede reducir las oscilaciones de la torre; por otro lado, el ajuste de las hojas del rotor relativamente frecuente debido a ello
- 40 crea para los cojinetes de las hojas requerimientos totalmente diferentes de la actual técnica "pasiva", en la que el ajuste de las hojas del rotor sólo tenía lugar como respuesta a condiciones de viento distintas.

- Los cojinetes de las hojas de rotor utilizados usualmente no soportan estos esfuerzos y por ello se desgastan rápidamente, problema, que no pudo ser solucionado hasta ahora. Dado que el desmontaje de un cojinete defectuoso está ligado a un coste elevado, en la práctica se prescindió hasta ahora llevar a la realidad los conceptos
- 45 "activos" de regulación teóricamente ya muy elaborados para la reducción de las oscilaciones de la torre.

- De estos inconvenientes del estado de la técnica descritos surge el problema inicial del invento de la manera cómo se pueden minimizar los esfuerzos, que actúan sobre la estructura de la torre y de la góndola de una instalación eólica de energía, respectivamente cómo se pueden minimizar las oscilaciones, sin que a consecuencia de ello se tenga que temer un desgaste inadmisiblemente grande o incluso el fallo de elemento esenciales para el funcionamiento, respectivamente de las hojas del rotor dentro de la vida útil de la instalación eólica de energía, generalmente de 20 años, exigida..
- 50

- La solución de este problema se logra con un procedimiento según la reivindicación 1 para el dimensionado de una instalación eólica de energía, cuya potencia $P_{W,Nenn}$ sea igual o mayor que 1,5 MW y/o cuyo diámetro del rotor sea igual o mayor que 70 m y/o que posea al menos un cojinete de la hoja del rotor con un diámetro D_{pw} de la circunferencia de rodadura de 1.500 mm o más, pudiendo ser ajustadas las hojas del rotor para minimizar la carga estructural y/o dinámica y/o para la amortiguación de oscilaciones generando por ejemplo fuerzas antagonistas para la compensación de fueras y momentos perjudiciales incluso, cuando con una velocidad v_8 constante del viento no fuera necesario, por el hecho de que para el apoyo de las hojas del rotor se utilicen siempre rodamientos
- 55

optimizados para una vida útil dinámica grande debido a que la totalidad de la capacidad $C_{a,tot}$ de carga dinámica definida según DIN ISO 281 de todas las hileras (μ), que participan en la transmisión de fuerzas en una dirección axial de un rodamiento según DIN ISO 281 equivalga al menos a 1,5 veces, con preferencia al menos a 1,55 veces, en especial a 1,6 veces la capacidad $C_{a,ref}$ de carga según DIN ISO 281 de un acoplamiento giratorio de bolas con dos hileras con un volumen de construcción comparable calculado a partir de la superficie de la sección transversal del rodamiento (sin tener en cuenta los espacios huecos dentro de él) multiplicada con contorno del centro de gravedad de la superficie así como con bolas idénticas entre sí en las dos hileras y con un ángulo portante de 45°.

$$C_{a,tot} \geq k_1 * C_{a,ref}$$

en la que $k_1 = 1,5$, con preferencia $k_2 = 1,55$, en especial $k_2 = 1,6$.

Con ello se corresponde con un dimensionado según el que la vida L_{10} útil nominal calculada según DIN ISO 281 de un rodamiento utilizado es al menos 3,375 veces con preferencia al menos 3,75 veces, en especial al menos 4,0 veces de la vida $L_{10,ref}$ según DIN ISO 281 de un acoplamiento rotativo con dos hileras de bolas con dimensiones comparables desde el punto de vista de la superficie se la sección transversal del cojinete y del perímetro en el centro de gravedad de la superficie así con bolas idénticas entre sí en las dos hileras y con un ángulo de apoyo de 45°:

$$L_{10} = C_{a,tot}/P_a \geq k_2 * L_{10,ref}$$

en la que $k_2 = 3,375$, con preferencia $k_2 = 3,75$, en especial $k_2 = 4,0$.

Los estudios confirmaron, que con la vida útil incrementada de esta manera se compensa la merma debida a la carga más intensiva a consecuencia de la rodadura frecuente sobre el tramo de la pista de rodadura sometida a una carga máxima, fundamentalmente para la vida útil, de manera, que resulta una vida útil real suficiente para su utilización como cojinete del rotor.

Un cojinete según el invento para la hoja del rotor representa una construcción especial optimada para una cantidad de rodaduras alta y con ello para una mayor vida útil en las mismas condiciones El técnico dispone ahora de una fórmula clara para el cálculo del cojinete apropiado para una hoja de rotor de una instalación eólica de energía dada, también o precisamente, cuando se procede, para minimizar los esfuerzos estáticos y dinámicos de la estructura de apoyo, a un ajuste frecuente del ángulo de ataque de la hoja del rotor. Por medio del acoplamiento rotativo con bolas de referencia representado en la figura 6 en una sección transversal, que se puede ampliar o reducir a escala, es decir sin variación de las relaciones de las longitudes, a los tamaños deseados de F_Q (superficie de la totalidad de la sección transversal del anillo sin los intersticios) y de $R_{F,SP}$ (radio del centro de gravedad de la superficie de la sección transversal) se puede calcular para cada aplicación definida por F_Q y $R_{F,SP}$ un valor de referencia para la capacidad de carga axial dinámico, que debe ser rebasado después al menos en el factor 1,5. Aquí es preciso tener en cuenta, que el producto $F_Q * 2 * \pi * R_{F,SP}$ equivale aproximadamente al volumen V del correspondiente cojinete de la hoja del rotor y que con ello define, desde el punto de vista de su volumen V , pero también aproximadamente desde el punto de vista de su masa m cojinetes de referencia comparables con una forma geométrica igualmente definida, es decir normalizada de la sección transversal del cojinete de acuerdo con la figura 6.

En todo dimensionado de un cojinete entra una gran cantidad de factores, por ejemplo los materiales, la clase y la forma geométrica de los cuerpos rodantes y de las pistas de rodadura, la cantidad d cuerpos rodantes en cada hilera así como la cantidad de hileras, etc. En cada caso se pueden comparar por medio de las magnitudes prefijadas así como por medio de las fórmulas recogidas en la norma DIN 281, que para hileras de bolas e hileras de rodillos se repiten en la parte especial de la descripción, la capacidad de carga dinámica axial con el valor de referencia según el invento.

Una característica, que no carece de importancia, es que los elementos de acoplamiento con forma de anillo de un cojinete según el invento para la hoja del rotor debería ser de un acero bonificado, que se bonificó y fue revenido así como eventualmente tratado térmicamente después.

Además, hay otro factor, que merece atención, según el que la superficie de las pistas de rodadura deberían ser templadas con un espesor de la capa templada de al menos 1/20 del diámetro de los correspondientes cuerpos rodantes. Sólo con ello se asegura, que un cojinete de esta clase alcance una vida útil alta a pesar de la torsión constante. Además, las pistas de rodadura no deben poseer en el sentido del contorno del cojinete protuberancias o cavidades, decir no deben poseer desviaciones de la forma circular ideal.

El invento prevé, además, que para el apoyo giratorio de las hojas del rotor se utilicen en el cubo del rotor acoplamientos rotativos con una, dos o más hileras de cuerpos rodantes, que sufran una compresión de Hertz lo más pequeña posible y que pueden durar más tiempo, siempre que con el dimensionado se observe la fórmula de la patente. En relación con ello parece también especialmente importante, que el diámetro de los cuerpos rodantes, que transmiten las fuerzas axiales y también los momentos de los cuerpos rodantes, que transmiten las fuerzas y los momentos de vuelco no posean un valor inferior a 15 mm.

