

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 901 007**

51 Int. Cl.:

H02K 7/02	(2006.01)	F16F 15/18	(2006.01)
F16F 15/30	(2006.01)	F16C 19/52	(2006.01)
F16C 32/00	(2006.01)		
H02K 21/02	(2006.01)		
H02K 7/08	(2006.01)		
F16F 15/03	(2006.01)		
F16F 15/315	(2006.01)		
F16C 32/04	(2006.01)		
H02K 7/09	(2006.01)		
F16F 15/00	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.07.2013** **E 17185643 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.10.2021** **EP 3267564**

54 Título: **Volante de inercia acoplado magnéticamente**

30 Prioridad:

30.07.2012 US 201261677056 P
04.11.2012 US 201261722174 P
06.03.2013 US 201361773158 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.03.2022

73 Titular/es:

CHAKRATEC LTD. (100.0%)
Hamelacha 13A
7152026, Lod, IL

72 Inventor/es:

BEN DAVID, ILAN;
ZOHAR, NIR y
PINCU, DAVID

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 901 007 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

Volante de inercia acoplado magnéticamente

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a volantes de inercia. Más particularmente, la presente invención se refiere a un volante de inercia acoplado magnéticamente.

10 Antecedentes de la invención

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica son útiles tanto para los productores como para los consumidores de energía eléctrica. Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica pueden incluir baterías de almacenamiento u otros sistemas de almacenamiento de base química, condensadores u otros sistemas de almacenamiento de base eléctrica, almacenamiento térmico o sistemas de almacenamiento de energía mecánica. Los sistemas de almacenamiento de energía mecánica pueden incluir sistemas de almacenamiento basados en la gravedad o sistemas inerciales. Los sistemas inerciales pueden incluir sistemas de volante de inercia.

Un sistema de volante de inercia típico consiste en un volante de inercia en forma de masa giratoria que comparte un árbol común con un rotor de una unidad de motor/generador. La masa giratoria puede incluir un material que sea lo suficientemente denso y fuerte para almacenar eficazmente la energía mientras permanece intacta y en funcionamiento. Por ejemplo, la masa giratoria puede incluir acero, un material compuesto o una combinación de dichos materiales. La unidad de motor/generador funciona como motor durante una fase de carga del sistema y como generador durante una fase de descarga.

Durante una fase de carga, la energía eléctrica que será almacenada por el volante de inercia se suministra a la unidad de motor/generador desde un sistema de generación o desde una red eléctrica en forma de corriente eléctrica. La unidad de motor/generador funciona entonces como un motor eléctrico. La corriente hace que el rotor del motor genere un par positivo que proporciona una aceleración angular para aumentar la velocidad de rotación y, por lo tanto, la energía cinética de rotación del volante de inercia. El volante de inercia alcanza una velocidad de rotación deseada a la que el volante de inercia está almacenando una cantidad deseada de energía. (Dado que la energía cinética de rotación es proporcional al cuadrado de la velocidad angular, los volantes de inercia suelen estar diseñados para girar a alta velocidad). Entonces finaliza la fase de carga.

Después de la fase de carga, puede comenzar una fase de almacenamiento (generalmente más larga que la fase de carga). Durante la fase de almacenamiento, el grupo motor/generador puede desconectarse de cualquier circuito eléctrico externo, quedando así en modo inactivo. Por lo tanto, la inercia rotacional del volante de inercia hace que el volante de inercia continúe girando, almacenando la energía como energía cinética rotacional del volante de inercia. Durante la fase de almacenamiento, pueden actuar varias fuerzas de fricción para reducir la velocidad de rotación del volante de inercia y provocar la pérdida de la energía almacenada. Por lo tanto, durante la fase de almacenamiento, se puede proporcionar corriente de forma intermitente y durante breves períodos a la unidad de motor/generador para restaurar la energía perdida.

Cuando se va a extraer energía del sistema de volante de inercia, se ingresa a una fase de descarga. Durante una fase de descarga, la energía que se almacena en el volante de inercia se convierte en energía eléctrica y se pone a disposición para su uso (por ejemplo, a través de una red de energía eléctrica). La unidad de motor/generador está conectada a un circuito eléctrico externo y funciona como generador. La rotación del volante de inercia hace girar el rotor del generador y genera energía eléctrica mientras aplica una fuerza de desaceleración o frenado al volante de inercia. La fase de descarga puede continuar hasta que ya no sea necesaria la energía almacenada. El sistema de volante de inercia puede entonces volver a la fase de almacenamiento. En otros casos, la velocidad de rotación del volante de inercia puede reducirse durante la fase de descarga a menos de una velocidad mínima (por ejemplo, por debajo de la cual el sistema ya no es capaz de generar energía eléctrica utilizable). En este caso, el sistema puede entrar en una fase de espera.

Durante la fase de espera, el volante de inercia puede estar parado o puede estar girando a una velocidad mínima. El motor/generador se desconecta de los circuitos externos y se coloca en modo inactivo. La fase de espera puede continuar hasta que haya energía eléctrica disponible para volver a cargar el volante de inercia.

Para un productor de energía, el almacenamiento de energía permite el suministro de energía eléctrica a la red eléctrica a un ritmo constante. Por ejemplo, la tasa de generación de electricidad utilizando fuentes renovables como la energía solar, eólica o mareomotriz puede variar a medida que varía la fuente de energía. Por lo tanto, en momentos en que la producción de energía eléctrica excede la demanda, se puede almacenar el exceso de energía producida. Por otro lado, en momentos en que la demanda de energía eléctrica excede la producción, la energía almacenada puede proporcionarse a la red eléctrica para que la utilicen los consumidores. De manera similar, el almacenamiento de energía puede permitir la producción de energía eléctrica a un ritmo constante, independientemente de la demanda momentánea. Por lo tanto, la energía eléctrica puede generarse sin necesidad

de (por ejemplo, generadores a base de combustible) que funcionan solo cuando la demanda es alta (y pueden producir más carbono o contaminantes que los generadores que funcionan constantemente).

De manera similar, un consumidor puede utilizar un sistema de almacenamiento para ahorrar costes de energía. Por ejemplo, el coste de la energía eléctrica de la red puede variar periódicamente. Una estructura de tarifas de energía eléctrica puede cobrar más por energía eléctrica durante las horas pico de demanda y menos durante las horas pico (por ejemplo, una tarifa durante las horas pico puede triplicar la tarifa durante las horas pico). Por tanto, un consumidor con un sistema de almacenamiento de energía puede comprar energía eléctrica durante las horas de menor actividad y utilizar la energía ahorrada durante las horas de máxima demanda.

