

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 528 185**

51 Int. Cl.:

F16H 57/00 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.12.2007 E 07122882 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.12.2014 EP 2071213**

54 Título: **Reducción de ruido de caja de engranajes mediante control de accionamiento eléctrico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.02.2015

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**SCHRAMM, SIMON;
SIHLER, CHRISTOF;
HEMMELMANN, JAN y
ROESNER, ROBERT**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 528 185 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

Reducción de ruido de caja de engranajes mediante control de accionamiento eléctrico

Campo de la invención

5 La invención se refiere, en general, a la reducción de ruido y, más en particular, a la reducción del ruido en unidades de accionamiento eléctrico.

Antecedentes de la invención

10 Existen numerosos estudios que se refieren a los efectos del ruido de baja frecuencia sobre los seres humanos. A pesar de que los resultados son algo subjetivos con respecto a los efectos de tal ruido, existe una tendencia creciente de reducir los efectos de ruido procedentes de fuentes industriales siempre que sea posible para mantener el fondo de comercio con los usuarios finales y el público. La expresión baja frecuencia, tal como se usa en el presente documento, hace referencia al ruido en la gama de frecuencias audibles de aproximadamente 20 Hz a varios cientos de hercios. Para fines de referencia, por lo general el rango de audición de la mayor parte de los seres humanos es de aproximadamente 20 Hz - 20 kHz y se denomina gama de frecuencias audibles.

15 Para fines de referencia, el artículo preparado por el Laboratorio de Investigación en Energías Renovables, Dept. de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad de Amherst (junio de 2002) titulado "*Wind Turbine Acoustic Noise*" describe los fundamentos generales del ruido y el sonido. La complejidad surge cuando diversos sistemas eléctricos, electromecánicos y mecánicos están funcionando de una forma integrada, tal como una turbina eólica, en la que es difícil determinar con precisión la fuente exacta de cualquier ruido audible.

20 Las fuentes de tal ruido industrial son numerosas, no obstante se reconoce en general que una fuente de ruido de baja frecuencia de este tipo proviene de los trenes de accionamiento a partir de los sistemas eléctricos y electromecánicos. Tal como se usa en el presente documento, cajas de engranajes o trenes de accionamiento (que también se denominan transmisiones) harán referencia a los sistemas que emplean una cierta forma de conjuntos que se usan para transferir y / o convertir par de fuerzas y velocidad en conjunción con uno o más ejes. Los trenes de accionamiento se usan comúnmente en implementaciones en diversos campos que incluyen aviación, marítimo, transporte, industrial y energía. Por ejemplo, las cajas de engranajes se usan para los rotores en helicópteros, ejes de hélices en barcos, ejes de turbina eólica, transmisiones de vehículos, y diversos tipos de acoplamiento involucrados con los motores, electromotores y generadores. Por lo general, los trenes de accionamiento eléctricos transfieren un par de fuerzas y los ejemplos incluyen un motor que transfiere un par de fuerzas a una carga y un generador que usa un eje rotatorio para generar energía eléctrica.

30 Se han usado diversas formas de esquemas de cancelación de ruido pasiva y activa para disminuir o eliminar el ruido de baja frecuencia con un cierto éxito limitado y, a menudo, mediante unos diseños complejos. Existe una necesidad percibida de abordar los problemas de ruido, que no se ha abordado de forma satisfactoria.

El documento WO-A-98/30813 de la técnica anterior divulga un procedimiento para amortiguar ruido audible a partir de un tren de accionamiento, en el que se realizan las siguientes etapas:

- 35 - procesar una señal de ruido a partir de dicho tren de accionamiento que tiene una frecuencia de ruido;
 - generar una señal de amortiguación correctiva en el que dicha señal de amortiguación correctiva tiene un desfase y con una frecuencia aproximadamente igual a dicha frecuencia de ruido;
 - modular una señal de par de fuerzas con dicha señal de amortiguación correctiva para producir una señal correctiva de par de fuerzas modulada; y
 40 - aplicar dicha señal correctiva de par de fuerzas modulada a una máquina eléctrica que está acoplada con dicho tren de accionamiento, reduciendo de este modo dicho ruido audible.

Sumario de la invención

45 Un ejemplo que no se reivindica se refiere a un sistema para amortiguar ruido audible a partir de un tren de accionamiento, usando el sistema una señal de vibración o de ruido a partir del tren de accionamiento, en el que un circuito de amortiguación integrado produce una señal de par amortiguador. El par amortiguador es una versión desfasada y amplificada de la señal de ruido. Una máquina eléctrica está acoplada con el tren de accionamiento, en el que la señal de par amortiguador se aplica a una señal de par de fuerzas de entrehierro de la máquina eléctrica, reduciendo de este modo el ruido audible.

50 La señal de ruido puede ser por lo menos uno de un valor constante, un valor estimado y un valor medido. En un ejemplo, la señal de ruido se mide mediante por lo menos un sensor, en el que el sensor puede ser por lo menos uno de un micrófono, un acelerómetro, una galga extensométrica y un dispositivo de onda acústica de superficie.

Además, el circuito de amortiguación puede seleccionarse de entre por lo menos uno del grupo que consiste en filtro, desfasador, amplificador, sumador y limitador. El desfasador es, en un ejemplo, un circuito de retardo de tiempo. El par amortiguador tiene, en una realización, un desfase con respecto a la señal de ruido de

aproximadamente 90 grados.

El tren de accionamiento puede seleccionarse de entre por lo menos uno del grupo que consiste en una caja de engranajes, una transmisión hidrostática, una transmisión hidrodinámica, una unidad de accionamiento por cadena, una unidad de accionamiento por correa y una junta Cardán.

5 El sistema puede incluir un convertidor que está acoplado con el generador, en el que el convertidor combina la señal de par amortiguador con la señal de par de fuerzas de entrehierro. Además, una interconexión de par de fuerzas puede estar acoplada entre el circuito de amortiguación y el generador para acondicionar la señal de par amortiguador.

10 En un aspecto, el par amortiguador se introduce en el generador en las proximidades del eje de alta velocidad, no obstante el ruido audible resulta sustancialmente del eje de baja velocidad. Otra característica incluye hacer que el ruido audible se amortigüe en tiempo real.

El par amortiguador no ha de aplicarse de forma continua, y puede aplicarse de manera intermitente a la señal de par de fuerzas de entrehierro. En un ejemplo, la señal de amortiguación tiene una frecuencia de modulación que es aproximadamente una frecuencia de la señal de ruido.

15 La invención se refiere a un procedimiento para amortiguar ruido audible a partir de un tren de accionamiento, que comprende procesar una señal de ruido a partir del tren de accionamiento que tiene una frecuencia de ruido, generar una señal de amortiguación correctiva en el que la señal de amortiguación correctiva tiene un desfase y con una frecuencia aproximadamente igual a la frecuencia de ruido, modular una señal de par de fuerzas con la señal de amortiguación correctiva para producir una señal correctiva de par de fuerzas modulada, y aplicar la señal correctiva
20 de par de fuerzas modulada a una máquina eléctrica que está acoplada con el tren de accionamiento, reduciendo de este modo el ruido audible.

De acuerdo con la invención, el desfase es de aproximadamente 90 grados.

25 El procesamiento, la generación, la modulación y la aplicación pueden ser intermitentes. El procedimiento puede comprender además repetir las etapas de procesar, generar, modular y aplicar, para por lo menos una señal de ruido adicional.

El procedimiento también puede incluir por lo menos uno de filtrar, amplificar y limitar la señal de amortiguación correctiva. El tren de accionamiento puede incluir un conjunto de engranajes en el que el ruido procedente del tren de accionamiento incluye un ruido del engrane de los engranajes.

30 Un efecto técnico del sistema es la reducción del ruido audible de un tren de accionamiento. Un aspecto, que no se reivindica, incluye un producto de programa informático para reducir el ruido audible en un tren de accionamiento que incluye las características que se hacen notar en el presente documento.

35 Las características y ventajas que se describen en el presente documento no son exhaustivas y, en particular, muchas características y ventajas adicionales serán evidentes para un experto en la materia a la vista de los dibujos, la memoria descriptiva y las reivindicaciones. Además, debería hacerse notar que el texto que se usa en la memoria descriptiva se ha seleccionado principalmente para fines instructivos y de legibilidad, y no para limitar el ámbito de la materia objeto de la invención.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama de bloques básico que ilustra un sistema de amortiguación de ruido.

La figura 2A es un diagrama de bloques básico que ilustra un sistema de amortiguación de ruido.

40 La figura 2B es un diagrama de bloques básico que ilustra un sistema de amortiguación de ruido.

La figura 3 es un diagrama de bloques básico que ilustra un sistema de amortiguación de ruido.