El invento recomienda, además, que para el apoyo rotativo de las hojas del rotor se utilicen en el cubo del rotor acoplamientos rotativos con varias hileras de cuerpos rodantes, utilizando para la transmisión de fuerzas de presión axiales, fuerzas de tracción axiales y fuerzas radiales distintos cuerpos rodantes. En este caso es recomendable disponer una hilera de cuerpos rodantes para la transmisión de fuerzas radiales en la dirección axial entre dos hileras de cuerpos rodantes con preferencia idénticas, que sirvan para la transmisión de fuerzas de presión axiales, por un lado, de fuerzas axiales de tracción, por otro, así como también de momentos de vuelco (combinación de fuerzas de tracción y de presión en diferentes zonas, con preferencia diametralmente opuestas del contorno del cojinete). La capacidad de carga axial en el sentido de tracción y en el de presión tiene por ello aproximadamente el mismo valor. Además, en este caso sería preciso tener en cuenta, que un elemento de acoplamiento, que rodeara axialmente las dos hileras exteriores de cuerpos rodantes, debería ser construido partido, si bien en una zona entre la hilera central de cuerpos rodantes y una de las dos hileras exteriores de cuerpos rodantes, es decir con relación a la hilera central de cuerpos rodantes en la dirección axial hacia uno de los lados frontales del cojinete, con preferencia desplazado hacia el más próximo, de manera, que la hilera central de cuerpos rodantes, que absorbe las fuerzas radiales, sólo entre en contacto con uno de los dos anillos parciales del elemento de acoplamiento circundante y ello con preferencia desde el punto de vista de la totalidad de la superficie de los cuerpos rodantes, es decir en el caso de cuerpos rodantes conforma de rodillo tanto desde el punto de vista de su superficie envolvente, como también desde el punto de vista de sus superficies frontales.

Por otro lado, se debe tener en cuenta, que para el apoyo giratorio de las hojas del rotor en el cubo de rotor se utilicen siempre acoplamientos rotativos, cuya capacidad de carga axial (en la dirección de presión y/o en la de tracción así como en el caso de momentos de vuelco) sea mayor que su capacidad de carga radial. Se comprobó, que esto se corresponde con el perfil de requerimientos de un cojinete de hoja de rotor, ya que en él la carga axial y la carga producida por el momento de vuelco predomina claramente sobre la carga radial.

Además, dos cuerpos rodantes adyacentes en el sentido periférico deberían estar separados entre sí por medio de distanciadores o por elementos de jaula con separaciones uniformes, por ejemplo por medio de elementos de jaula con una superficie de base abombada, que se extienda dentro, respectivamente a lo largo de una superficie envolvente cilíndrica. Evitando un desplazamiento de las bolas a lo largo de la pista de rodadura también se evita un desgaste prematuro.

El invento prevé, además, para el apoyo rotativo de las hojas del rotor en el cubo del rotor la utilización de acoplamientos rotativos con dos elementos con forma de anillo concéntricos entre sí y giratorios uno con relación al otro, de los que uno sirve para el acoplamiento con el cubo del rotor y el otro para el acoplamiento con una hoja del rotor.

El invento puede ser perfeccionado en el sentido de que el elemento con forma de anillo situado exteriormente en el sentido radial para el acoplamiento con el cubo del rotor esté unido con el cubo del rotor y que el elemento con forma de anillo situado interiormente en el sentido radial esté acoplado, por el contrario, con la hoja del rotor, de manera, que los cuerpos rodantes se hallen exteriormente en el sentido radial con relación a las circunferencias de taladros para la unión con tornillos con la hoja del rotor.

Otras ventajas se desprenden del hecho de que los lados frontales orientados en la misma dirección axial de los dos elementos de acoplamiento estén desplazados uno con relación al otro, de manera, que el anillo unido con la hoja del rotor no pueda rozar a lo largo del cubo del rotor.

Un intersticio con forma de ranura corrida remanente entre los dos elementos de acoplamiento debe ser hermetizado en los dos lados frontales del acoplamiento rotativo y ser llenado con un lubricante, en especial grasa de lubricación. La grasa tiene frente al aceite la ventaja de que se puede hermetizar con mayor facilidad. Por el contrario, el lubricante es obligado permanentemente a penetrar entre los cuerpos rodantes y sus pistas de rodadura.

Además, con (cada) uno o los dos elementos de acoplamiento con forma de anillo puede estar unido o se puede unir, con preferencia con unión cinemática de fuerza o de forma, por ejemplo conformado en él o unido con él por medio de tornillos o aprisionado con unión cinemática de fricción, un elemento de refuerzo, por ejemplo un anillo de refuerzo. Un anillo de refuerzo de esta clase puede asentar plano en un lado frontal, en especial una superficie de acoplamiento. No tiene que ser simétrico de rotación, sino que puede estar adaptado a la distribución preferida de las fuerzas en una hoja de rotor durante el ataque por el viento, por ejemplo con una forma elíptica u ovoidea de la sección transversal y/o de la superficie de base. Un anillo de refuerzo de esta clase también puede poseer orificios para reducir su peso. La asimetría también puede ser configurada de tal modo, que se puedan corregir diferentes elasticidades de la construcción del acoplamiento por medio de gruesos y/o de contornos diferentes.

El ajuste de las hojas del rotor para minimizar la carga estructural y/o para amortiguar oscilaciones puede tener lugar en el marco de un mando y/o de una regulación; sin embargo, con preferencia en función de una señal de al menos un sensor de una magnitud (perturbadora), que represente un valor de las oscilaciones de la torre o de lugar a ellas. El invento prefiere la utilización de un circuito de regulación de orden superior y extraer de él señales de excitación de los motores de ajuste de las diferentes hojas del rotor, por ejemplo por medio de fórmulas, tablas, curvas características o análogos almacenadas. Sin embargo, también es posible utilizar para cada hoja del rotor un mando propio o un circuito de regulación propio. Este podría subyacer en un mando o una regulación de orden superior

para transformar los datos globales de un circuito de regulación de orden superior para cada hoja del rotor de acuerdo con su desplazamiento angular de $360^\circ/b$ (con b = cantidad de hojas del rotor) en señales de excitación desplazadas mutuamente en la fase. En la mayoría de los casos existen tres hojas de rotor, pero algunas veces también dos o cuatro o más. En este caso se generaría en el mando o en la regulación una señal de excitación, que en cualquier caso contendría componentes espectrales no despreciables con la frecuencia doble y/o triple, en general b veces, del número de revoluciones del rotor, es decir, que la amplitud de al menos una de estas componentes espectrales ($2 \cdot n \cdot 2\pi/60$, respectivamente $3 \cdot n \cdot 2\pi/60$ o $b \cdot n \cdot 2\pi/60$) es mayor que la amplitud de cualquier otra componente espectral.

De acuerdo con el invento se utiliza como señal de entrada de un circuito de mando o de regulación para el ajuste de una hoja del rotor al menos un sensor, que se halle sobre, en o dentro de la instalación eólica de energía.

Para ello entra en consideración por ejemplo un sensor dispuesto en la parte superior de la torre para detectar las oscilaciones de la góndola. Para ello se pueden utilizar láser dispuestos en el centro de la torre en su suelo, que radien verticalmente hacia arriba así como elementos fotosensibles debajo de la góndola, que recojan el rayo del láser y sobre la base del desplazamiento de la mancha de luz puedan determinar la desviación momentánea de la góndola. Pero también se podrían montar en el extremo superior de la torre sensores GPS con funcionamiento exacto capaces de determinar exactamente la posición con una precisión de pocos centímetros (por ejemplo los conocidos GPS diferenciales). Cabe imaginar otros tipos de sensor, por ejemplo sensores de aceleración o sensores de deformación.

Otra señal y/o señal adicional es derivada de al menos un sensor de posición, respectivamente del ángulo acoplado con el árbol principal del rotor. Con ello se puede determinar la posición de cualquier hoja del rotor para determinar a partir de ella su influencia en las perturbaciones y/o su potencial fuerza antagonista. Aquí es preciso tener en cuenta, que la fuerza del viento, que actúa sobre una hoja de rotor en rotación tiene como consecuencia, debido a su movimiento de rotación, una fuerza giroscópica dirigida aproximadamente en sentido perpendicular a ella, que, por lo tanto, varía permanentemente dependiendo de la correspondiente posición de la hoja del rotor. Por esta razón es preciso, que una fuerza antagonista considerada necesaria por un circuito de mando o de regulación se reparta en cada instante de manera distinta entre las diferentes hojas del rotor.

También la señal de al menos un sensor dispuesto en la parte superior de la torre de la instalación eólica de energía para la velocidad del viento y/o su dirección es utilizada en el marco de un mando según el invento como magnitud de entrada a modo de una adición de magnitudes perturbadoras ya que a partir de sus valores previstos se puede determinar, respectivamente estimar las cargas asimétricas, que actúan sobre el rotor con todos sus rotores.