En comparación con otras técnicas, sistemas o métodos de almacenamiento de energía, un volante de inercia ofrece algunas ventajas. Por ejemplo, el número de ciclos de carga/descarga es prácticamente ilimitado, limitado solo por el desgaste de las partes mecánicas. Por tanto, la cantidad y frecuencia del mantenimiento requerido también pueden ser bajas en comparación con otros sistemas. Los sistemas de volante de inercia también pueden ser relativamente insensibles a factores ambientales como los cambios de temperatura. Un sistema de volante de inercia no requiere el uso de materiales peligrosos, no emite gases nocivos y los componentes del sistema pueden ser reciclables al final de la vida útil del sistema. El documento WO 95/27326 describe un sistema de volante de inercia con un estator que está montado de forma deslizante en el árbol, lo que permite ajustar un espacio entre el estator y el rotor/volante de inercia. Cuando se proporciona energía al volante de inercia o se extrae del mismo, el estator se coloca de manera que el espacio sea pequeño para proporcionar una fuerte interacción electromagnética entre el estator y el volante de inercia. Por el contrario, cuando el volante de inercia gira libremente, el estator se coloca de manera que el espacio sea lo suficientemente grande como para minimizar el arrastre electromagnético en el volante de inercia.

El documento DE 29923359 describe el almacenamiento de energía por volante de inercia con un motor/generador eléctrico cuyo rotor gira con el volante de inercia y provisto de al menos un cojinete magnético axial.

Sumario de la invención

Por lo tanto, se proporciona, de acuerdo con la presente invención, un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia para almacenar energía eléctrica, el sistema incluye: un volante de inercia que incluye una masa giratoria y un árbol, la masa configurada para girar junto con el árbol, el volante de inercia está encerrado dentro una caja de vacío que se puede evacuar para formar un vacío, el árbol soportado por cojinetes en lados opuestos de la masa giratoria; y una unidad de motor/generador eléctrico de bastidor abierto que tiene un estator anular ubicado fuera de la caja y un rotor, estando el rotor fijado al árbol en voladizo dentro de la caja para girar dentro del estator y acoplarse magnéticamente al estator.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el volante de inercia incluye plomo envuelto en una carcasa que incluye fibra de carbono.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el volante de inercia incluye una pluralidad de fibras de vidrio, estando cada fibra envuelta al menos parcialmente alrededor de una columna de una pluralidad de columnas que están dispuestas en un patrón circular que está centrado en un eje de rotación del volante de inercia, de modo que cada fibra se extienda sustancialmente radialmente hacia fuera desde el árbol cuando el volante de inercia gira.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el volante de inercia incluye una estructura con una distribución de masa excéntrica que puede girar para ajustar un equilibrio del volante de inercia.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, la sección de la caja entre el rotor y el estator incluye vidrio.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, los cojinetes incluyen un cojinete mecánico para soportar continuamente un árbol de la carga giratoria para mantener el árbol en un eje de rotación sustancialmente fijo y un conjunto de estabilización magnética que incluye una pluralidad de electroimanes dispuestos alrededor del árbol, el sistema incluye además un circuito de control para controlar un campo magnético resultante generado por los electroimanes de manera que el campo magnético actúa sobre un elemento ferromagnético del árbol para reducir las fuerzas de desequilibrio que actúan sobre el árbol.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el sistema incluye un sensor para detectar una vibración del árbol, estando configurada la circuitería de control para controlar el campo magnético resultante para minimizar la vibración detectada.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el sistema incluye además: una pluralidad de volantes de inercia; un bus de corriente continua (CC); una pluralidad de unidades de motor/generador, estando acoplada magnéticamente cada unidad de motor/generador de la pluralidad de unidades de motor/generador a un volante de inercia de dicha pluralidad de volantes de inercia; una pluralidad de controladores/inversores, estando

5 cada controlador/inversor acoplado eléctricamente a una unidad de motor/generador de dicha pluralidad de unidades de motor/generador y al bus de CC; y un controlador central para controlar cada controlador/inversor a fin de establecer una tasa de descarga para cada uno de los volantes de inercia cuando su unidad de motor/generador está funcionando en modo de descarga, y para aumentar el nivel de tensión de una señal de tensión generada por la unidad de motor/de generador en el modo de descarga.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, una tapa de la caja entre el estator y el rotor incluye un material magnéticamente susceptible.

10 Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el material magnéticamente susceptible incluye fibra de vidrio.

Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el material magnéticamente susceptible incluye un material compuesto de vidrio.

15 Además, de acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, la unidad de motor/generador incluye un motor de CC.

20 Breve descripción de los dibujos

Para comprender mejor la presente invención y apreciar sus aplicaciones prácticas, se proporcionan las siguientes figuras y se hace referencia a ellas a continuación. Cabe señalar que las figuras se dan solo como ejemplos y de ninguna manera limitan el ámbito de la invención tal como se define en las reivindicaciones. Los mismos componentes se indican con los mismos números de referencia.

25 La figura 1 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia con un volante de inercia acoplado magnéticamente a un rotor de una unidad de motor/generador.

La figura 2 ilustra esquemáticamente el uso compartido de una única unidad de motor/generador mediante una pluralidad de unidades de volante de inercia de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia.

30 La figura 3 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia con transmisión de reducción magnética.

La figura 4 ilustra esquemáticamente un volante de inercia con una construcción de carcasa.

La figura 5A ilustra esquemáticamente un volante de inercia de tipo cepillo que incluye varillas radialmente salientes.

35 La figura 5B ilustra esquemáticamente una disposición escalonada de varillas del volante de inercia de tipo cepillo mostrado en la figura 5A.

La figura 6 ilustra esquemáticamente el funcionamiento de un soporte de varilla del volante de inercia de tipo cepillo mostrado en la figura 5A.

La figura 7 ilustra esquemáticamente el funcionamiento de una férula plegable para sujetar una varilla saliente.

40 La figura 8 ilustra esquemáticamente una variante del volante de inercia de tipo cepillo que se muestra en la figura 5A, en el que se pesan las varillas radialmente salientes.

La figura 9 ilustra esquemáticamente la estructura de un casete de un volante de inercia similar a un cepillo de fibra de vidrio.

La figura 10 ilustra una técnica para formar un haz de fibras para el casete mostrado en la figura 9.

45 La figura 11 ilustra esquemáticamente una unidad de motor/generador de bastidor abierto, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 12 ilustra esquemáticamente un grupo de volantes de inercia, de acuerdo con una realización de la presente invención.

50 La figura 13A ilustra esquemáticamente un sistema de equilibrio magnético activo para un volante de inercia de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia.

La figura 13B muestra una vista superior del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A.

La figura 13C ilustra esquemáticamente el control del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A usando un puente en H trifásico.

55 La figura 13D ilustra esquemáticamente el control del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A usando amplificadores de potencia.

La figura 14A es una ilustración esquemática de un conjunto de equilibrado de volante de inercia para un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia.

La figura 14B es una vista lateral del conjunto de equilibrado del volante de inercia que se muestra en la figura 14A.

60 La figura 15 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que incluye una serie de unidades de volante de inercia.

La figura 16 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que está conectado directamente a un bus de CC de energía renovable.

65 La figura 17 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que incluye un bus de CC de tensión constante, de acuerdo con una realización de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

5 En la siguiente descripción detallada, se exponen numerosos detalles específicos con el fin de proporcionar una comprensión completa de la invención. Sin embargo, los expertos en la técnica entenderán que la invención se puede poner en práctica sin estos detalles específicos. En otros casos, no se han descrito en detalle métodos, procedimientos, componentes, módulos, unidades y/o circuitos bien conocidos para no oscurecer la invención.