La figura 4 es un diagrama de bloques básico que ilustra una interconexión de par de fuerzas.

La figura 5 es un diagrama de bloques que ilustra una interconexión de par de fuerzas directa.

45 La figura 6 es una representación gráfica que muestra una señal de ruido simulada y la respuesta del generador, indicada por la señal de corrección que se aplica al generador mediante la electrónica de potencia, dando como resultado una señal de ruido bien amortiguada.

La figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra el flujo de proceso para el sistema de amortiguación de ruido de acuerdo con la invención.

Descripción detallada

En general, la invención prevé una reducción de los problemas de ruido con los sistemas que emplean trenes de accionamiento. Un ejemplo de un tren de accionamiento hace referencia a aquellos sistemas que usan cajas de engranajes. Tal como se usa en el presente documento, las cajas de engranajes incluirán las diversas formas de transmisiones y trenes de accionamiento que experimentan problemas de ruido y de vibración.

De acuerdo con la invención, la reducción de ruido se consigue mediante la supresión del efecto de la excitación de ruido, tal como la excitación del engrane de los engranajes, mediante el uso de un circuito de control de reducción de ruido para el sistema de accionamiento. El circuito de reducción de ruido genera una señal de realimentación de par de fuerzas dinámico con la misma frecuencia que la señal de ruido pero en una fase diferente, en el que la señal de realimentación se realimenta al par de fuerzas de entrehierro del sistema, tal como motor o generador eléctrico. Tal como se usa en el presente documento, máquina eléctrica hará referencia a los diversos motores y generadores que pueden estar acoplados con un tren de accionamiento.

Muchas unidades de accionamiento eléctrico son operadas a una frecuencia variable, tal como unidades de accionamiento de velocidad variable o trenes de accionamiento de turbina eólica. A algunas velocidades, estos sistemas pueden dar lugar a vibraciones a la frecuencia de unos puntos de resonancia acústica. Estas pequeñas amplitudes de vibración pueden tener, en algunos casos limitados, un impacto ambiental si la frecuencia de vibración resultante se encuentra en la gama de frecuencias audibles por el ser humano, en especial si los niveles de ruido que se requieren por las normas de la ingeniería se ven superados o cerca de las normas requeridas. A determinadas velocidades de la turbina, existe un aumento de ruido drástico que se basa en una interacción compleja de los elementos del tren de accionamiento que involucran los efectos de resonancia.

Haciendo referencia a la figura 1, se representa un ejemplo que no se reivindica de un sistema de ruido reducido 5. El tren de accionamiento 10 puede ser una caja de engranajes con ejes y acoplamiento asociados, así como otras formas de conjuntos de engranajes y transmisiones que transfieren un par de fuerzas. Por lo general, el tren de accionamiento 10 está acoplado con una cierta forma de dispositivo que da cabida a la transferencia de par de fuerzas tal como un generador 20 en el presente ejemplo. A pesar de que en el presente documento se usan, para fines ilustrativos, conjuntos de engranajes, existen otras formas de transmisiones (o convertidores de par de fuerzas) incluyendo transmisiones hidrostáticas, transmisiones hidrodinámicas, unidades de accionamiento por cadena y por correa, y juntas Cardán. En otros ejemplos que no se reivindican, un motor (que no se muestra) puede estar acoplado con el tren de accionamiento. Un aspecto incluye un tren de accionamiento que es una caja de engranajes y genera una excitación de ruido causada por el engranaje que engrana.

El tren de accionamiento 10 está acoplado con por lo menos un sensor 30 que extrae las señales de ruido o de vibración a partir del tren de accionamiento 30. El sensor 30 puede ser acústico, mecánico o eléctrico e incluye micrófonos para procesar energía acústica, acelerómetros y otros dispositivos para extraer energía de vibración, y dispositivos de onda acústica de superficie para extraer energía eléctrica.

En un ejemplo, el sensor puede estar definido por categorías tales como la fuerza, la aceleración, la sensibilidad, el ancho de banda, la resolución, la precisión, la linealidad, la direccionalidad, la dependencia ambiental (por ejemplo: la temperatura y la presión), el tamaño, la aplicación, el montaje. La salida o salidas a partir de los sensores se comunican a una sección de control que interpreta la señal de sensor medida.

En un ejemplo, la frecuencia de vibración puede ser una región o frecuencia tonal previamente determinada que se sabe que es una preocupación para el sistema o esta puede ser una frecuencia medida. En un ejemplo, el sensor obtiene solo una medición de frecuencia y, en otro ejemplo, el sensor obtiene un nivel de ruido y la medición de frecuencia. Un aspecto incluye una medición de la frecuencia y el nivel de ruido que, a continuación, se usa en un circuito de realimentación. El nivel o la potencia del nivel de ruido pueden usarse para determinar si el sistema requiere una amortiguación mediante la comparación con un límite previamente determinado, en el que la reducción de ruido solo tendría lugar cuando fuera necesario.

En un ejemplo adicional, el sistema opera con una cierta respuesta de frecuencia medida y un retraso de fase con autoajuste. En el presente ejemplo, la frecuencia de vibración se obtiene de la medición y solo es necesario procesar el retraso de fase requerido para el par amortiguador.

De acuerdo con un ejemplo, el sensor 30 es un sensor acústico y, en un aspecto, el sensor es un micrófono. Puede que un micrófono de banda ancha no distinga las señales de baja frecuencia de forma apropiada y un cierto filtrado, tal como un filtro de paso bajo o un filtro de paso de banda, puede limitar la gama de frecuencias recibida por el micrófono. La amplificación de la señal también se encuentra dentro del ámbito y el conocimiento del presente sistema. Un ejemplo que emplea un micrófono para medir el ruido de caja de engranajes se describe en el documento "*Vibration Analysis of the Windflow Turbine Gearbox*" de Commtest Instruments Ltd.

Un mecanismo adicional para medir incluye el uso de acelerómetros que miden la vibración estructural. Otra realización de medición de sensor es por medio de una galga extensométrica que puede detectar la deformación. En una realización, la detección se logra usando dispositivos de onda acústica de superficie (SAW, *surface acoustical wave*), dispositivos de onda acústica de masa (BAW, *bulk acoustic wave*) y dispositivos de sistemas micro-

mecánicos (MEMS, *micro-mechanical system*).

Haciendo referencia una vez más a la figura 1, la sección de detección 30 está acoplada con un circuito de control de amortiguación 40. Por lo general, el circuito de amortiguación 40 está integrado o bien en la electrónica de tren de accionamiento o bien en la electrónica de generador, tal como con el controlador de convertidor. Por lo general, el sensor 30 se encuentra en las proximidades de, o está acoplado con, el tren de accionamiento 10, y puede transmitir las señales medidas mediante técnicas por cable o inalámbricas.

La información a partir del sensor 30 se comunica para su procesamiento por un circuito de control o de amortiguación 40 que usa las señales de ruido medidas para generar una señal correctiva desfasada para amortiguar el ruido. La señal detectada a partir del sensor 30 puede incluir la frecuencia de ruido y la potencia de ruido, solo la frecuencia o solo la potencia de ruido, dependiendo de criterios de diseño. Además, la detección puede ser continua, periódica o estar basada en un cierto suceso manual o automático. En un sentido general, el sensor mide la señal y la sección de control realiza el procesamiento subsiguiente.

La salida del circuito de amortiguación 40 es una señal de par de fuerzas dinámico (ΔT_{ref}) que, por lo general, está acoplada con la señal de par de fuerzas de la electrónica de convertidor de generador 55. Existen varias formas de superponer la señal de par de fuerzas dinámico o de amortiguación de ruido dentro de las señales de lazo de control del convertidor. De acuerdo con un ejemplo, la señal de par de fuerzas de la electrónica de convertidor se modula mediante la señal de par de fuerzas dinámico, en el que la frecuencia de modulación de la señal de par de fuerzas dinámico es aproximadamente la misma que la fuente de excitación que da lugar a los problemas de amplificación de ruido - pero con una fase diferente. En un ejemplo, existe una interconexión de par de fuerzas que se usa para acondicionar la señal de par de fuerzas para su introducción subsiguiente en el circuito de control de convertidor 55 y el par de fuerzas de entrehierro del generador 20 u otra máquina eléctrica. En un ejemplo, una interconexión de par de fuerzas dinámica puede procesar la señal a partir del circuito de amortiguación 40, dando como resultado una señal correctiva modulada que se introduce en el convertidor 55 que, a continuación, puede introducirse en el generador 20.