Para minimizar la carga estructural y/o para la amortiguación de oscilaciones también se presta la señal de al menos un sensor, que no se halle en o dentro de la instalación eólica de energía, sino que se halle de manera desplazada, por ejemplo, en o dentro de una instalación eólica de energía próxima. En especial, cuando estos sensores se instalan en el sentido contrario al del viento delante de la instalación eólica de energía a mejorar, pueden suministrar a esta una información de las variaciones futuras de la velocidad del viento, que ya se produjeron en la ubicación del sensor y ya fueron registradas por este sensor. Para ello se prestan también sensores de las variaciones del movimiento del aire, por ejemplo sensores de infrarrojos o láser.

Un procedimiento según el invento para el dimensionado de un cojinete de hoja de rotor para una instalación eólica de energía con varias hojas de rotor, que pueden ser ajustadas independientemente entre sí y que para minimizar la carga estructural y/o amortiguar las oscilaciones incluso, cuando una velocidad v_8 constante del viento no lo exija, se caracteriza por el hecho de que para el cojinete de las hojas del rotor se utiliza un rodamiento optimizado para una elevada cantidad de rodaduras por el hecho de que su capacidad de carga axial según DIN ISO 281 equivale al menos a 1,5 veces al capacidad de carga axial según DIN ISO 281 de un acoplamiento rotativo con bolas con dimensiones comparables y/o por el hecho de que su vida útil calculada según DIN ISO 281 equivalga al menos a 4 veces la vida útil calculada según DIN ISO 281 de un acoplamiento rotativo con bolas de esta clase.

En relación con ello se debe entender el concepto "dimensionado de un cojinete para una hoja de rotor" como idea principal de la concepción de una instalación de esta clase, pero también para la realización real de una instalación de esta clase.

Otras características, propiedades, ventajas y efectos basados en el invento se desprenden de la descripción que sigue de una forma de ejecución preferida del invento así como del dibujo. En él muestran:

La figura 1, un cojinete dimensionado según los principios del presente invento para la hoja del rotor de una instalación eólica de energía.

Las figuras 2 a 5, diferentes casos de carga de una instalación eólica de energía con cojinetes de las hojas del rotor según el invento, que se pueden minimizar con el invento.

La figura 6, un acoplamiento rotativo con bolas con dos hileras con una forma geométrica de cuatro puntos de la pista de rodadura en las dos pistas de rodadura, como la que se utilizó hasta ahora de manera típica en el estado de

la técnica como cojinete para la hoja del rotor y que puede servir como cojinete de referencia para los cálculos de comparación.

Un componente importante para el concepto según el invento es un cojinete 1 para hoja de rotor con una cantidad de rodaduras grande. Se compone de dos elementos 2, 3 de acoplamiento con forma de anillos concéntricos entre sí. Los dos anillos 2, 3 poseen taladros 4, 5 repartidos a modo de corona para el paso de tornillos, espárragos o análogos, que, por un lado, están anclados, es decir roscados en una hoja del rotor y, por otro, en el cubo del rotor. Con preferencia, el anillo 2 interior está unido con la hoja del rotor y el anillo 3 exterior con el cubo del rotor. Entre los dos elementos 2, 3 de acoplamiento con forma de anillo se halla una ranura 4. Los, dos elementos 2, 3 de acoplamiento se componen con preferencia de un acero bonificado, es decir, que están revenidos y tratados térmicamente.

En especial los lados 4, 5 frontales superiores de los dos elementos 2, 3 de acoplamiento con forma de anillo no se hallan en un plano común, sino que están desplazados por ejemplo 5 a 15 mm uno con relación al otro. Lo mismo es válido con preferencia para los lados 7, 8 frontales inferiores de los dos elementos 2, 3 de acoplamiento con forma de anillo. La superficie 5, 8 frontal sobresaliente se une con tornillos con las partes adyacentes de la instalación eólica de energía, es decir la hoja del rotor o el cubo del rotor. La superficie 6, 7 frontal desplazada algunos milímetros hacia atrás del otro anillo 2, 3 no puede rozar, por lo tanto, con el elemento de la instalación no unido con él.

Como cuerpos rodantes se utilizan en el cojinete 1 para la hoja del rotor representado a título de ejemplo rodillos 9, 10, 11, lo que, sin embargo, no es vinculante. En el ejemplo representado existen en total tres hileras de cuerpo rodantes 9, 10, 11 con forma de rodillo. Estos ruedan sobre tres pistas de rodadura en lados distintos de una prolongación 12 con forma de collar con sección transversal aproximadamente rectangular en el lado interior orientado hacia la ranura 4 de un elemento 3 de acoplamiento con forma de anillo. Las pistas de rodadura opuestas se hallan en los tres lados de una cavidad conformada, igualmente con sección transversal aproximadamente rectangular, en el anillo 2 enfrentado. Las pistas de rodadura poseen superficies templadas, bien por templado por inducción o por templado a la llama hasta una profundidad de al menos 1/20 del correspondiente diámetro del rodillo.

Los rodillos 9, 10 situados por encima y por debajo del collar 12 poseen ejes 13 de rotación, que se extienden radialmente con relación al eje de rotación del cojinete 1, mientras que la tercera hilera de rodillos 11 en la superficie envolvente del collar 12 posee ejes de rotación paralelos con relación al eje de rotación del cojinete. Estos rodillos 11 poseen diámetros más pequeños que los rodillos 9, 10, respectivamente sólo la mitad o menos del diámetro, con preferencia sólo un tercio o menos del diámetro de los rodillos 9, 10, en especial sólo un cuarto o menos del diámetro de los rodillos 9, 10, de manera, que la capacidad de carga axial (estática) del cojinete 1 es mayor que la fuerza radial (estática) que puede ser transmitida. Los rodillos 9, 10 situados por encima y por debajo del collar tienen cada uno un diámetro de 15 mm o más.

Para facilitar el ensamblaje se construye partido a lo largo de un plano central el elemento 2 de acoplamiento situado frente al elemento 3 de acoplamiento con el collar 12 conformado en él.

La ranura 4 se hermetiza en cada una de las zonas entre los dos lados 5, 6 frontales superiores así como entre los dos lados 7, 8 frontales inferiores cada uno con al menos una junta 14, 15 y se llena con un lubricante, en especial grasa. Con preferencia, la ranura 4 está completamente llena de grasa lubricante, que eventualmente se inyecta con una presión elevada para garantizar una película óptima de lubricante entre los cuerpos 9 - 11 rodantes, por un lado, y las pistas de rodadura, por otro. Las juntas 14, 15 se configura con preferencia de tal modo, que sus labios de hermetización sean presionados por medio de la presión en el interior de la ranura 4 firmemente contra el correspondiente elemento 2, 3 de acoplamiento situado enfrente.

A consecuencia de la elección del material y de la bonificación de las dos pistas de rodadura así como de la compaginación de la superficie F_Q de la sección transversal de los dos elementos 2, 3 de acoplamientos con forma de anillo exentos de cavidades, con la cantidad y las dimensiones de los cuerpos rodantes se puede incrementar la capacidad de carga de un cojinete 1 así conformado con relación a un cojinete convencional, sin incrementar de manera digna de mención el peso, de manera, que pueda ser utilizado para la aplicación deseada como cojinete de la hoja del rotor.

En la figura 6 se representa un cojinete 31 convencional para la hoja del rotor para la comparación. Se aprecia, que está configurado como acoplamiento rotativo con bolas con dos hileras, con dos elementos 32, 33 de acoplamiento con forma de anillo concéntricos entre sí y con una ranura 34 situada entre ellos. Los dos lados 35, 36 frontales pueden estar desplazados ligeramente uno con relación al otro; los dos lados 37, 38 frontales inferiores también están desplazados ligeramente uno con relación al otro en el mismo sentido, de manera, que los dos elementos 32, 33 de acoplamiento con forma de anillo poseen alturas axiales idénticas o casi idénticas.

En la ranura 34 entre los dos elementos 32, 33 de acoplamiento se hallan dos hileras de cuerpos 39, 40 rodantes con forma de bola con diámetros idénticos. Estas son mantenidas con separaciones uniformes por medio de jaulas 41, 42. En la zona de cada una de las dos desembocaduras 43 de la ranura 34 se prevé una junta 44, 45.