10 Las realizaciones de la invención pueden incluir un artículo como un medio legible por ordenador o procesador, o un medio de almacenamiento de ordenador o procesador, como por ejemplo una memoria, una unidad de disco o una memoria flash USB, codificación, incluyendo o almacenamiento de instrucciones, por ejemplo, instrucciones ejecutables por ordenador, que cuando son ejecutadas por un procesador o controlador, llevan a cabo métodos descritos en este documento.

15 De acuerdo con la presente invención, un sistema de almacenamiento de energía por volante de inercia incluye un volante de inercia. El volante de inercia, así como cualquier árbol, eje u otro componente giratorio que gire junto con el volante de inercia, está encerrado dentro de una caja de vacío. El aire u otros contenidos gaseosos o fluidos de la caja de vacío pueden evacuarse para formar un vacío dentro de la caja de vacío.

20 Encerrar el volante de inercia dentro del vacío que se forma dentro de una cámara de vacío evacuada puede ser ventajoso. Operar el volante de inercia en vacío minimiza el arrastre de aire en los componentes giratorios del volante de inercia.

25 De acuerdo con las realizaciones de la presente invención, algunos o todos los componentes de una unidad de motor/generador del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia están ubicados fuera de la caja de vacío. Según la invención reivindicada, un estator del motor/generador está situado fuera de la caja de vacío, mientras que un rotor de la unidad de motor/generador está situado dentro de la caja de vacío.

30 En realizaciones que no forman parte de la presente invención, la colocación de la unidad de motor/generador fuera de la caja de vacío puede ser ventajosa en comparación con un sistema en el que la unidad de motor/generador también está encerrado dentro de una caja de vacío. Por ejemplo, la colocación de la unidad de motor/generador fuera del vacío puede permitir que una unidad de motor/generador se pueda mover entre una serie de volantes de inercia cerrados. Por tanto, la unidad de motor/generador móvil puede acoplarse en diferentes momentos a diferentes volantes de inercia de la matriz. De esta manera, al reducir el número de unidades de motor/generador requeridas, se puede reducir el coste de un sistema de volante de inercia múltiple (en relación con un sistema que requiere una unidad de motor/generador dedicada para cada volante de inercia). Además, la colocación de la unidad de motor/generador fuera de la caja de vacío puede simplificar el enfriamiento de la unidad de motor/generador (por ejemplo, al permitir la refrigeración por convección o por conducción).

40 En un ejemplo, el volante de inercia está acoplado a la unidad de motor/generador mediante un acoplamiento magnético. El acoplamiento magnético del volante de inercia a la unidad de motor/generador puede resultar ventajoso. El acoplamiento magnético elimina cualquier requisito de sellado al vacío alrededor del árbol del volante de inercia que podría introducir fricción mecánica en el árbol.

45 El acoplamiento magnético puede incluir el acoplamiento de un primer elemento magnético giratorio del volante de inercia que gira junto con el volante de inercia a un segundo elemento magnético que gira junto con el rotor de la unidad de motor/generador. En este caso, el rotor de la unidad de motor/generador se encuentra fuera de la caja de vacío. En este caso, el acoplamiento magnético puede permitir que el motor deje de girar cuando está en modo inactivo. Por ejemplo, el primer y segundo elementos magnéticos pueden separarse para desacoplar las rotaciones. Esto puede reducir el desgaste de los componentes giratorios y los cojinetes de la unidad de motor/generador, así como también reducir las pérdidas causadas por las corrientes parásitas y por la histéresis dentro del núcleo de hierro del estator.

50 El acoplamiento magnético puede incluir una interacción electromagnética entre un rotor de la unidad de motor/generador que gira junto con el volante de inercia (por ejemplo, en el extremo de un árbol del volante de inercia dentro de la caja de vacío) con un estator de la unidad de motor/generador que está ubicado fuera de la caja de vacío.

60 La masa del volante de inercia puede ser superior a 50 kg. Más específicamente, la masa puede estar en el intervalo de 100 kg a 200 kg.

La figura 1 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia con un volante de inercia acoplado magnéticamente a un rotor de una unidad de motor/generador.

65 El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia 90 incluye una unidad de volante de inercia 100 y una unidad de motor/generador 200.

La unidad de volante de inercia 100 incluye el volante de inercia 110. El volante de inercia 110 incluye una masa que puede girar alrededor del árbol del volante de inercia 140. El árbol del volante de inercia 140 está soportado por cojinetes 120. Por ejemplo, los cojinetes 120 pueden incluir cojinetes de bolas hechos, por ejemplo, de acero o de materiales cerámicos, cojinetes magnéticos, una combinación de cojinetes magnéticos y cojinetes de bolas u otro tipo de cojinete. El árbol del volante de inercia 140 y el volante de inercia 110 pueden girar a una alta velocidad angular dentro de la caja de vacío 150.

El árbol del volante de inercia 140 está provisto de una placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 en un extremo del árbol del volante de inercia 140 que está próximo a la unidad de motor/generador 200. La placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 está montada en voladizo al árbol del volante de inercia 140. Como se usa en este documento, la fijación en voladizo o el montaje de un objeto (por ejemplo, una placa de acoplamiento o rotor) a un árbol indica que el objeto está soportado solo por el árbol, sin ningún soporte en el lado del objeto opuesto al lado desde el cual el árbol se extiende. La placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 puede incluir uno o más imanes, o un material ferromagnético que es atraído por un imán en la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 de la unidad de motor/generador 200. Los imanes pueden incluir imanes permanentes o electroimanes. Los imanes pueden estar incrustados o encerrados dentro de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 o pueden montarse en una superficie de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. Alternativamente o además de estar montada en un extremo del árbol del volante de inercia 140, una placa de acoplamiento magnético puede montarse directamente en el volante de inercia 110 o en otro componente de la unidad de volante de inercia 100 que gira con la misma velocidad de rotación que el volante de inercia 110.

La placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 puede hacerse funcionar para funcionar como parte de un acoplamiento magnético a la unidad de motor/generador 200. Por ejemplo, la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 se puede acoplar a la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 de la unidad de motor/generador 200. La placa de acoplamiento magnético de motor/generador 210 puede incluir uno o más imanes, o un material ferromagnético que es atraído por un imán en la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. La placa de acoplamiento magnético de motor/generador 210 puede configurarse para que pueda girar con un rotor del motor/generador 220. La placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 puede colocarse cerca (por ejemplo, a unas pocas décimas de milímetro) de la cubierta de acoplamiento 160 de la caja de vacío 150. De manera similar, la placa de acoplamiento magnético de motor/generador 210 puede colocarse cerca de (por ejemplo, dentro de unas pocas décimas de milímetro) la cubierta de acoplamiento 230 de la caja de la unidad de motor/generador 250. Los dispositivos de acoplamiento magnético de alto par son conocidos en la técnica y están disponibles comercialmente.

Todas o parte de las cubiertas de acoplamiento 160 y 230 pueden estar construidas de un material magnéticamente susceptible que permita el acoplamiento magnético entre la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 y la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210. Por ejemplo, la cubierta de acoplamiento 160 o 230 puede incluir aluminio, vidrio, plástico u otro material magnéticamente susceptible.

La placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 puede estar conectada al árbol 215 de la unidad de motor/generador 200. El árbol 215 puede estar conectado (directa o indirectamente, por ejemplo, mediante una transmisión 240) a un rotor del motor/generador 220.

En un ejemplo, la unidad de motor/generador 200 puede estar encerrada dentro de la caja de motor/generador 250. La caja de motor/generador 250 puede sellarse para aislar el motor/generador 220 del entorno ambiental. En este caso, la caja de motor/generador 250 puede evacuarse o llenarse con un gas enrarecido (por ejemplo, aire).

En otros ejemplos, el motor/generador 220 y la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 (y la transmisión 240) pueden estar abiertos a la atmósfera ambiental. La exposición del motor/generador 220 a la atmósfera puede permitir el uso de componentes estándar en la unidad de motor/generador 200. Además, exponer el motor/generador 220 a la atmósfera puede simplificar el enfriamiento del motor/generador 220 (por ejemplo, utilizando técnicas estándar de conducción o convección de aire o líquido) y puede eliminar cualquier necesidad de manipular la desgasificación de los componentes como podría ser necesario en una caja sellada.

El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia 90 puede estar provisto de un mecanismo para permitir el acoplamiento o desacoplamiento gradual de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 con la placa de acoplamiento magnético de motor/generador 210. Por ejemplo, el mecanismo de acoplamiento/desacoplamiento gradual, representado por el movimiento de acoplamiento/desacoplamiento 260, puede permitir el movimiento de la placa de acoplamiento magnético de motor/generador 210 hacia o alejándose de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. El mecanismo de acoplamiento/desacoplamiento puede alinear el eje de rotación de la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 con el eje de rotación de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 mientras que la distancia de separación entre las placas es demasiado grande para permitir el acoplamiento magnético (por ejemplo, durante una fase de almacenamiento o de espera). Puede aplicarse el movimiento de acoplamiento/desacoplamiento 260 para acortar gradualmente la distancia de separación. A medida que la distancia se reduce lentamente, la placa de acoplamiento

magnético del motor/generador 210 se acopla gradualmente a la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 mientras una de las placas gira a alta velocidad. Por ejemplo, la velocidad de rotación de un rotor del motor/generador 220 puede controlarse para que coincida con la velocidad de rotación de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 durante o antes del acoplamiento.

5 Como otro ejemplo, al comienzo de una fase de carga, la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 puede estar girando más rápido que la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. Por otro lado, al comienzo de una fase de descarga, la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 puede estar girando más rápido que la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210. El acoplamiento gradual hace que la velocidad de rotación de la placa que gira más lentamente aumente gradualmente hasta que las velocidades de rotación de las dos placas sean aproximadamente iguales.

15 Alternativamente o, además, el rotor del motor/generador 220 (y la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210) puede acelerarse angularmente (por ejemplo, mediante el funcionamiento del motor/generador 220) a una velocidad de rotación cercana a la de la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. El movimiento de acoplamiento/desacoplamiento 260 se puede operar entonces para reducir la distancia de separación entre la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 y la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130 hasta que las placas se acoplen entre sí.

20 La colocación de la unidad de motor/generador 200 fuera de la caja de vacío del volante de inercia 150 puede permitir el uso de diferentes unidades de motor/generador 200 con una sola unidad de volante de inercia 100. Por ejemplo, las diferentes unidades de motor/generador se pueden distinguir entre sí por diferentes relaciones de transmisión (por ejemplo, un engranaje de reducción de relación alta para el funcionamiento a alta velocidad del volante de inercia 110, y una relación de reducción baja o ningún engranaje para el funcionamiento del volante de inercia a menor velocidad 110).

25 La colocación de la unidad de motor/generador fuera de la caja de vacío del volante de inercia 150 puede permitir el uso de motores o generadores separados en lugar de un solo dispositivo con capacidades tanto de motor como de generador. Cada dispositivo de motor o generador por separado puede usarse durante la fase apropiada de operación de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia. Tales motores y generadores separados pueden ser menos costosos y más simples que un solo dispositivo con capacidades de ambos.

30 En un ejemplo, la unidad de volante de inercia 100 puede incluir cojinetes de empuje magnéticos. Los cojinetes de empuje magnéticos están configurados para contrarrestar cualquier fuerza axial que se aplique al árbol del volante de inercia 140 durante el funcionamiento del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia 90. Por ejemplo, los cojinetes de empuje magnéticos pueden operar en la placa magnética 170. La placa magnética 170 está unida a un extremo del árbol del volante de inercia 140 que está distal a la unidad de motor/generador 200. La placa magnética 170 puede estar magnetizada permanentemente (por ejemplo, está hecha de o incluye hierro dulce u otro material ferromagnético). La placa magnética 170 puede girar a la misma alta velocidad de rotación que el volante de inercia 110. Por lo tanto, los imanes permanentes de la placa magnética 170 pueden encapsularse para evitar la desintegración o rotura de la placa magnética 170 cuando gira a alta velocidad. La encapsulación puede estar hecha de un compuesto de fibra de carbono o de un metal no magnético.

35 Los cojinetes de empuje magnéticos pueden incluir imanes permanentes 181 que están ubicados en la placa trasera 165 de la caja de vacío del volante de inercia 150. Los imanes permanentes 181 pueden incluir imanes anulares que están dispuestos concéntricamente alrededor del árbol longitudinal del árbol del volante de inercia 140, o imanes de bloque o cilíndricos que están dispuestos en un patrón circular.

40 Los imanes permanentes 181 están configurados para repeler los imanes en la placa magnética 170. Así, cuando la placa magnética 170 se coloca en el extremo inferior de un árbol de volante de inercia 140 orientado verticalmente, los imanes permanentes 181 y la placa magnética 170 cooperan para soportar al menos parcialmente el peso del volante de inercia 110 (y así reducir la tensión sobre los cojinetes 120). De manera similar, en un sistema invertido (por ejemplo, donde la gravedad puede tender a aumentar la distancia entre la placa magnética 170 y los imanes permanentes 181), los imanes permanentes 181 pueden configurarse para atraer los imanes (o un material ferromagnético) en la placa magnética 170.

45 En un ejemplo, se puede proporcionar un dispositivo de ajuste 180 para permitir un ajuste fino de la posición de equilibrio del árbol del volante de inercia 140. Por ejemplo, tal ajuste fino puede permitir la compensación de cambios en el peso efectivo del volante de inercia 110 con respecto a los cojinetes 120. Por ejemplo, cuando la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 se acopla con la placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130, se puede ejercer una fuerza axial sobre el árbol del volante de inercia 140. El dispositivo de ajuste 180 puede incluir un imán (por ejemplo, un imán permanente o un electroimán). Por ejemplo, el imán del dispositivo de ajuste puede configurarse para repeler o atraer la placa magnética 170 (dependiendo de la configuración del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia 90). El movimiento de ajuste 190 puede aplicarse al dispositivo de ajuste 180 para ajustar la fuerza que se ejerce sobre la placa magnética 170 para contrarrestar una fuerza que es ejercida por la placa de acoplamiento magnético del motor/generador 210 sobre la

placa de acoplamiento magnético del volante de inercia 130. El movimiento de ajuste 190 y el movimiento de acoplamiento/desacoplamiento 260 pueden ser controlados por un solo controlador que está configurado para coordinar los movimientos entre sí (y así mantener una fuerza axial constante en el árbol del volante de inercia 140).