El convertidor o controlador de convertidor 55 aplica la señal correctiva al par de fuerzas de entrehierro del generador 40. En determinados ejemplos existe una señal de par de fuerzas, tal como un nivel de señal de CC, que se modula mediante la señal correctiva, en los que la modulación es a la frecuencia de la señal de ruido. El circuito de amortiguación 40, la interconexión de par de fuerzas y / o el convertidor 55 pueden ser parte de la sección de controlador de convertidor existente.

En un aspecto adicional, el par de fuerzas dinámico tiene la misma frecuencia que el que es responsable del efecto de ruido pero con una fase diferente y se transmite al generador 20 para efectuar una amortiguación del ruido. En una realización, el par de fuerzas de entrehierro amortigua el ruido de caja de engranajes usando una señal que se modula mediante el par de fuerzas dinámico (ΔT_{ref}).

Por lo general, los generadores eléctricos utilizan un campo magnético rotatorio que se crea por el devanado de campo portado por el rotor de generador. A medida que gira el rotor, se produce un par de fuerzas sobre el rotor, que actúa a través de un entrehierro que existe entre el rotor y el estátor, que resulta de la interacción del campo electromagnético con el devanado de estátor. Este par de fuerzas, al que también se hace referencia como par de fuerzas de entrehierro, es proporcional a la energía eléctrica que se produce por el generador a una velocidad angular de rotor constante. El campo magnético interacciona con el devanado de inducido de estátor para producir una tensión e intensidad que, a continuación, pueden suministrarse a una carga. El uso del par de fuerzas de entrehierro y diversos cálculos de par de fuerzas de entrehierro en el procesamiento de máquinas eléctricas será conocido por los expertos en la materia.

De acuerdo con la invención, la señal de amortiguación de ruido desfasada 50 se superpone a, o se combina de otro modo con, el par de fuerzas de entrehierro del generador 20. La introducción de la señal de amortiguación de ruido en la máquina eléctrica puede lograrse de varias formas, algunas de las cuales se describen en la patente de los EE. UU. N° 7.173.399 y la solicitud de patente publicada N° US 2006/0244425.

Existen varias opciones para procesar la señal de par de fuerzas dinámico para amortiguar la señal de ruido. Se ilustra un ejemplo en la figura 2A, en el que la señal de ruido 205 se introduce en un desfasador 215 que cambia la fase de la señal de ruido. La señal de ruido 205 puede provenir del sensor de la figura 1 e incluir por lo menos uno de una frecuencia y / o nivel de potencia de ruido. La señal de ruido es, en un ejemplo, una frecuencia de ruido y un nivel de ruido medidos y se usa en un circuito de amortiguación de realimentación para producir la señal de par de fuerzas.

De acuerdo con la invención, una amortiguación satisfactoria se consigue siempre que la señal de realimentación esté desfasada un retardo de aproximadamente $T/4$ para un desfase de aproximadamente 90 grados de retraso. En determinados aspectos, puede ser deseable tener un margen de seguridad. El efecto de amortiguación correspondiente es proporcional a $\sin(\Phi)$, de tal modo que se requiere más par de fuerzas para conseguir los mismos resultados con un desfase ajustado puro en comparación con el desfase más preciso.

De acuerdo con la invención, el procesamiento del par de fuerzas dinámico opera con una cierta tolerancia en torno a la frecuencia de ruido. Por ejemplo, si la señal de ruido fuera una componente de 70 Hz y se variara en ± 5 Hz, el circuito de realimentación no se vería afectado de manera adversa. Con detalles más particulares por medio de un ejemplo ilustrativo, una variación de frecuencia de 5° da como resultado una variación de desfase de $6,43^\circ$ y una reducción de ganancia a 0,99 ($\text{sen}(83,57^\circ)$), en lugar de 1,00 ($\text{sen}(90^\circ)$), si el sistema está perfectamente ajustado a 90° a 70 Hz. Esto es mucho más robusto que la mayor parte de los enfoques de cancelación de ruido activa que tienen una alta sensibilidad a la frecuencia de ruido.

El desfase puede lograrse de una serie de formas, incluyendo circuitos de desfase y módulos de retardo de tiempo.

Además de las técnicas analógicas, el desfase puede conseguirse mediante unos esquemas digitales que incluyen un soporte físico configurado por soporte lógico tal como Disposiciones de Puertas Programables en Campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*) o Procesadores de Señales Digitales (DSP, *Digital Signal Processor*), Dispositivos Lógicos Programables (PLD, *Programmable Logic Device*) y Dispositivos Lógicos Programables Complejos (CPLD, *Complex Programmable Logic Device*) que pueden incluir el uso de elementos de memoria tales como tablas de consulta.

En determinados aspectos, la naturaleza robusta del circuito de realimentación permite un valor fijo o constante para el desfase en lugar de un valor medido. El valor fijo o constante podría ser, por ejemplo, un valor previamente determinado, un valor de fábrica, un valor medido intermitente o una cierta combinación de los mismos.

Otra forma de considerar el desfase es en el dominio del tiempo. Por ejemplo, una señal de ruido de 70 Hz tiene un periodo (T) = $1 / \text{Frecuencia} = 1 / 70 \text{ Hz} = 14,29 \text{ ms}$. Un módulo de retardo de tiempo puede ajustarse para retardar la fase de la señal de 70 Hz un $\frac{1}{4}$ de periodo (T) / 4 que representa un retardo = 3,57 ms (aproximadamente). Este retardo de tiempo global calculado incluye unos retardos de tiempo causados por el control de convertidor o por la disposición mecánica del tren de accionamiento, en el que el módulo de retardo de tiempo retarda la diferencia restante, por ejemplo, $t_{\text{retardo}} = 3,57 \text{ ms} - (t_{\text{convertidor}} - t_{\text{mecánica}})$. El retardo de 3,57 ms también es aceptable para una señal de ruido de 65 Hz o de 75 Hz, o la banda de 70 Hz ± 5 Hz. Si el retardo de tiempo de 3,57 ms no puede conseguirse debido a unas constantes de tiempo grandes, tal como la constante de tiempo de convertidor supera 3,57 ms, un retardo de tiempo proporcional a 90 grados + 360 grados (o múltiplos de 360 grados) que es equivalente a aproximadamente 17,86 ms puede aplicarse con un comportamiento de amortiguación similar.

Por ejemplo, a continuación, la señal desfasada se amplifica mediante una fase de ganancia 220 tal como un amplificador, para reforzar la señal de amortiguación a un nivel suficiente para cancelar de forma apropiada el ruido o reducir este a un nivel aceptable. La fase de ganancia puede ser parte del circuito de realimentación usando un cierto nivel de ruido medido o estimado para proporcionar una cierta indicación del nivel para la señal de amortiguación. Puede haber una o más iteraciones correctivas de la señal de amortiguación hasta que se logra un nivel satisfactorio. A continuación, esta señal correctiva desfasada (T_{ref}) 225 se usa como una entrada a la interconexión de par de fuerzas y el sistema de control de convertidor para amortiguar la señal de ruido. En un aspecto, el nivel de ganancia depende de la ganancia de lazo cerrado global del sistema, incluyendo características tales como la medición de ruido, la ganancia de lazo de control eficaz y la "ganancia" mecánica del eje.

Por ejemplo, el sistema usa un sensor para medir el nivel del ruido / vibración y puede determinar si se ha cumplido un nivel aceptable. Puede medirse el nivel de presión sonora o la intensidad de la señal de ruido, y la amortiguación solo tiene lugar si el ruido se encuentra por encima de un determinado umbral. Si el efecto de amortiguación no se mitiga de forma apropiada, pueden realizarse unas iteraciones y / o amplificación adicional de la señal de amortiguación.

Haciendo referencia a la figura 2B, se muestra otro ejemplo del procesamiento para la señal de amortiguación. En el presente ejemplo, una o más señales de ruido 240, 235 pueden procesarse para amortiguar más de una única señal de vibración o de ruido de baja frecuencia. Por ejemplo, el ruido puede provenir de dos o más señales de frecuencia y requerir una amortiguación correspondiente. Puede haber uno o más sensores que están acoplados con el tren de accionamiento que proporciona las una o más señales de ruido.

En el ejemplo, el circuito de amortiguación comprende el filtrado de la señal 230, 235 detectada mediante uno o más filtros 255, 280 para centrarse en la frecuencia de vibración de interés. Por ejemplo, un filtro de paso de banda puede usarse para aislar una banda de frecuencia en el interior de una región de la señal de baja frecuencia. Por lo tanto, la señal de ruido 230, 235 puede filtrarse de forma opcional tal como mediante un filtro de paso de banda o un filtro de paso bajo para rechazar las señales interferentes dependiendo de determinados factores tales como la señal de interés deseada, la intensidad de las señales y el ruido o interferencia.