Si se rellena imaginariamente la ranura 43, los taladros 46, 47 de unión así como las eventuales cavidades adicionales existentes en la sección transversal del cojinete, de manera, que los bordes de las cavidades se cierre en lo posible de manera lisa, se obtiene una sección transversal de la superficie, cuyo valor de la superficie se designará con F_Q . Dado que los dos elementos 32, 33 de acoplamiento con forma de anillo poseen cada uno la misma altura h , se obtiene el valor F_Q con muy buena aproximación de la multiplicación de esta altura h con la diferencia entre el radio r_a exterior del anillo 33 exterior menos el radio r_i interior del anillo 32 interior:

$$F_Q = (r_a - r_i) \cdot h.$$

Dado que los dos anillos 32, 33 poseen aproximadamente el mismo grueso radial es válida, igualmente con una muy buena aproximación, para el diámetro D_{pw} de la línea de la circunferencia a lo largo de centros de todos los cuerpos 39, 40 rodantes la ecuación:

$$D_{pw} = r_a + r_i = 2 \cdot R_{F,SP}.$$

Finalmente, de la figura 6 se desprende, que el diámetro D_w de un cuerpo 39,40 rodante con forma de bola equivale a aproximadamente 3/10 de la raíz de la sección transversal de la superficie:

$$D_w = 0,3 \cdot F_Q^{0,5}.$$

Según DIN ISO281, página 9, punto 6.1.1, punto 6.1.2 y la tabla 4 en un rodamiento de bolas con cuatro puntos de contacto con una hilera es válido para D_w (diámetro de las bolas en milímetros) $> 25,4$ mm y α (ángulo nominal de contacto de un cojinete en grados de ángulo) (5) 90° :

$$C_a = 3,647 \cdot b_m \cdot f_c \cdot (\cos \alpha)^{0,7} \cdot \tan \alpha \cdot 2^{2/3} \cdot DW^{1,4},$$

siendo

C_a = capacidad de carga axial dinámica en Newton;

b_m = 1,3 (factor de la capacidad de carga dependiente de la clase del cojinete y de su construcción para cojinetes con materiales utilizados en la actualidad y con la calidad usual de fabricación);

f_c = factor, que depende de la forma geométrica, de la precisión de fabricación y del material de los elementos de cojinete;

Z = cantidad de bolas, que transmiten cargas en la misma dirección.

Para un rodamiento de bolas con cuatro puntos de contacto con una hilera con D_w (diámetro de las bolas en milímetros) $\leq 25,4$ mm y α (ángulo nominal de contacto de un cojinete en grados de ángulo) (5) 90° sería, sin embargo, válido según la norma DIN:

$$C_a = b_m \cdot f_c \cdot (\cos \alpha)^{0,7} \cdot \tan \alpha \cdot 2^{2/3} \cdot D_w^{1,80}$$

Sin embargo, este caso casi nunca se da en los cojinetes para hojas de rotor para una instalación eólica de energía de alta potencia. Sin embargo, la fórmula de la patente abarca también este caso, ya que debido a la función d se unificaron las dos funciones.

Según la norma DIN es válido $b_m = 1,3$ para el caso aquí considerado.

Además, es preciso tener en cuenta, que en los cojinetes para hojas de rotor para instalaciones eólicas de energía grandes con un diámetro del círculo primitivo de 1.500 mm o más resultan para la expresión

$$x = (D_w \cdot \cos \alpha) / D_{pw}$$

valores típicos de 0,01 a 0,03, ya que con $D_w = 40$ mm, $\alpha = 45^\circ$ y $D_{pw} \geq 1.500$ mm se obtiene por ejemplo 0,019, un valor, que debido a una correlación entre D_w y D_{pw} sólo varía poco. Por ello es posible indicar para el objeto del presente invento para f_c una fórmula de interpolación, que en el margen de $x = (D_w \cdot \cos \alpha) / D_{pw}$ entre 0,01 y 0,03 suministra los siguientes valores:

$$f_c = -15.500 \cdot x^2 + 1.425 \cdot x + 29,4.$$

Con facilidad se puede comprobar, que esta fórmula suministra los siguientes valores:

$$x = 0,01 \rightarrow f_c = 42,1$$

$$x = 0,02 \rightarrow f_c = 51,7$$

$$x = 0,03 \rightarrow f_c = 58,2,$$

es decir exactamente los valores para f_c de la tabla 4 de DIN 281 para $\alpha = 45^\circ$.

Con las consideraciones expuestas más arriba relacionadas con el cojinete de bolas de referencia, por ejemplo $D_w = 0,3 \cdot F_Q^{0,5}$ y $D_{pw} = 2 \cdot R_{F,SP}$ se puede simplificar x en:

$$x = 0,3 \cdot F_Q^{0,5} \cdot 0,7/2 \cdot R_{F,SP} = \\ = 0,105 \cdot F_Q^{0,5} / R_{F,SP}$$

Con ello se obtiene para f_c :

$$f_c = -170,89 \cdot F_Q / R_{F,SP}^2 + 149,63 \cdot F_Q^{0,5} / R_{F,SP} + 29,4.$$

Finalmente es preciso tener en cuenta, que según DIN 281 las capacidades de carga de varias hileras de rodamientos no se pueden sumar simplemente. Por el contrario, en cojinetes axiales con dos o más hileras de bolas el coeficiente portante dinámico (global) es:

$$C_{a,tot,ref} = (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n) \cdot [(Z_1/C_{a1})^{10/3} + (Z_2/C_{a2})^{10/3} + \dots + (Z_n/C_{an})^{10/3}]^{-3/10}$$

en la que los coeficientes $C_{a1}, C_{a2} \dots C_{an}$ para las hileras con $Z_1, Z_2 \dots Z_n$ bolas se calculan con la ecuación expuesta más arriba para rodamientos de bolas con una hilera.

Dado que el rodamiento según la figura 6 posee dos rodamientos idénticos, es decir, que es válido $Z_1 = Z_2 = Z$ y $C_{a1} = C_{a2} = C_a$, se puede reducir esta fórmula compleja a:

$$C_{a,ref} = C_{a,tot,ref} = 2^{7/10} \cdot C_a.$$

En conjunto se obtiene entonces para $C_{a,ref}$ después de algunas modificaciones (pudiendo admitir para el cojinete de referencia $t = 1,2$):

$$C_{a,ref} = 2^{7/10} \cdot 3,647^{\ddot{a}} \cdot 1,3 \cdot [-170,89 \cdot F_Q / R_{F,SP}^2 + 149,63 \cdot F_Q^{0,5} / R_{F,SP} + 29,4] \cdot \\ \cdot 0,7846 \cdot (5,55 \cdot R_{F,SP} \cdot F_Q^{-1/2})^{2/3} \cdot [0,3 \cdot F_Q^{0,5}]^{(1,8-0,4 \cdot \ddot{a})} = \\ = 5,138 \cdot 3,647^{\ddot{a}} \cdot [0,3 \cdot F_Q^{0,5}]^{(1,8-0,4 \cdot \ddot{a})} \cdot (R_{F,SP}^2 / F_Q)^{1/3} \cdot \\ \cdot [-170,89 \cdot F_Q / R_{F,SP}^2 + 149,63 \cdot (F_Q / R_{F,SP}^2)^{0,5} + 29,4]$$

Este valor únicamente depende de F_Q , $R_{F,SP}$ y $\ddot{a}$ y por ello puede ser calculado con facilidad por el técnico para comprobar la adecuación de su cojinete como cojinete para hoja de rotor para una instalación eólica de energía de gran potencia con ajuste permanente de los ángulos de las hojas del rotor, debiendo ser rebasado al menos en el factor 1,5 los valores de $C_{a,ref}$ indicados más arriba.

En un dimensionado típico de un cojinete para hoja de rotor para una instalación eólica de energía con una potencia nominal de aproximadamente 3 MW como rodamiento con dos hileras se obtendría debido a ello por ejemplo como valor de referencia un coeficiente $C_{a,ref}$ portante dinámico axial = 2.031 kN. Dado que este valor tendría que ser rebasado después al menos en el factor 1,5, sería preciso, que un cojinete apropiado poseyera por ejemplo un valor $C_{a,tot}$ de al menos 3.046,5 kN.