5 En un ejemplo, un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede incluir una pluralidad de unidades de volante de inercia, cada una encerrada en una caja de vacío independiente. La colocación de la unidad de motor/generador fuera de la caja de vacío del volante de inercia 150 puede permitir mover una sola unidad de motor/generador 200 de una unidad de volante de inercia a otra. Por tanto, una sola unidad de motor/generador 200 puede ser compartida por varias de las unidades de volante de inercia. Por tanto, se puede reducir el coste de un sistema de este tipo.

10 Por ejemplo, una unidad de volante de inercia con un rotor de volante de inercia de acero, por ejemplo, con una masa de aproximadamente 400 kg y girando a una velocidad de aproximadamente 15.000 revoluciones por minuto (rpm) puede almacenar aproximadamente un kilovatio-hora (kWh) de energía. Si se requiere una mayor capacidad de almacenamiento de energía, entonces se pueden proporcionar múltiples unidades de volante de inercia.

La figura 2 ilustra esquemáticamente el uso compartido de una única unidad de motor/generador mediante una pluralidad de unidades de volante de inercia de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia.

20 El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia múltiple 300 incluye una pluralidad de unidades de volante de inercia 101a-101c, mostradas dispuestas en una sola fila (se pueden incluir más de una fila de unidades de volante de inercia). Cada fila de unidades de volante de inercia 101a-101c está provista de un único sistema de motor/generador 310, controlado por el controlador del sistema 325. El controlador 325 está configurado para operar de acuerdo con instrucciones programadas.

25 Por ejemplo, el controlador 325 puede configurarse para esperar una orden de un controlador principal. Cuando se recibe la orden, el controlador 325 hace que el sistema de control de movimiento 315 conecte la unidad de motor/generador 200 a la unidad de volante de inercia 101a. Puede recibirse una indicación de que la unidad de motor/generador 200 está colocada correctamente y se ha acoplado con éxito a la unidad de volante de inercia 101a. El controlador 325 entonces opera la unidad de motor/generador 200 en un modo de motor para acelerar el volante de inercia de la unidad de volante de inercia 101a. El controlador 325 monitorea la velocidad de uno o ambos del motor/generador y el volante de inercia. Cuando la velocidad monitorizada está dentro de un umbral predeterminado de la velocidad objetivo, se interrumpe la alimentación a la unidad de motor/generador 200. El controlador 325 hace que el sistema de control de movimiento 315 desacople la unidad de motor/generador 200 de la unidad de volante de inercia 101a.

30 Una vez que el sistema de control de movimiento 315 indica una desconexión exitosa, y si se van a energizar más unidades de volante de inercia 101b o 101c, por ejemplo, unidad de volante de inercia 101c, el controlador 325 puede hacer que el sistema de control de movimiento 315 mueva la unidad de motor/generador 200 a la unidad de volante de inercia 101c (como indicado por la unidad de motor/generador 200'). El proceso anterior se repite luego hasta que todas las unidades de volante de inercia giran a una velocidad angular objetivo (y el sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia múltiple 300 almacena una cantidad de energía igual a su capacidad total), o se debe extraer energía del sistema.

45 Cuando la energía almacenada en el sistema de almacenamiento de energía de múltiples volantes de inercia 300 es aproximadamente igual a la capacidad del sistema, la unidad de motor/generador 200 puede desconectarse de todas las unidades de volante de inercia 101a-101c. La unidad de motor/generador 200 puede colocarse en una ubicación de reserva. Alternativamente o, además, la unidad de motor/generador 200 puede permanecer cerca de una de las unidades de volante de inercia 101a-101c, pero en un modo inactivo. Por tanto, si se va a proporcionar energía desde el volante de inercia, la unidad de motor/generador 200 puede colocarse en un modo de generador, proporcionando así la funcionalidad de suministro de energía ininterrumpida (UPS).

50 Cuando se va a extraer energía del conjunto del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia múltiple 300, el controlador 325 puede hacer que el sistema de control de movimiento 315 coloque una unidad de motor/generador 200 para acoplar una de las unidades de volante de inercia 101a-101c (por ejemplo, 101a). La unidad de motor/generador 200 se acopla con la unidad de volante de inercia (por ejemplo, 101a) y opera en un modo de generador.

60 Cuando se acopla la unidad de volante de inercia (por ejemplo, 101a), un rotor de la unidad de motor/generador 200 acelera a la velocidad del volante de inercia de la unidad de volante de inercia (por ejemplo, 101a). Luego se genera energía eléctrica. La potencia eléctrica varía en frecuencia y amplitud a medida que se desacelera la rotación del volante de inercia. Por tanto, el acondicionamiento de la señal puede proporcionarse antes de alimentar la energía generada a una red eléctrica. Por ejemplo, la unidad de motor/generador 200 puede estar asociada con el convertidor de potencia 320. El convertidor de potencia 320 se puede incorporar, montar o ubicar cerca de la unidad de motor/generador 200.

La señal de salida del convertidor de potencia 320 puede estar a un nivel que permita que la señal se conecte a un bus de potencia común. El bus de energía común puede agregar energía eléctrica que es generada por una pluralidad de unidades de motor/generador de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia múltiple 300.

5 En un ejemplo, se pueden proporcionar unidades de motor y generador separadas. La unidad de motor o generador se puede mover por separado a través de una serie de unidades de volante de inercia mediante un sistema de control de movimiento.

10 En otro ejemplo, una unidad de motor/generador puede estar provista de una transmisión variable (por ejemplo, una caja de cambios). La transmisión variable puede controlarse para reducir o aumentar una diferencia en la velocidad de rotación entre la unidad de motor/generador y el volante de inercia de una unidad de volante de inercia. Esto puede permitir el uso de dispositivos disponibles comercialmente de alta eficiencia o bajo coste que no son capaces de operar a la alta velocidad a la que gira el volante de inercia.

15 En otro ejemplo, las unidades de volante de inercia están dispuestas en dos o más matrices. Esto puede permitir el suministro continuo de energía durante el funcionamiento de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia múltiple. Por ejemplo, la unidad de motor/generador de una matriz puede estar acoplada y funcionando mientras que la unidad de motor/generador de la otra matriz está desconectada. Alternativamente o, además, el sistema se puede construir de manera que al menos dos unidades de motor/generador se puedan mover a través de una única matriz de unidades de volantes de inercia. Los módulos de volante de inercia pueden disponerse en una disposición lineal, circular, curva u otra disposición, o en forma de una matriz bidimensional o tridimensional.