A continuación, las secciones de desfase 260, 285 pueden desplazar las una o más señales de ruido filtradas para generar una señal de ruido correctiva desfasada. Tal como se hace notar, una amortiguación satisfactoria se consigue siempre que la señal de realimentación esté desfasada un retardo de aproximadamente 90 grados de retraso o $T / 4$.

A continuación, la señal de ruido correctiva desfasada puede amplificarse de forma opcional mediante una o más fases de ganancia 265, 290. Las una o más señales de cancelación de ruido desfasadas resultantes pueden sumarse mediante un sumador 270 y pueden procesarse adicionalmente por un limitador 275 opcional. El limitador 275 puede usarse por razones de seguridad para evitar una señal resultante que podría dañar al personal o al equipo. A continuación, la señal desfasada de amortiguación de ruido (T_{ref}) 280 se usa como una entrada al sistema de control para hacer frente a la señal de ruido.

El ruido transmitido por la estructura a partir de los sistemas eólicos tiende a ser un ruido irradiado relacionado con la fuerza a partir de unas estructuras de vibración de las turbinas eólicas tales como palas, torre y góndola que pueden excitarse mediante unas fuerzas dinámicas que se crean por unos componentes de conversión de potencia de tren de accionamiento tales como el generador y la caja de engranajes. De acuerdo con un ejemplo, la electrónica de generador y de potencia se usan para amortiguar de forma activa este efecto de tonalidad mediante la generación de una fluctuación de par de fuerzas a una frecuencia de ruido y con una fase diferente para contrarrestar el problema de ruido potencial. En lugar de intentar cancelar de forma continua el ruido del engrane de los engranajes, un ejemplo del sistema trabaja para amortiguar de forma eficaz el ruido cuando existe un determinado nivel de ruido. La amortiguación se logra mediante una señal de par de fuerzas que actúa sobre el eje que se modula a la misma frecuencia que la fuente de excitación que da lugar a la amplificación de ruido con una fase diferente. Por ejemplo, amortiguar la amplificación de ruido causada por una excitación del engrane de los engranajes a diversas velocidades. Un aspecto es evitar los picos de resonancia mediante la introducción del par amortiguador por medio del devanado de generador (el eje de alta velocidad), incluso a pesar de que el propio ruido puede causarse en el eje de baja velocidad. Las turbinas eólicas con conversión de potencia plena tienen un convertidor existente que puede usarse para aplicar la señal de par de fuerzas correctiva e involucrar solo una modificación retroactiva menor. La señal de amortiguación de baja potencia corrige el problema de ruido sin un consumo de potencia indebido.

Haciendo referencia a la figura 3, un aspecto se refiere a un convertidor eólico 300, en el que el sistema de reducción de ruido suprime los efectos de ruido que se generan por el tren de accionamiento de la turbina eólica. Por lo general, el convertidor eólico 300 tiene un número de palas 310 que rotan debido a la fuerza del viento. Las palas rotatorias 310 dan lugar a que el eje de baja velocidad 315 rote a una velocidad relativamente baja pero con un gran par de fuerzas. Una caja de engranajes 320 está acoplada con el eje de baja velocidad 315 y transfiere la energía de rotación a un eje de alta velocidad 325. El tren de accionamiento en el presente ejemplo incluye el eje de baja velocidad 315, la caja de engranajes 320 y el eje de alta velocidad 325. El eje de alta velocidad 325 está acoplado con un generador 330 que genera la potencia que puede acondicionarse y acoplarse eléctricamente con una cierta red de suministro eléctrico (que no se muestra).

Uno o más sensores 350 pueden colocarse alrededor del tren de accionamiento en las ubicaciones en las que el ruido audible puede ser problemático. Las ubicaciones para detectar el ruido y la vibración podrían encontrarse en los brazos de par de fuerzas de caja de engranajes, el alojamiento de caja de engranajes, el eje de rotor (el eje de baja velocidad), el cojinete principal que porta el eje de rotor, el bastidor de base de la góndola o la torre. Pueden ser útiles múltiples tipos y ubicaciones de sensor cuando se encuentran presentes diferentes frecuencias naturales a lo largo de los elementos de tren de accionamiento tales como la caja de engranajes 320. Por ejemplo, las señales de ruido de vibración o acústico que se generan en las proximidades del tren de accionamiento, tal como mediante los brazos de par de fuerzas, pueden detectarse por los sensores 350 para detectar la frecuencia y / o la potencia de las señales de ruido.

En un ejemplo, el controlador de amortiguación 360 genera una señal modulada de par de fuerzas de entrehierro que se aplica al controlador 340 del generador 330, interaccionando de este modo con el eje de alta velocidad del tren de accionamiento con el fin de suprimir las componentes de par de fuerzas que resultan en el eje de baja velocidad del tren de accionamiento, que se excitan mediante el engrane de los engranajes. Los generadores 330 están idealmente adaptados para excitar o amortiguar componentes de par de fuerzas alternas por medio de un control de convertidor y, por lo tanto, la señal de ruido correctiva puede introducirse en la electrónica de generador. La señal de par de fuerzas de acuerdo con una realización se introduce en la electrónica de generador mediante la adición de la señal de corrección analógica o digital a una interconexión de señal de referencia de par de fuerzas dada, en la que la señal de par de fuerzas es parte del lazo de control de intensidad / velocidad normal.

De acuerdo con un ejemplo, existe un controlador de convertidor 340 y un controlador de amortiguación 360 independientes, no obstante, en otro ejemplo, el controlador de amortiguación 360 está integrado con el controlador de generador 340 existente de tal modo que las mediciones de sensor se comunican al controlador de convertidor / amortiguación integrado.

De acuerdo con la invención, la frecuencia de par de fuerzas de entrehierro se corresponde con la frecuencia de ruido pero teniendo una fase diferente. El desfase total se corresponde con aproximadamente $T / 4$, con el fin de conseguir una amortiguación electrónicamente ajustable de las componentes de par de fuerzas que excitan el ruido. La señal correctiva desfasada de par de fuerzas dinámico se superpone a la señal de par de fuerzas de entrehierro del generador.