Este valor puede ser calculado de varias maneras por el técnico:

Por ejemplo, el técnico podría aumentar la cantidad de bolas y/o variar el radio de las bolas, siempre que lo permita la robustez del cojinete o sustituir una o varias hileras de bolas con otros cuerpos rodantes; la disposición geométrica de las diferentes hileras de bolas y/o de otras hileras de cuerpos rodantes no está sometida a limitaciones.

Si el técnico se decide por una o varias hileras de rodillos como rodamientos puede calcular según DIN ISO 281, página 12, punto 8.1.1.1, tabla 9 así como página 13, tabla 10 como sigue la capacidad C_a de carga dinámica axial para $\alpha = 90^\circ$ de la correspondiente hilera de rodillos:

$$C_a = b_m \cdot f_c \cdot L_{we}^{7/9} \cdot Z^{3/4} \cdot D_{we}^{29/27}$$

en la que

L_{we} = longitud en milímetros de los rodillos a utilizar en el cálculo del coeficiente portante,

D_{we} = diámetro en milímetros de los rodillos a utilizar en el cálculo de la capacidad de carga,

Z = cantidad de rodillos.

En los cojinetes con dos o más hileras de rodillos la capacidad de carga dinámica (global) es:

$$C_a = (Z_1 \cdot L_{we1} + \dots + Z_n \cdot L_{wen}) \cdot \{ [(Z_1 \cdot L_{we1}) / C_{a1}]^{9/2} + \dots + [(Z_n \cdot L_{wen}) / C_{an}]^{9/2} \}^{-2/9},$$

en la que las capacidades C_{a1} , C_{a2} ... C_{an} para las hileras con Z_1 , Z_2 ... Z_n rodillos se calculan con la ecuación expuesta más arriba para cojinetes de rodillos con una hilera.

- 5 De aquí se desprende, que la capacidad de carga depende de una manera totalmente decisiva de las magnitudes longitud del rodillo, diámetro del rodillo y cantidad de rodillos, de manera, que es preciso calcular nuevamente estas magnitudes con la fórmula de comparación indicada más arriba para llegar realmente a un cojinete apropiado como cojinete para hoja de rotor.

- 10 En un dimensionado según el invento de un cojinete 1 para hoja de rotor para una instalación eólica de energía con una potencia nominal de aproximadamente 3 MW como rodamiento con tres hileras de rodillos, contemplando aquí de manera simplificada sólo la capacidad de carga axial y, por lo tanto, también sólo las hileras de cuerpos rodantes con capacidad de carga axial, se pueden alcanzar capacidades C_a rodamiento de rodillos de carga dinámicas de más de 4.000 kN, de manera, que se cumple la fórmula según la patente.

Para la vida L_{10} útil nominal de un rodamiento axial es válido según DIN ISO 281, página 11, punto 6.3.1:

$$15 \quad L_{10,ref} = (C_{a,ref} / P_a)^3$$

en la que

P_a = carga axial dinámica en Newton.

Para la vida L_{10} útil nominal de un cojinete de rodillos axial puro es válido según DIN ISO 281, página 14, punto 8.3.1

$$20 \quad L_{10} = (C_{a,tot} / P_a)^{10/3}.$$

Si en una aproximación se utiliza para $10/3 = 3,333 = 3$ y se admite, además, como se cumple en el caso normal, que los valores P_a de un acoplamiento con bolas con dos hileras con $\alpha = 45^\circ$ y del cojinete de rodillos poseen el mismo valor, se obtiene para la relación de las vidas útiles $V_L = L_{10} / L_{10,ref}$

$$V_L = (C_{a,tot} / C_{a,ref})^3.$$

- 25 Dado que según el invento $C_{a,tot} \geq 1,5 \cdot C_{a,ref}$ es válido en el dimensionado según el invento

$$V_L \geq (1,5)^3 = 3,375,$$

es decir, que la vida útil previsible equivale al menos a más que tres veces la de un cojinete convencional para hoja de rotor; debido a pequeños incrementos de $C_{a,tot}$ aumenta rápidamente y puede alcanzar sin más valores diez veces mayores que los de un cojinete convencional para hoja de rotor.

- 30 Debido a la cantidad de rodaduras incrementada así de acuerdo con V_L del cojinete 1 utilizado para la hoja del rotor se pueden realizar con ello nuevos conceptos de mando y/o de regulación para reducir o incluso minimizar la carga estructural de una torre de una instalación eólica de energía equipada de esta manera:

- 35 Como se desprende de la figura 2, la torre 16 de una instalación eólica de energía no es totalmente rígida, sino que - atacada con rachas de viento - puede ser animada con oscilaciones (véase la figura 2b) y/o con oscilaciones, respectivamente flexiones (véase la figura 2c). Así por ejemplo, las oscilaciones son creadas por la presión variable del viento en el rotor 18, que se transmiten desde aquí a la góndola; las oscilaciones, respectivamente flexiones son generadas por ejemplo por un momento de flexión, que ataca en el rotor. Por medio de uno o de varios sensores de posición dentro y/o en la torre 16 es posible medir y, por lo tanto, detectar estas inestabilidades y/o oscilaciones.

- 40 Como contramedida se pueden variar los ángulos de ataque de una, de varias o de todas las hojas 20 del rotor, de tal modo, que por la interacción con el viento, ejerzan sobre el rotor 18 y con ello sobre la góndola 19 fuerzas de viento modificadas para contrarrestar con las inestabilidades y/o las oscilaciones.

- 45 Según el invento también se tiene en cuenta en este caso el correspondiente ángulo de rotación de la hoja del rotor alrededor del eje del rotor, respectivamente el eje principal, por lo que también debería disponer en el rotor, respectivamente el eje principal un sensor de posición, respectivamente de ángulos para conocer en todo instante la posición angular de todas las hojas del rotor.

Además de las regulaciones de esta clase existen diferentes principios de mando para poder minimizar - eventualmente también sin conocimiento de las correspondientes amplitudes de las inestabilidades y/o de las oscilaciones - la carga estructural de la torre 16 de la instalación 17 eólica de energía :

Como muestra la figura 3, la velocidad v del viento normalmente no es constante en todos los lugares, sino que es una función $v(h)$ de la altura h sobre el suelo y aumenta con la altura h aproximadamente hasta un valor v_{∞} en alturas grandes. Una hoja 20 de rotor experimenta por ello en el cenit de su movimiento circular alrededor del eje 18 principal del rotor una mayor fuerza del viento que en el cenit inferior de su trayectoria. Las inestabilidades y/o las oscilaciones de la torre 16 generadas por ello pueden ser determinadas empíricamente y pueden ser almacenadas como fórmulas, curvas o tablas en función de la velocidad v_{∞} del viento en alturas grandes, de manera, que los ángulos de ataque de las hojas 20 del rotor sean ajustadas periódicamente de acuerdo con su periodo de rotación para minimizar con ello las oscilaciones de la fuerza del viento ligadas a ello. La velocidad v_8 actual en cada momento en una altura grande se determina por ejemplo con un sensor de la fuerza del viento, que se halle con preferencia en la parte superior de la góndola 19 de la instalación 17 eólica de energía.

Por otro lado, la torre 16 de una instalación 17 eólica de energía también puede ser animada con oscilaciones de rotación o de torsión alrededor de su eje vertical. Esto se produce, sobre todo, cuando el viento no sopla de manera constante en la misma dirección, sino que rola más o menos rápidamente, como se esboza en la figura 4, que representa una vista en planta de una instalación 17 eólica de energía. El viento ha rolado aquí transitoriamente - por ejemplo en el marco de una racha de viento - ya no incide perpendicularmente en el plano de la hoja del rotor, respectivamente ya no es paralelo a la dirección del eje principal del rotor. La consecuencia es que la fuerza del viento, que experimenta una hoja 20 de rotor no sólo depende de la altura de esta, sino también de su orientación con relación a la dirección modificada del viento; si una hoja 20 de rotor está orientada precisamente contra la dirección v_{∞} del viento, como la hoja 20 de rotor representada en la parte inferior en la figura 4, posee una superficie de ataque por el viento mayor y experimenta con ello una fuerza F del viento mayor que una hoja 20 de rotor situada aproximadamente enfrente, que está apantallada en parte con relación a ella, por ejemplo también por el cubo 18 del rotor de la instalación 17 eólica de energía.