20 En un ejemplo, se puede utilizar una transmisión (por ejemplo, la transmisión 240 como se muestra en la figura 1) para permitir que el volante de inercia gire a una velocidad angular más alta y ejerza un par bajo para acoplar una unidad de motor/generador cuyo rotor esté girando a una velocidad angular menor y con un gran par. Por ejemplo, un rotor de una unidad de motor/generador puede girar a 6.000 rpm mientras activa un volante de inercia que gira a 60.000 rpm o más. Tales transmisiones son conocidas en la técnica y están disponibles comercialmente. La transmisión puede incluir componentes mecánicos (por ejemplo, engranajes) o puede basarse en interacciones magnéticas.

25 En un ejemplo, varias unidades de motor/generador de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia pueden estar provistas de diferentes transmisiones 240. Cada transmisión 240 puede proporcionar una relación de transmisión diferente. Por ejemplo, se podría usar una unidad de motor/generador que tenga una transmisión 240 que proporcione una relación de transmisión de 1:3 cuando la velocidad angular del volante de inercia sea inferior a aproximadamente 15.000 rpm. Otra unidad de motor/generador puede incluir una transmisión 240 que proporciona una relación de transmisión de 1:6 que se puede utilizar para rotaciones del volante de inercia de hasta 60.000 rpm o más. Pueden usarse otras relaciones de transmisión.

30 En un ejemplo, un acoplamiento magnético entre una unidad de volante de inercia y una unidad de motor/generador puede proporcionar la función de un engranaje de reducción o transmisión.

35 La figura 3 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia con transmisión de reducción magnética.

40 El piñón magnético 410 está montado en el árbol del volante de inercia 430 de la unidad de volante de inercia 102. Por tanto, el piñón magnético 410 gira junto con el volante de inercia 110. La tapa 162 de la caja 152 de vacío se coloca cerca (por ejemplo, dentro de unas pocas décimas de milímetro) del piñón magnético 410 y está hecha de un material magnéticamente susceptible. Por tanto, el piñón magnético 410 puede acoplarse magnéticamente lateralmente al engranaje magnético 420 de la unidad de motor/generador 202. El engranaje magnético 420 puede estar conectado, a través del árbol 215, a un rotor de la unidad de motor/generador 202. El movimiento de acoplamiento/desacoplamiento 260 se puede operar para hacer que el engranaje magnético 420 acople magnéticamente el piñón magnético 410.

45 El engranaje magnético 420 puede tener típicamente un radio mayor que el piñón magnético 410. Por tanto, cuando se acoplan magnéticamente entre sí, el volante de inercia 110 puede girar más rápido que el rotor de la unidad de motor/generador 202. Por tanto, el acoplamiento magnético entre el engranaje magnético 420 y el piñón magnético 410 puede proporcionar la función de un engranaje reductor.

50 Son posibles otras configuraciones que proporcionan tanto acoplamiento magnético como transmisión de reducción. Por ejemplo, el engranaje magnético de la unidad de motor/generador puede tener una configuración anular dentro de la cual el piñón magnético 410 puede girar.

55 La velocidad angular máxima a la que un volante de inercia puede girar con seguridad puede depender del material con el que está construido el volante de inercia (por ejemplo, la resistencia a la tracción del material) y su estructura. Por ejemplo, un volante de inercia que está construido de acero puede limitarse a una velocidad angular máxima de

aproximadamente 20.000 rpm. Se puede construir un rotor de volante de inercia usando materiales compuestos (por ejemplo, que tenga una densidad más baja que el acero, pero una resistencia a la tracción mucho más alta). Un volante de inercia construido con un material compuesto puede tener una velocidad angular máxima de aproximadamente 50.000 rpm o más.

5 Se han utilizado fibras de carbono que tienen una alta resistencia a la tracción para formar un conjunto de rotor de volante de inercia. Se sabe que tales volantes de inercia fallan debido a un mecanismo de desintegración del laminado debido a la baja resistencia a la rotura y a la tracción de una matriz de adhesivo epoxi utilizada para unir capas de fibras de carbono.

10 En un ejemplo, se puede construir un rotor de volante de inercia usando fibras de carbono en las que se añaden nanotubos de carbono a una resina epoxi adhesiva. Los nanotubos pueden aumentar la resistencia interlaminada del material compuesto y, por lo tanto, pueden permitir que el rotor funcione a altas velocidades de rotación sin desintegración.

15 En un ejemplo, un rotor de volante de inercia puede construirse con una carcasa exterior de baja densidad con alta resistencia a la tracción que envuelve un núcleo interior de alta densidad que tiene menor resistencia a la tracción. Un volante de inercia de este tipo puede girarse rápidamente sin provocar la desintegración del material de alta densidad.

20 La figura 4 ilustra esquemáticamente un volante de inercia con una construcción de carcasa.

El volante de inercia 112 incluye una carcasa exterior 510 que envuelve una carcasa interior 520. La carcasa exterior 510 y la carcasa interior 520 rodean el núcleo interior 530.

25 La carcasa exterior 510 está construida para tener una alta resistencia a la tracción. Por ejemplo, la carcasa exterior 510 puede incluir un material compuesto de fibra de carbono que tiene una alta resistencia a la tracción mediante la inclusión de nanotubos de carbono en la resina epoxi utilizada para unir el material. Por tanto, la carcasa exterior 510 puede resistir la tensión de tracción muy alta provocada por la rotación a alta velocidad del volante de inercia 112.

La carcasa interior 520 puede incluir un material de alta densidad. El material de alta densidad en la carcasa interior 520 puede incluirse para aumentar el momento de inercia del volante de inercia 512.

35 Por ejemplo, el material de alta densidad en la carcasa interior 520 puede incluir plomo. El plomo se puede fundir usando fundición centrífuga en la carcasa exterior 510 que sirve como molde de fundición. (A diferencia de la fundición centrífuga tradicional, el molde de fundición no se retira después de la fundición). De esta manera, el plomo, que presenta una resistencia a la tracción relativamente baja, pero tiene una densidad alta, puede utilizarse para aumentar la masa (y por tanto el momento de inercia) de la carcasa interior 520 y del volante de inercia 112. El material compuesto en la carcasa exterior circundante 510 evita que el cable en la carcasa interior 520 se desintegre durante la rotación a alta velocidad del volante de inercia 112. Pueden usarse otras combinaciones de materiales.

40 Debido al alto coste de la fibra de carbono, se puede diseñar un volante de inercia para limitar la cantidad de material de alta resistencia a la tracción que se incorpora al volante de inercia mientras proporciona un momento de inercia suficientemente grande. El diseño también puede reducir el riesgo de fallo catastrófico del volante de inercia durante la rotación a alta velocidad. En un ejemplo, el volante de inercia puede incluir varillas radialmente salientes.

La figura 5A ilustra esquemáticamente un volante de inercia de tipo cepillo que incluye varillas radialmente salientes.

50 El volante de inercia de tipo cepillo 550 incluye un núcleo de volante de inercia 551 desde cuya periferia se extienden radialmente varillas salientes 554. (La extensión desde la periferia se usa aquí para excluir una configuración en la que ambos extremos de una sola varilla que se inserta en un núcleo se extienden hacia afuera en diferentes lados del núcleo). Por ejemplo, el núcleo del volante de inercia 551 puede estar hecho de acero u otro material denso.