- Haciendo referencia a la figura 4, se muestra un ejemplo para introducir la señal de amortiguación en el generador. Con un detalle más particular, la señal de amortiguación modulada desfasada $440 \Delta T_{ref}$ es una entrada al controlador de intensidad 450. El controlador de intensidad 450 tiene una referencia de intensidad 415 que se usa por el controlador de intensidad 450 para establecer las condiciones operativas apropiadas del sistema. De acuerdo con un ejemplo, la señal de amortiguación 440 es una señal modulada y se combina con la referencia de intensidad 415. El controlador de intensidad 450 controla el par de fuerzas generando una intensidad de tal modo que la señal de salida modulada 475 es una entrada al modulador y el convertidor 490 por medio de una transformación de coordenadas. El convertidor aplica la señal de referencia modificada 475, que tiene la componente de señal de amortiguación de ruido desfasada 440, al generador.
- La figura 5 es un ejemplo adicional que se muestra de un sistema para introducir la señal de amortiguación y reducir el ruido de sistema. En un ejemplo, el controlador de par de fuerzas directo 500 está acoplado con el convertidor 585 que está acoplado con el generador 590.
- Existe un número de señales de entrada tal como una referencia de par de fuerzas 505 que proporciona una indicación del par de fuerzas del generador. La referencia de par de fuerzas 505 puede estar basada en estimaciones o mediciones. También hay una referencia de velocidad 510 que es una entrada a un controlador proporcional – integral - derivativo (controlador PID). El PID se usa para corregir errores entre la referencia de velocidad 510 y la velocidad real 512. La velocidad real 512 puede tomarse a partir de sensores y también puede provenir de un modelo adaptativo (que no se muestra).
- La referencia de par de fuerzas 505 es una entrada a un controlador de referencia de par de fuerzas 525. El controlador de referencia de par de fuerzas 525 también usa la salida de velocidad a partir del PID para generar la señal de mando de par de fuerzas que es una entrada al comparador de par de fuerzas / flujo 540. El comparador de par de fuerzas compara una señal de referencia de par de fuerzas interno con una señal de par de fuerzas real. También hay un comparador de flujo que compara la referencia de flujo interna con una señal de flujo real.
- En un ejemplo, la señal de par de fuerzas a partir del controlador de referencia de par de fuerzas 525 se modifica con la señal de amortiguación de ruido desfasada modulada 550. En otro ejemplo, la señal de amortiguación 550 se añade a la salida del comparador de par de fuerzas / flujo 540.
- La salida a partir del comparador de par de fuerzas / flujo puede incluir un estatus de par de fuerzas, unas señales de control de par de fuerzas y un estatus de flujo. El selector de impulsos óptimos 575 del procesador 570 usa estas señales para generar la señal de control de par de fuerzas directo óptimo que, a continuación, se aplica al convertidor 585.
- La salida del comparador 540 es una entrada a una unidad de procesamiento que realiza las funciones de procesamiento. La unidad de procesamiento se define en términos generales como cualquier dispositivo de cálculo o procesador capaz de realizar un cierto cálculo.
- Haciendo referencia a la figura 6, se muestra una respuesta de representación gráfica simulada de un generador con la designación de dos curvas a y b: a = componente de par amortiguador de generador, b = componente de par de fuerzas de oscilación que da lugar al ruido. En esta representación gráfica, la señal de par de fuerzas o de ruido 610 excita la estructura para irradiar el ruido audible. A este respecto, el par de fuerzas y el ruido audible pueden verse como aspectos relacionados. Por lo general, el par de fuerzas que está asociado con un tren de accionamiento emplea una fuerza contraria para mantener el sistema en equilibrio, y para las cajas de engranajes, por lo general esta fuerza contraria es por medio del brazo de par de fuerzas. La señal de amortiguación modulada 620 se aplica al par de fuerzas de entrehierro y, tal como se muestra, la respuesta de ruido resultante 610 a partir de la estructura (o transmisión) se ve reducida en gran medida.
- De acuerdo con un ejemplo, la señal de ruido puede ser una medición a partir de unas tecnologías de detección tal como se detalla en el presente documento y puede que no sea necesariamente una medición de par de fuerzas. El generador con la señal de realimentación puede entenderse como una señal de corrección de par de fuerzas que es una entrada a la electrónica de generador que se combina con la señal de referencia de par de fuerzas.
- La figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un aspecto de un sistema de amortiguación que muestra el lazo cerrado del circuito de amortiguación que se procesa en tiempo real. El procedimiento comienza en una realización mediante el procesamiento de una señal de ruido 705. La señal de ruido puede medirse, medirse de manera intermitente o estimarse. En un ejemplo, la señal acústica o de vibración se mide por sensores, en el que las mediciones de sensor pueden tomarse en los brazos de par de fuerzas del tren de accionamiento.
- La señal de ruido puede filtrarse y amplificarse para obtener una señal de ruido mejorada en determinadas implementaciones. A continuación, la señal de ruido se desfasa 710. Una forma de desplazar la fase es mediante un retardo de tiempo, y de acuerdo con la invención el desfasador desplaza el retardo de tiempo aproximadamente $T / 4$ o un retraso de 90 grados.
- A continuación, la señal de amortiguación desfasada se modula para crear una señal de par de fuerzas modulada 715. La modulación puede ser una onda sinusoidal con la frecuencia de la onda sinusoidal siendo aproximadamente

la frecuencia del ruido. La señal de par de fuerzas modulada se aplica, en un ejemplo, al sistema de control de un convertidor 720.

5 Una etapa opcional es medir de forma periódica (o tras un cierto suceso) la señal de ruido y proporcionar una señal de amortiguación correctiva si la señal de ruido medida se encontraba por encima de un determinado umbral 725. El umbral dependería de determinadas condiciones, siendo el resultado global una reducción del ruido ambiental a un nivel seguro. Podrían emprenderse múltiples iteraciones hasta que se lograra una amortiguación satisfactoria.

10 En un aspecto, el sistema de reducción de ruido para la caja de engranajes de la turbina eólica es una solución de bajo coste que usa una electrónica y un equipo de detección convencional. Un sistema de este tipo puede integrarse como una característica de nuevos productos o como una modificación retroactiva para las turbinas eólicas con unas cajas de engranajes "ruidosas" o en entornos en los que el nivel de ruido haya de mantenerse tan bajo como sea posible. El sistema también puede aplicarse a otras aplicaciones de tren de accionamiento con problemas de ruido, en especial cuando están involucradas cajas de engranajes.

15 Tal como se detalla en el presente documento, un ejemplo prevé la aplicación del silenciador electrónico o sistema de reducción de ruido sin conocimiento *a priori* alguno en lo que respecta a la causa de la señal de ruido. Debido a que la fuente de ruido real es difícil de extraer, no importa qué está dando lugar al ruido audible elevado, tal como una componente de 70 Hz. Todo lo que se requiere es un cierto conocimiento de la señal acústica o de vibración.

20 La señal de ruido se mide, en un aspecto, tal como empleando un sensor en los brazos de par de fuerzas. La señal de ruido puede procesarse para obtener una componente de frecuencia de ruido mejor definida. Por ejemplo, la señal puede amplificarse y/o filtrarse antes de desfasarse. A continuación, la señal de frecuencia de ruido desfasada se usa para modular el par de fuerzas de entrehierro de generador por medio del convertidor de fuente de tensión instalado. El convertidor de fuente de tensión en un ejemplo y, por lo general, tiene un controlador de par de fuerzas.

25 Los sistemas de turbinas eólicas actuales son una fuente de energía renovable práctica y eficiente. Las mejoras al sistema han aumentado las eficiencias y han conducido a unas demandas aumentadas. Además, la ubicación de los emplazamientos de turbina eólica se está acercando a las residencias a través de parques eólicos o a partir de instalaciones en el emplazamiento del propietario de la vivienda o de la empresa. Con el fin de conservar el apoyo del público para las turbinas eólicas, la industria eólica aborda cualesquiera problemas de ruido que pudieran surgir y tener remedios adecuados.

30 Las cajas de engranajes en relación con las turbinas eólicas son relativamente complejas debido a que las fluctuaciones aerodinámicas dan lugar a unos grandes cambios de par de fuerzas. A medida que va aumentando el tamaño de las turbinas eólicas, las cajas de engranajes se están volviendo más grandes y más complejas. Las cajas de engranajes más grandes pueden ser más propensas a los problemas de generación de ruido mecánico. Tales cajas de engranajes incluyen los trenes de accionamiento de generadores múltiples que pueden proporcionar múltiples trayectorias de potencia por medio de múltiples conjuntos de engranajes.

35 En el ejemplo de la turbina eólica, el sistema de reducción de ruido que se detalla en el presente documento permite una reducción del ruido en los trenes de accionamiento tales como cajas de engranajes. La reducción de ruido se consigue mediante el aumento del comportamiento de amortiguación de la estructura a una frecuencia en relación con la excitación de ruido, tal como la excitación del engrane de los engranajes, por medio del circuito de reducción de ruido para el sistema de accionamiento eléctrico. El circuito de reducción de ruido genera un par de fuerzas dinámico que puede superponerse al par de fuerzas de entrehierro del generador eléctrico, en el que el par de fuerzas dinámico tiene la misma frecuencia que la señal de ruido (por ejemplo, en la gama de 40 - 70 Hz), pero una fase diferente.

45 Un beneficio del sistema de reducción de ruido que se detalla en el presente documento es que este reduce los problemas de ruido con un consumo de potencia mínimo. Otra característica es que este puede implementarse como una modificación retroactiva a los sistemas existentes, de tal modo que solo aquellos sistemas que requieren unos requisitos de ruido inferiores requerirían una instalación de modificación retroactiva o de fábrica.

50 A pesar de que los problemas de ruido en relación con los trenes de accionamiento pueden ser complejos, el presente sistema no se restringe a una única fuente de ruido. Más bien, un ejemplo del presente sistema no presta atención a las fuentes del ruido y usa una señal acústica o de vibración medida para crear una señal de ruido de cancelación que se desfasa, y se aplica al par de fuerzas de entrehierro del generador. Puede haber múltiples salidas de ruido a partir del tren de accionamiento y una o más señales de amortiguación correctivas.

Debe entenderse fácilmente que el procedimiento de reducción de ruido en el presente documento puede aplicarse a diversas máquinas eléctricas, incluyendo tanto motores como generadores de una forma similar y que la ilustración en las figuras que se refieren a generadores está prevista para fines de explicación.

55 Una de las ventajas del sistema de reducción de ruido en el presente documento es que este puede coexistir y funcionar en conjunción con otras implementaciones de reducción de ruido activa y pasiva. Este busca reducir el ruido que ya existe en el sistema. Este puede estar orientado a una banda de frecuencia tonal particular que existiría

de lo contrario.