También se pueden contrarrestar estas oscilaciones de torsión de la torre 16 por medio de un mando apropiado (anticíclico) de los ángulos de ataque de las hojas 20 del rotor. La dirección actual del viento en cada instante se determina por ejemplo con un sensor de la dirección del viento, que se halle con preferencia en la parte superior de la góndola 19 de la instalación 17 eólica de energía. El concepto de mando y/o de regulación según el invento se beneficia en este caso de la circunstancia de que el momento de inercia de una hoja 20 de rotor, que debe ser superado en un ajuste del ángulo de ataque de la hoja del rotor, es considerablemente menor que, por ejemplo, el momento de inercia al desplazar la góndola 19 en otra dirección del viento de la unidad formada por la góndola 19 y el rotor 18, incluidas las hojas 20 del rotor.

En la figura 4 se representa también otro caso, a saber un viento racheado, que no varía desde el punto de vista de su dirección, sino de su fuerza, por ejemplo de $v_{\infty 1}$ a $v_{\infty 2}$. Esto se detecta con sensores, que no se hallan directamente en la instalación 17 eólica de energía, sino en su entorno, en el caso de parques eólicos por ejemplo en instalaciones 17 eólicas de energía, mástiles, edificios, etc. Al concatenar entre sí estas instalaciones 17 eólicas de energía es posible, que la instalación 17 eólica de energía contemplada tenga conocimiento de una racha de viento antes de incidir en ella y puede variar los ángulos de ataque de las hojas 20 de rotor de tal modo, que al incidir la racha puede reducir e incluso compensar el brusco aumento de la fuerza F del viento y alejarla total o parcialmente de la torre de la instalación 17 eólica de energía.

Como se observa, con el dimensionado según el invento de los cojinetes 1 de las hojas del rotor se puede evitar a la torre 16 de la instalación eólica de energía una gran cantidad de cargas estructurales, de manera, que aquella varíe u oscile menos que sin una medida correspondiente. La vida útil de una instalación 17 eólica de energía puede ser incrementada con ello considerablemente.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el dimensionado de una instalación (17) eólica de energía cuya potencia eléctrica nominal $P_{W,nom}$ sea igual o mayor que 1,5 MW y/o cuyo diámetro del rotor sea igual o mayor que 70 m y/o que posea al menos un cojinete (1) de la hoja del rotor con un diámetro D_{pw} de rotación de 1.500 mm o superior con varias hojas (20) de rotor, que pueden ser ajustadas independientemente entre sí y para la minimización de la carga estructural estática y/o dinámica y/o para la amortiguación de oscilaciones y/o para la compensación de fuerzas y momentos perturbadores, por ejemplo generando fuerzas antagonistas, y que también pueden ser ajustadas, aun cuando una velocidad v_{∞} constante del viento no lo exija, utilizando para el apoyo de las hojas (20) del rotor acoplamientos (1) rotativos con rodamientos con dos elemento (2, 3) con forma de anillo concéntricos entre sí, y giratorios uno con relación al otro para el acoplamiento con el cubo (18) del rotor, por un lado, así como para el acoplamiento con una hoja (20) del rotor, por otro, previendo entre los dos elementos (2, 3) de acoplamiento un intersticio (4) corrido con forma de espiral, que se hermetiza (14, 15) en los dos lados (5, 6; 7,8) frontales del acoplamiento (1) rotativo y se llena con un lubricante, en especial grasa, con una superficie F_Q de la sección transversal del anillo de apoyo liberado de cavidades de un cojinete (1) de hoja de rotor y con un radio $R_{F,SP}$ del centro de gravedad de la superficie del cojinete (1) de la hoja de rotor así como con un volumen $V = F_Q \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{F,SP}$ de construcción calculado a partir de la superficie F_Q de la sección transversal del cojinete liberada de cavidades multiplicada con el contorno $2 \cdot \pi \cdot R_{F,SP}$ en el centro de gravedad de la superficie y con un capacidad $C_{a,tot}$ de carga axial dinámica determinada según DIN ISO 281 de todas las hileras (μ), que participan en la transmisión de fuerzas en una dirección axial de un rodamiento (1) utilizado, caracterizado porque
- a) en el marco de los rodamientos (1) para las hileras de cuerpos (9, 10) rodantes, que participan en la transmisión de fuerzas en la dirección axial, se prevén pistas de rodadura con superficie templada sin protuberancias y sin cavidades, equivaliendo el grueso d_H de la capa de la pista de rodadura templada superficialmente al menos a $1/20$ del diámetro D_W del cuerpo rodante: $d_H \geq 0,05 \cdot D_W$ satisfaciendo
- b) la totalidad de la capacidad $C_{a,tot}$ de carga axial, dinámico determinada según DIN ISO 281 de todas las hileras (μ), que participan en la transmisión de fuerza en una dirección axial de un rodamiento (1) utilizado según DIN ISO 281 la siguiente relación:

$$C_{a,ges} \geq 0,89268 \cdot [-170,89 \cdot F_Q \cdot R_{F,SP}^{-4/3} + 149,63 \cdot F_Q^{0,5} \cdot R_{F,SP}^{-1/3} + 29,4 \cdot R_{F,SP}^{2/3}] \cdot F_Q^{17/30},$$

en el caso de que $F_Q \leq 71,6844 \text{ cm}^2$; así como

$$C_{a,ges} \geq 5,26956 \cdot [-170,89 \cdot F_Q \cdot R_{F,SP}^{-4/3} + 149,63 \cdot F_Q^{0,5} \cdot R_{F,SP}^{-1/3} + 29,4 \cdot R_{F,SP}^{2/3}] \cdot F_Q^{11/30},$$

- en el caso de que $F_Q > 71,6844 \text{ cm}^2$,
- c) siendo, además, desplazados uno con relación al otro entre sí los lados (5 - 8) frontales orientados en la misma dirección axial de los dos elementos (2, 3) de, acoplamiento, estando unida una superficie (5, 8) sobresaliente por medio de tornillos con la hoja del rotor y la otra con el cubo del rotor,
- d) previendo, además, para minimizar la carga estructural y/o amortiguar de oscilaciones un mando o regulación para el ajuste de las hojas (20) del rotor, utilizando como magnitud de entrada la señal de al menos un sensor, que se halle sobre, en o dentro de la instalación eólica de energía, es decir la señal de al menos un sensor de posición, respectivamente de ángulos acoplado con el árbol principal y la señal de al menos un sensor para la velocidad del viento dispuesto en la parte superior de la torre (16) de la instalación (17) eólica de energía,
- e) previendo finalmente una concatenación de la instalación (17) eólica de energía con instalaciones eólicas de energía próximas, de manera, que la instalación (17) eólica de energía sea informada por medio de sensores, que no se hallan directamente en la instalación (17) eólica de energía, sino en instalaciones eólicas de energía próximas, ya antes de la incidencia de una racha de viento, de este fenómeno, alejando de la torre (16) de la instalación (17) eólica de energía total o parcialmente, por medio de un ajuste apropiado de los ángulos de ataque de las hojas (20) del rotor un aumento repentino, ligado normalmente con la incidencia de una racha de viento, de la fuerza del viento de la torre (16) de la instalación (17) eólica de energía.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque el ajuste de las hoja (20) de rotor para minimizar la carga estructural y/o amortiguar las oscilaciones tiene lugar en el marco de un mando y/o de una regulación, con preferencia en el marco de un mando y/o de una regulación de orden superior así como con preferencia en el marco de varios mandos y/o regulaciones subordinadas para las diferentes hojas (20) del rotor.
3. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque en un mando o en una regulación se generan durante el funcionamiento al menos oscilaciones con las siguientes componentes espectrales:

$$M_1 = \cos[(2\pi/60)2nt]$$

y/o

$$M_2 = \sin[(2\pi/60)3nt]$$

siendo

5 n = número de revoluciones del rotor

t = tiempo.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque los dos elementos (2, 3) de acoplamiento de los acoplamientos (1) rotativos utilizados para apoyo giratorio de las hojas (20) en el cubo (18) del rotor son de un acero, que fue bonificado y revenido así como eventualmente se trató después térmicamente.