55 Las varillas salientes 554 pueden incluir fibra de vidrio. La fibra de vidrio, aunque exhibe una alta resistencia a la tracción (el vidrio S tiene una resistencia específica que es mayor que la de la fibra de carbono), es deformable (presenta una gran deformación cuando se somete a una fuerza de estiramiento, caracterizándose por un módulo específico bajo en relación con la fibra de carbono y muchos otros materiales). Por lo tanto, las dimensiones de una caja que encierra un volante de inercia de tipo cepillo 550 pueden ser suficientemente grandes para acomodar el estiramiento de las varillas salientes 554.

60 Por ejemplo, la varilla puede someterse a un proceso de pultrusión en el que los haces de fibra de vidrio se sumergen en un material de matriz y se tiran a través de una matriz calentada. Las fibras de vidrio pueden incluir una gran cantidad de microfibras, por ejemplo, cada una con un diámetro en un rango de 7 μm a 20 μm . Este proceso de pultrusión crea una varilla de alta densidad y alta resistencia que tiene una estructura axial (toda fibra

65

haces alineados esencialmente paralelos al árbol de la barra). El material de la matriz es de naturaleza termoendurecible. Por tanto, el material de la matriz se cura durante su paso a través de la matriz calentada. La rigidez de las varillas resultantes aumenta sustancialmente mediante el proceso de pultrusión. Por lo tanto, el procesamiento de pultrusión puede permitir el uso de materiales de coste relativamente bajo, como vidrio S o vidrio E, que no podrían usarse de otra manera.

La resistencia al cizallamiento de la capa intermedia de la construcción de la varilla puede aumentarse mediante la adición de nanotubos de carbono en el material de la matriz. El tipo y la cantidad óptimos de nanotubos que se agregarán pueden determinarse mediante pruebas. Por ejemplo, los nanotubos de carbono pueden constituir el 0,03 % en peso del material de la matriz. En algunos casos, se ha descubierto que la resistencia medida de la varilla aumenta entre un 20 % y un 30 % como resultado de la adición de nanotubos de carbono.

Por ejemplo, las varillas salientes 554 hechas de fibra de vidrio pueden tener cada una un diámetro tan grande como aproximadamente 100 mm, o un valor típico de aproximadamente 12 mm, u otro diámetro.

Las varillas salientes 554 se pueden unir a la periferia del núcleo del volante de inercia en un patrón o disposición escalonada. Una disposición escalonada puede aumentar la uniformidad de la distribución de la tensión y reducir la tensión máxima en el núcleo del volante de inercia 551.

La figura 5B ilustra esquemáticamente una disposición escalonada de varillas del volante de inercia de tipo cepillo mostrado en la figura 5A. En la disposición escalonada mostrada, las varillas salientes 554 (vistas de frente) que se extienden desde la periferia del núcleo del volante de inercia 551 están dispuestas en las filas 553a-553c. Las filas 553a-553c están escalonadas entre sí de modo que, por ejemplo, la fila 553b se muestra desplazada lateralmente con respecto a las filas 553a y 553c. Son posibles otras disposiciones escalonadas de varillas salientes 554 en el núcleo del volante de inercia 551.

El volante de inercia de tipo cepillo 550 se hace funcionar en una caja de vacío evacuado (por ejemplo, la caja de vacío de volante de inercia 150 como se muestra en la figura 1). El funcionamiento en una caja evacuado elimina o reduce la resistencia aerodinámica en las varillas salientes 554. Durante la rotación del volante de inercia de tipo cepillo 550 alrededor de su árbol, las varillas salientes 554 se someten a una carga uniaxial debido a la fuerza centrífuga y su longitud aumenta. Por ejemplo, cada varilla saliente 554 puede extenderse en un 1-2 % de su longitud (de modo que cada varilla saliente 554 tenga aproximadamente medio metro de largo, el diámetro del volante de inercia de tipo cepillo 550 puede aumentar en uno o dos centímetros) cuando se gira en a toda velocidad. Por lo tanto, la caja de vacío está diseñada con un diámetro suficiente para evitar que las puntas distales de las varillas salientes 554 entren en contacto físico con la caja.

Las varillas salientes 554 están conectadas a la periferia del núcleo 551 mediante soportes de varilla 552. Por ejemplo, un extremo proximal del soporte de varilla 552 puede estar unido (por ejemplo, atornillado o pegado, o asegurado de otra manera) al núcleo 551, por ejemplo, en un orificio roscado en el núcleo 551 (el orificio roscado y el soporte de varilla 552 están típicamente diseñados para soportar fuerzas centrífugas en una varilla saliente 554 sostenida por un soporte de varilla 552). Un extremo proximal de cada soporte de varilla 552 puede atornillarse en un orificio roscado en el núcleo 551, o asegurarse de otro modo al núcleo 551, después de que una varilla saliente 554 se inserte en un extremo distal del soporte de varilla 552 y se sujete por él. Alternativamente o, además, se puede incorporar una estructura de sujeción de varillas en el núcleo 551.

La figura 6 ilustra esquemáticamente el funcionamiento de un soporte de varilla del volante de inercia de tipo cepillo mostrado en la figura 5A.

En un ejemplo, una varilla saliente 554 se puede unir a un soporte de varilla 552 mediante ajuste a presión. En este caso, un extremo proximal (o todo) de la varilla saliente 554: se enfría (por ejemplo, mediante nitrógeno líquido u otro refrigerante) para reducir su diámetro. El extremo enfriado se inserta en una cavidad mecanizada con precisión del soporte de varilla 552. Cuando el extremo de la varilla saliente 554 se calienta, el extremo proximal de la varilla saliente 554 se expande y llena la cavidad. A continuación, la varilla saliente 554 se mantiene en la base por fricción con las paredes de la cavidad.

Alternativamente o, además, una cavidad 558 del soporte de varilla 552 incluye espacios en forma de cuña, como se muestra en la figura 6. Los espacios pueden rellenarse con pegamento, tal como un pegamento de alto esfuerzo cortante, o un material de matriz cuando un extremo proximal de la varilla saliente 554 se inserta en la cavidad 558. Cuando el material se endurece, el material y la cavidad 558 sirven como un mecanismo de cuña de autobloqueo que evita que la varilla saliente 554 sea sacada de la cavidad 558 por fuerzas centrífugas.

Alternativamente o, además, una varilla saliente 554 puede sujetarse a una cavidad en un soporte de varilla 552 o en el núcleo 551 mediante una férula plegable.

La figura 7 ilustra esquemáticamente el funcionamiento de una férula plegable para sujetar una varilla saliente.