5 La descripción anterior de la realización de la invención se ha presentado para los fines de ilustración y de descripción. No se pretende que esta sea exhaustiva o que limite la invención a la forma precise que se divulga. Son posibles muchas modificaciones y variaciones a la luz de la presente divulgación. No se pretende que el ámbito de la invención esté limitado por la presente descripción detallada, sino más bien por las reivindicaciones que se adjuntan al presente documento.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para amortiguar ruido audible procedente de un tren de accionamiento de una turbina eólica acoplada con un generador eléctrico, estando causado dicho ruido audible por vibraciones a determinadas velocidades de la turbina eólica a la frecuencia de unos puntos de resonancia acústica de la cadena de accionamiento, comprendiendo el procedimiento:
- detectar una señal de ruido procedente de la cadena de accionamiento para medir la frecuencia de ruido y la potencia de ruido y procesar la señal de ruido a partir de dicho tren de accionamiento, en el que la señal de ruido tiene una o más frecuencias de ruido de uno o más puntos de resonancia acústica del tren de accionamiento; comprendiendo dicho procesamiento:
- 10 medir el nivel de presión sonora de la señal de ruido y, solo si dicho nivel se encuentra por encima de un umbral, generar una señal de amortiguación correctiva, en el que dicha señal de amortiguación correctiva tiene un desfase de aproximadamente 90 grados y con una frecuencia o frecuencias aproximadamente iguales a dicha frecuencia o frecuencias de ruido del punto o puntos de resonancia acústica;
- 15 modular una señal de par de fuerzas con dicha señal de amortiguación correctiva a la frecuencia o frecuencias medidas de la señal de ruido para producir una señal correctiva de par de fuerzas modulada; y
- aplicar dicha señal correctiva de par de fuerzas modulada a un par de fuerzas de entrehierro de dicho generador eléctrico, reduciendo de este modo dicho ruido audible a dichas velocidades que se corresponden con la frecuencia o frecuencias del punto o puntos de resonancia acústica.
- 20 2. El procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado por al menos uno de filtrar, amplificar y limitar dicha señal de amortiguación correctiva.
3. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque se realiza en tiempo real o de manera intermitente.
4. El procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado porque existe al menos una dicha señal de ruido y esta está seleccionada de entre al menos uno de un valor constante, un valor estimado y un valor medido.

25

5

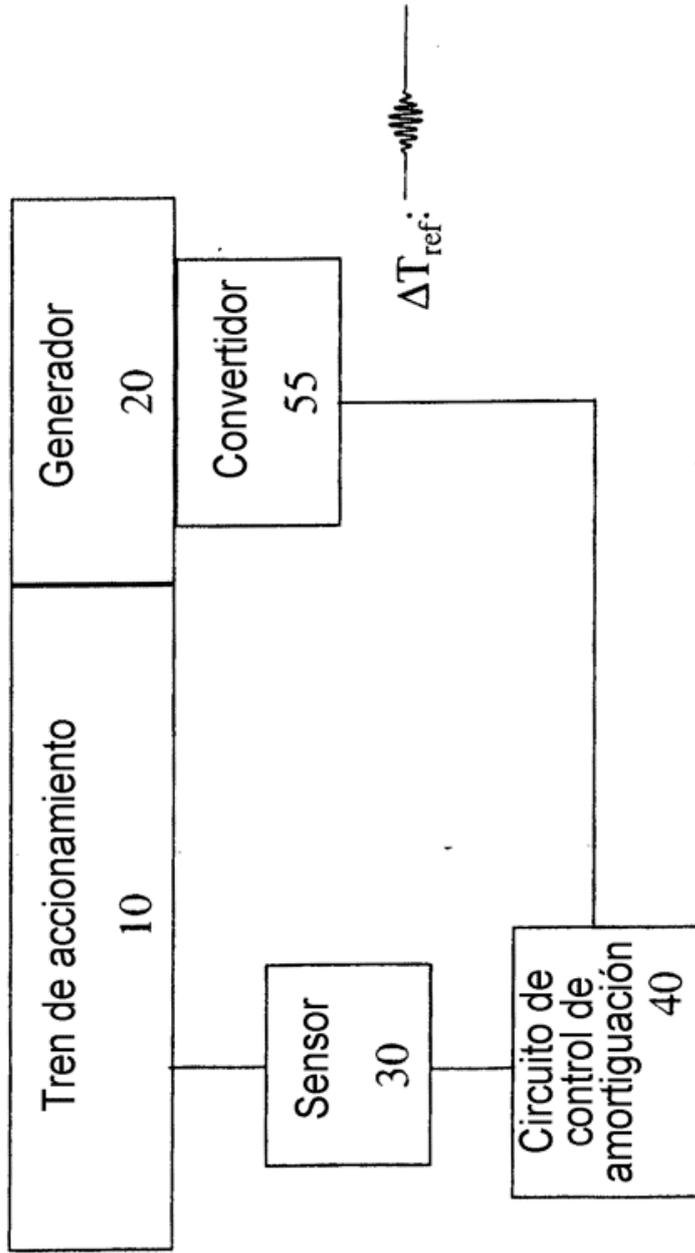


FIG. 1

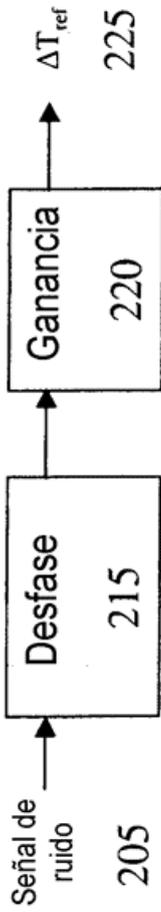
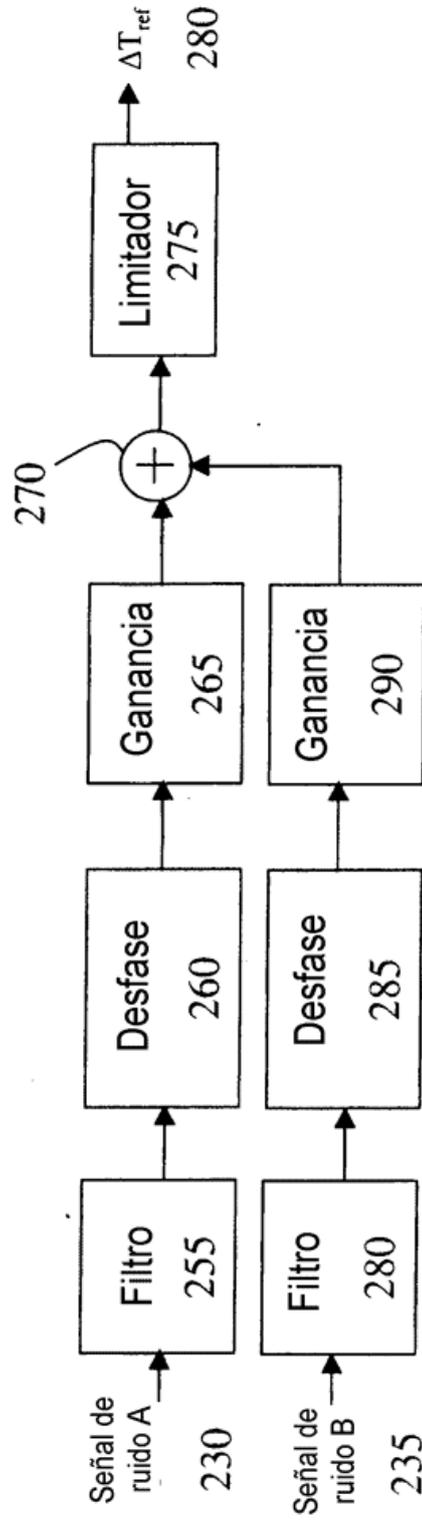