10 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque las pistas de rodadura templadas superficialmente se templaron por inducción o se templaron a la llama, equivaliendo con preferencia el grueso d_H de la capa templada superficialmente de la pista de rodadura al menos a $1/16$ del diámetro D_W del correspondiente cuerpo rodante:

15
$$d_H \geq 0,06 \cdot D_W.$$

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque para el apoyo giratorio de las hojas (20) del rotor en el cubo (18) del rotor se utilizan rodamientos (1) con al menos una hilera de cuerpos (9 - 11) rodantes, formando los cuerpos (9 - 11) rodantes de al menos una hilera con sus pistas de rodadura zona de contacto lineales; con preferencia se utilizan rodamientos (1) con dos o más hileras de cuerpos (9 - 11) rodantes, formando los cuerpos (9 - 11) rodantes de al menos dos hileras con sus pistas de rodadura zonas de contacto lineales.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque para el apoyo giratorio de las hojas (20) del rotor en el cubo (18) del rotor se utilizan acoplamientos (1) rotativos, cuya fuerza F_a de carga axial es mayor que su fuerza F_r de carga radial:

25
$$F_a > F_r,$$

especialmente en un factor de al menos 1,25:

$$F_a/F_r > 1,25.$$

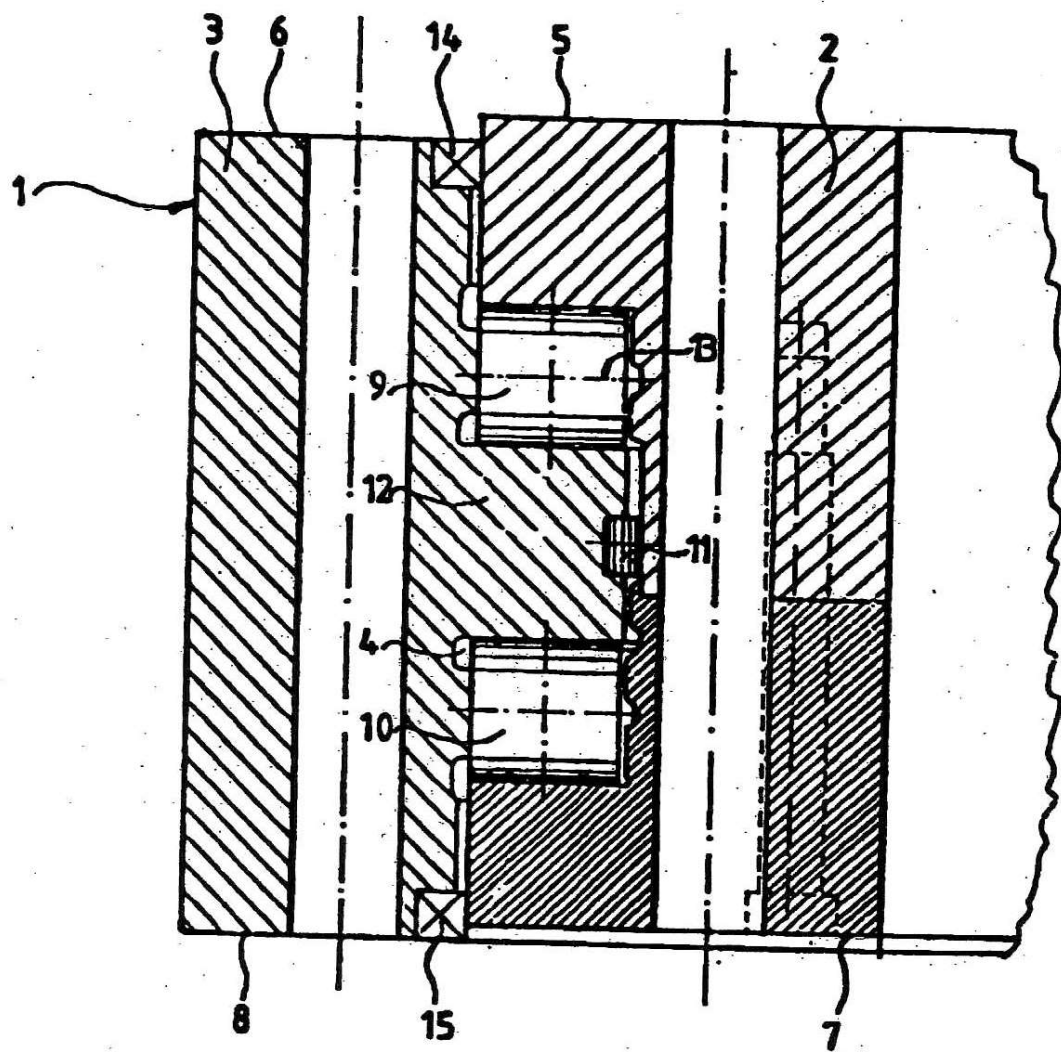
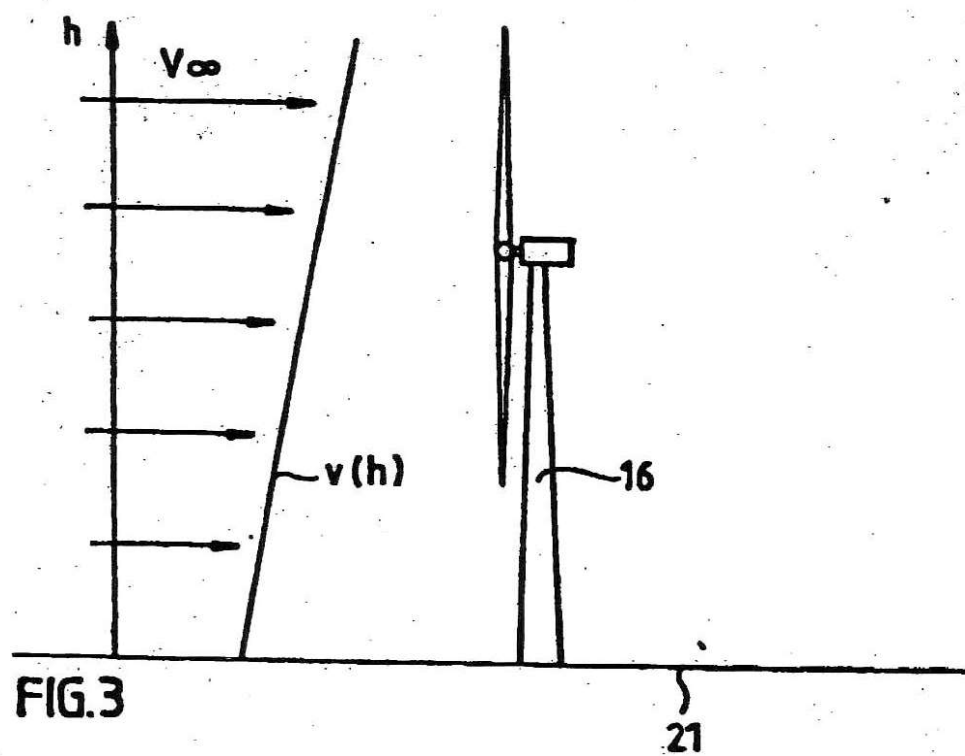
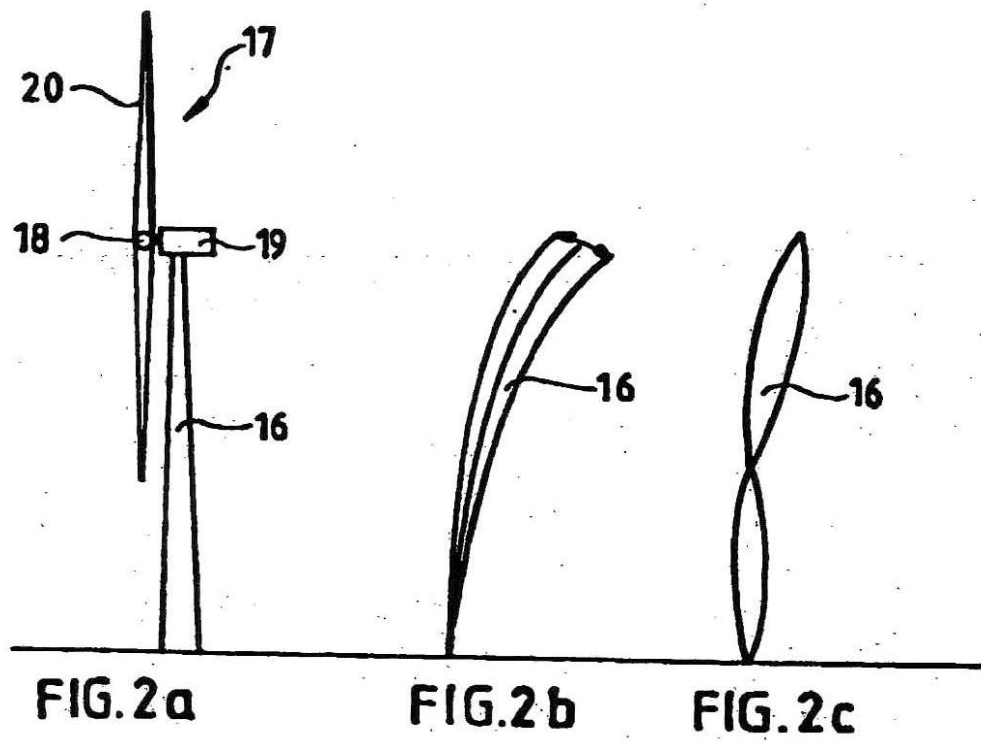