FIG. 2A



•
•
•

FIG. 2B

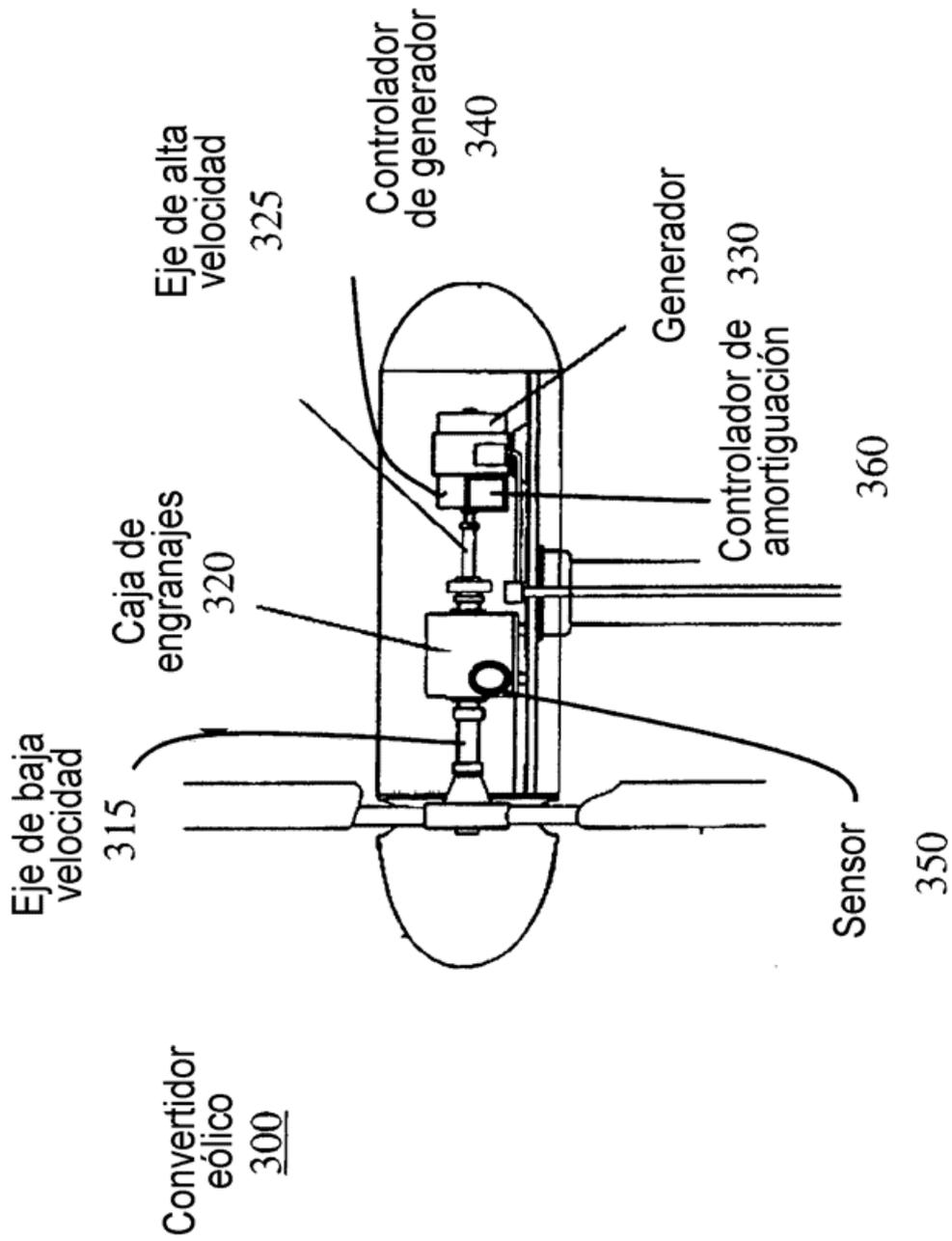


FIG. 3

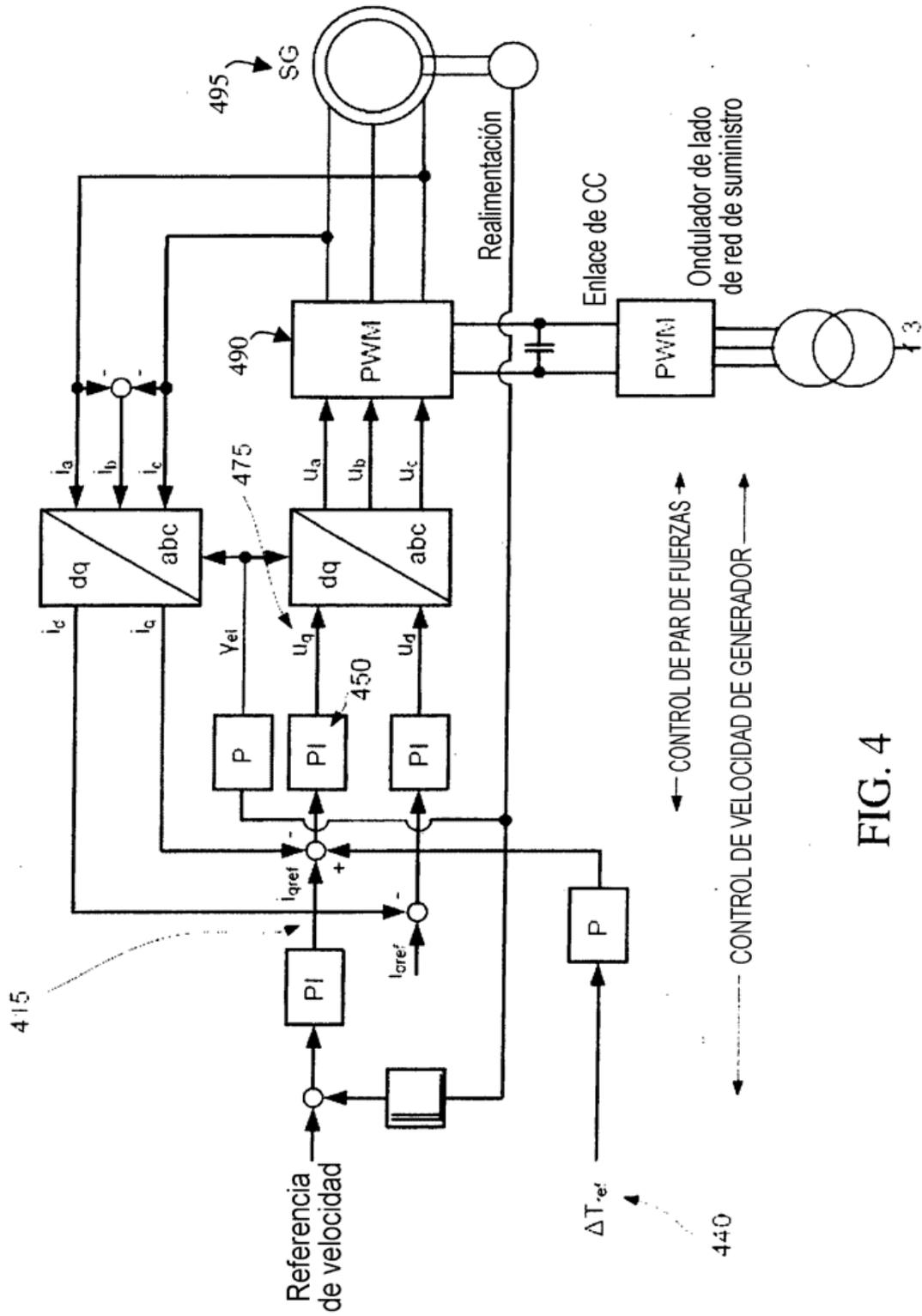


FIG. 4

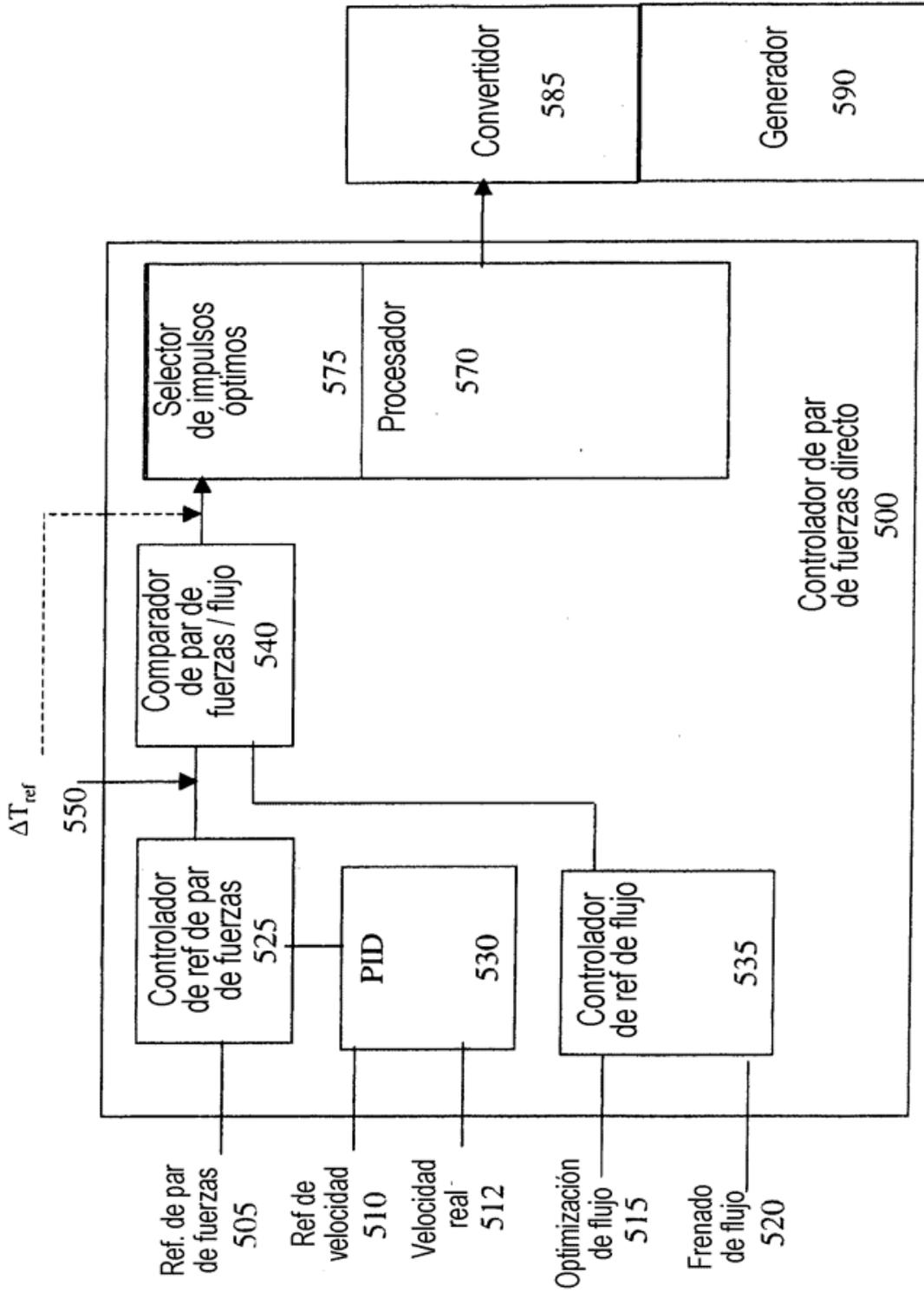


FIG. 5

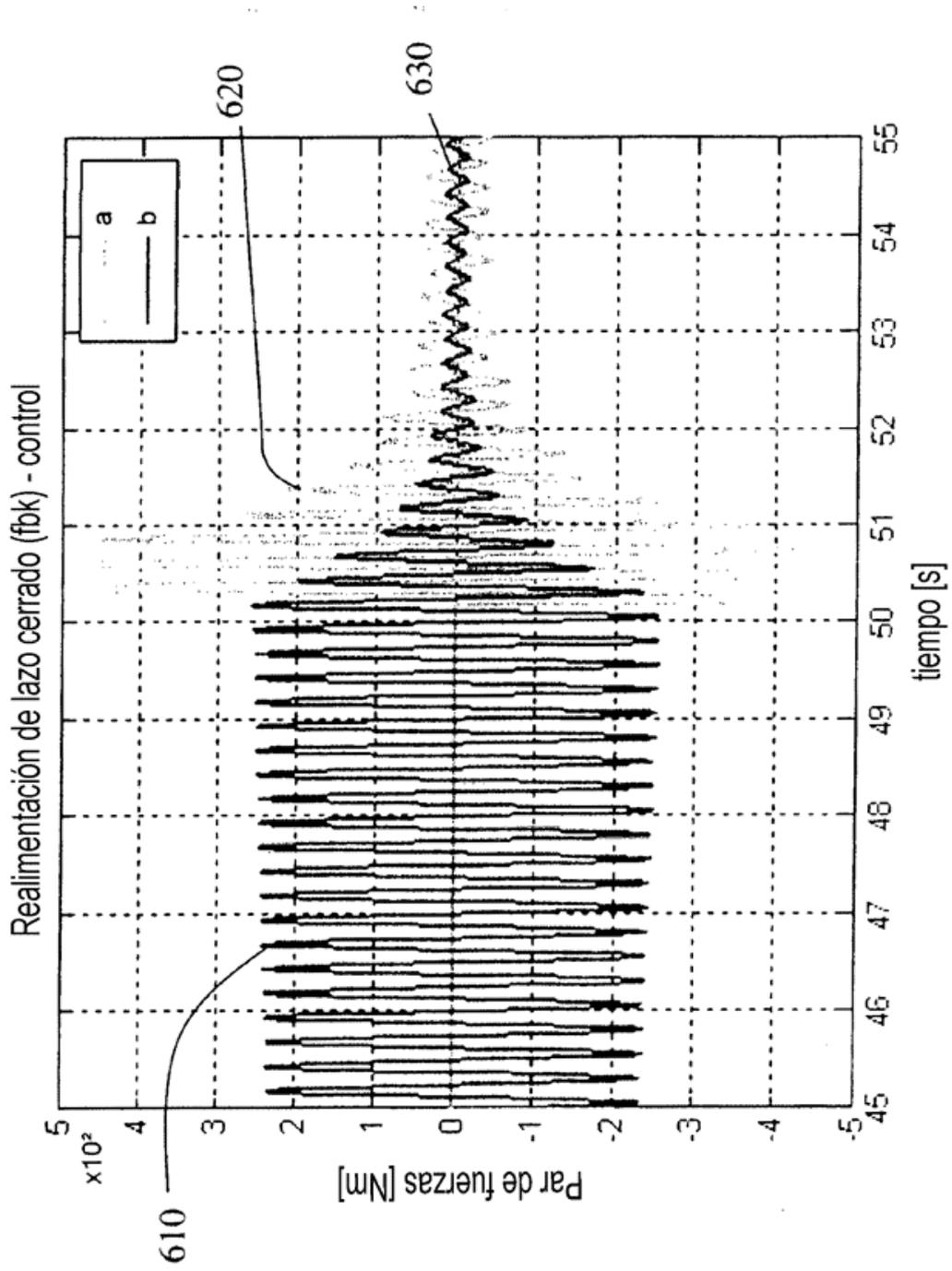


FIG. 6

7/7

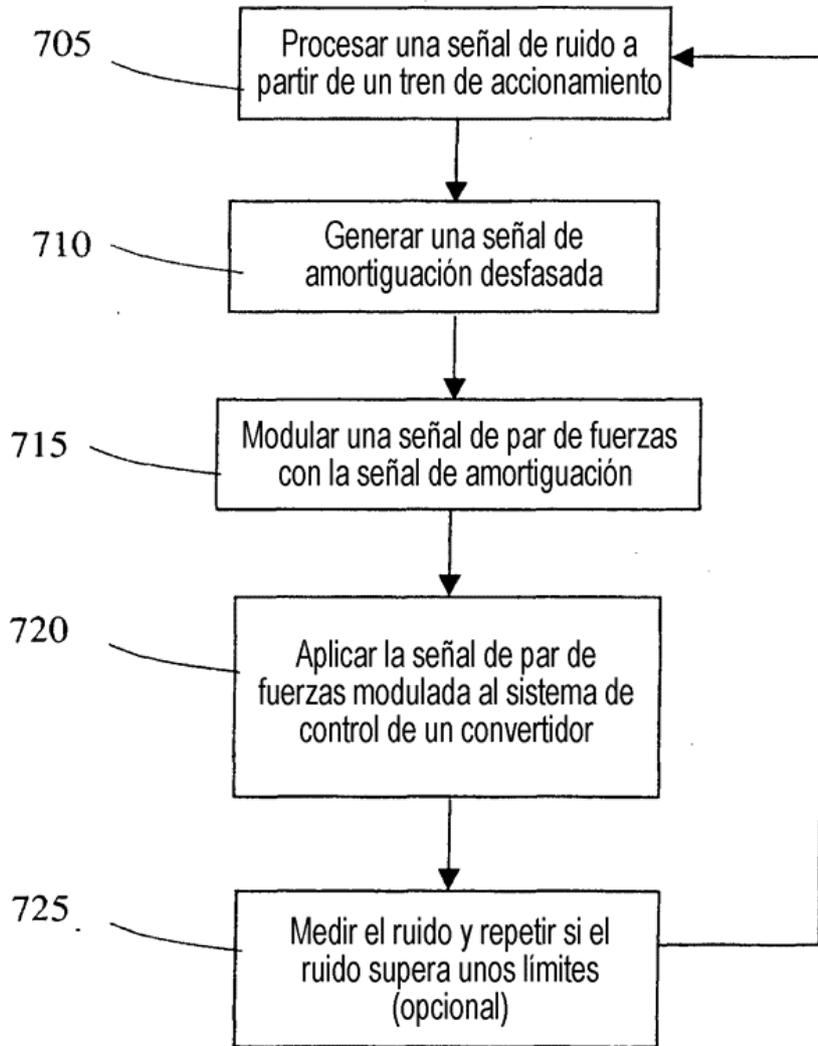


FIG. 7