FIG.1



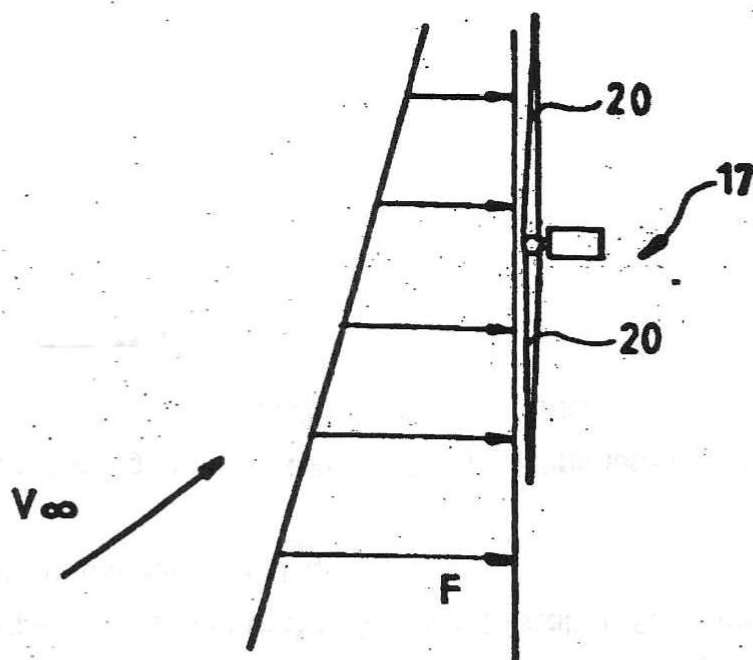


FIG. 4

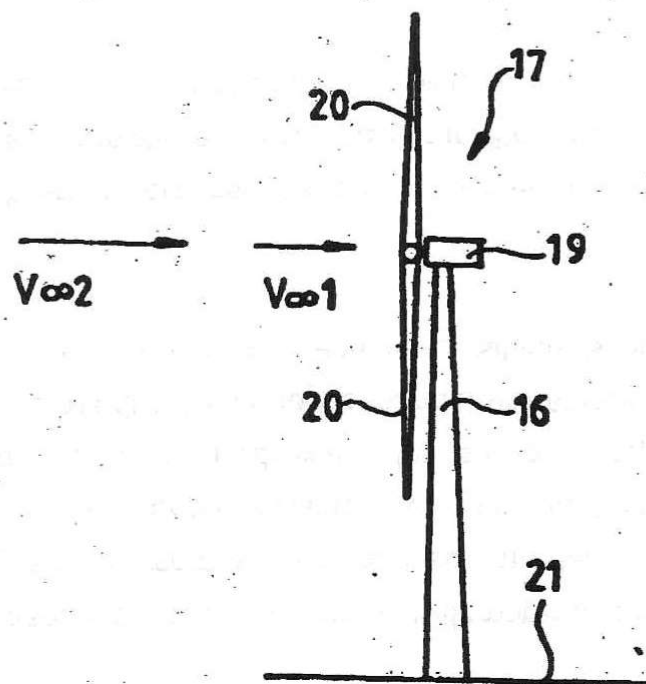


FIG. 5

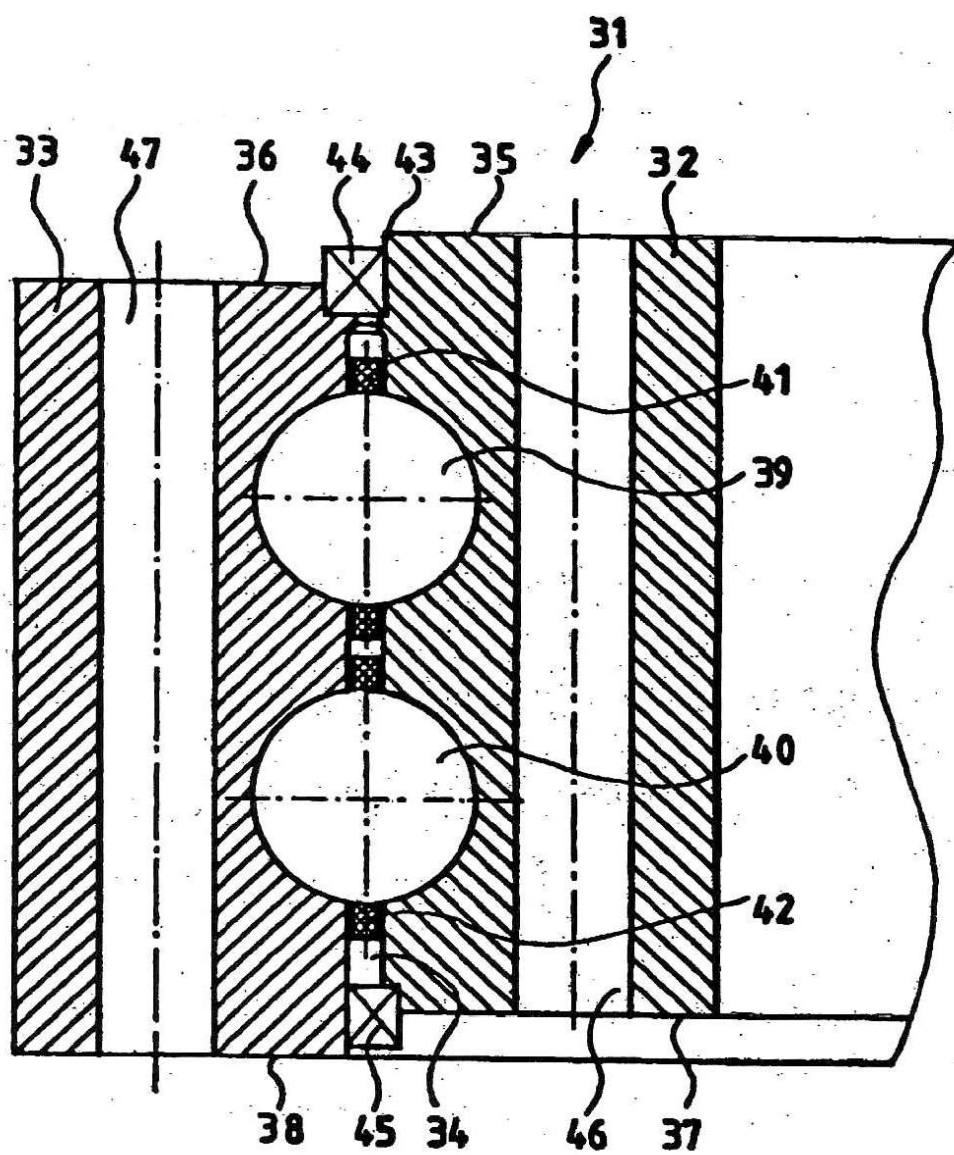


FIG. 6