La férula plegable 560 incluye una pieza de metal mecanizada (o formada de otro modo) con una forma externa cónica. La forma interna de la férula plegable 560 tiene la forma de un perfil que está diseñado para crear un perfil de carga deseado en la varilla saliente 554. Inicialmente, cuando la varilla saliente 554 se inserta en la férula 560, el diámetro interno de la férula 560 es mayor que el diámetro de la varilla saliente 554. La férula 560, con la varilla saliente 554 insertada, se empuja en el orificio cónico 562. El ángulo del cono del agujero cónico 562 coincide con el ángulo del cono de la superficie externa de la férula 560. Cuando la férula 560 con la varilla saliente insertada 554 se empuja dentro del orificio cónico 562, la férula 560 se presiona y colapsa sobre el extremo proximal 554a de la varilla saliente 554. Continuar empujando en el orificio cónico 562 continúa presionando la férula 560 sobre la varilla saliente 554 hasta que se alcanza la presión deseada, formando un cuello estrecho 554b en la varilla saliente 554. Por ejemplo, si el diámetro exterior de una varilla saliente de fibra de vidrio 554 es de aproximadamente 12 mm, entonces el diámetro del cuello constreñido 554b puede reducirse en aproximadamente 0,1 mm.

El uso de la férula 560 puede aplicar una presión circular uniforme sobre la superficie exterior de la varilla saliente 554, evitando así el fallo mecánico de las fibras exteriores de la varilla saliente 554 que podría dar como resultado una resistencia a la tracción reducida. El perfil interior de la férula, que relaciona el diámetro interior de la férula 560 con su distancia de inserción, y la presión deseada pueden calcularse teniendo en cuenta los efectos de la contracción del efecto de Poisson sobre el diámetro de la varilla resultante del ejercicio de la alta fuerza de tracción. El perfil de presión deseado en la varilla saliente 554 se puede calcular para minimizar la tensión combinada (von Mises) en la varilla saliente 554. Por ejemplo, en el cuello constreñido 554b de la varilla saliente 554, las fuerzas de tracción pueden ser muy altas. Por lo tanto, en el cuello constreñido 554b, las fuerzas de presión deben ser suficientemente bajas para evitar una alta tensión de von Mises. El perfil de presión debe aumentar gradualmente de acuerdo con la disminución de la fuerza de tracción debido a las fuerzas de fricción en la superficie exterior de la varilla saliente 554.

Una construcción de volante de inercia de tipo cepillo puede ser ventajosa. Por ejemplo, es poco probable que una construcción de este tipo falle catastróficamente. Si una de las varillas salientes 554 fallara o se desintegrara, las fuerzas centrífugas arrojarían los escombros resultantes para ser arrojados hacia las paredes de una caja de vacío que encierra el rotor. Dado que el volante de inercia de tipo cepillo 550 incluye típicamente cientos de varillas salientes 554, la energía cinética de una sola varilla averiada es relativamente baja. Por lo tanto, se puede reducir o eliminar el requisito de una carcasa reforzada o de algunas otras características de seguridad. Además, los factores de seguridad que se utilizan para determinar los parámetros de funcionamiento pueden relajarse un poco en relación con otros tipos de volantes de inercia. Un sistema de volante de inercia que incorpore un volante de inercia de tipo cepillo 550 puede estar equipado con detectores de desequilibrio que podrían detectar cualquier desequilibrio causado por una varilla saliente 554 desprendida. Tras la detección de tal fallo, se puede aplicar un frenado al volante de inercia de tipo cepillo 550, o el volante de inercia de tipo cepillo 550 se puede detener gradualmente de otro modo. Además, dado que el volante de inercia de tipo cepillo 550 está construido principalmente de vidrio y metal, los componentes pueden ser reciclables y no se requiere el uso de ningún material peligroso.

En un ejemplo, se puede añadir un peso a un extremo distal de cada varilla saliente de un volante de inercia de tipo cepillo. La adición de tales pesos aumenta el momento de inercia del volante de inercia.

La figura 8 ilustra esquemáticamente una variante del volante de inercia de tipo cepillo que se muestra en la figura 5A, en el que se pesan las varillas radialmente salientes.

El volante de inercia de tipo cepillo 570 ponderado incluye varillas salientes 554 con contrapesos 572 añadidos a los extremos distales de las varillas. Cada contrapeso 572 puede conectarse a una varilla saliente 554 usando una o más de las técnicas de unión descritas anteriormente para unir varillas salientes 554 al núcleo 551 o a los soportes de varilla 552, o usando otra técnica de unión. Los contrapesos 572 pueden construirse con un material denso, por ejemplo, acero u otro material.

La unión de los contrapesos 572 de los extremos a los extremos distales de las varillas salientes 554 puede ser ventajosa. Por ejemplo, el aumento del momento de inercia puede aumentar la cantidad de energía que puede almacenarse para una velocidad angular dada sin aumentar la longitud de cada varilla saliente 554. Alternativamente, la unión de los contrapesos 572 puede permitir acortar cada varilla saliente 554, disminuyendo así las dimensiones laterales del volante de inercia de tipo cepillo 570 ponderado con respecto a un volante de inercia de tipo cepillo sin contrapesos. Alternativamente, el volante de inercia de tipo cepillo 570 ponderado se puede hacer girar a una velocidad más lenta que un volante de inercia de tipo cepillo sin contrapesos para almacenar una cantidad similar de energía.

En un ejemplo, un volante de inercia de tipo cepillo puede incluir fibras de vidrio salientes que actúan como varillas salientes. El volante de inercia puede construirse a partir de conjuntos apilados, a cada uno de los cuales se hace referencia en el presente documento como casete.

La figura 9 ilustra esquemáticamente la estructura de un casete de un volante de inercia similar a un cepillo de fibra de vidrio.

Se puede apilar una pluralidad de casetes de volante de inercia 580 para formar un único volante de inercia de tipo cepillo con varillas salientes en forma de fibras salientes. Por ejemplo, las fibras pueden incluir vidrio. Cuando se apilan, los casetes de volante de inercia 580 están todos centrados y montados en un árbol central común 588.

5 El casete de volante de inercia 580 incluye dos placas 582 (solo se muestra una placa) que intercalan las columnas 584. Por ejemplo, las placas 582 pueden construirse con un material denso, como acero u otro material.

10 Las columnas 584 se extienden desde una placa 582 a la otra. Las columnas 584 están dispuestas en un patrón circular que es concéntrico con la placa 582 y con el árbol del volante de inercia. Las columnas 584 se pueden unir a las placas 582 usando tornillos, o usando otro mecanismo o técnica de unión adecuada.

15 Las fibras de vidrio que forman los haces de fibras 586 están cada una de ellas envuelta parcial (o totalmente) alrededor de cada columna 584. Por ejemplo, los haces de fibras 586 pueden incluir cada uno una pluralidad de fibras de fibra de vidrio extremadamente delgadas, por ejemplo, con un diámetro típico de 7 micrómetros a 20 micrómetros. Las fibras se extienden simétricamente y en igual cantidad (por ejemplo, en una distancia típica de aproximadamente 15 cm) desde cualquier lado de la columna 584.

20 Las fibras de un haz de fibras 586 se pueden pegar juntas en la región de contacto 586a donde el haz de fibras 586 se dobla alrededor de una columna 584.

25 Cuando el volante de inercia gira, las fuerzas centrífugas hacen que las fibras de cada haz de fibras 586 se extiendan radialmente hacia fuera desde el árbol del volante de inercia. Las fuerzas centrífugas actúan aproximadamente por igual en ambos extremos que se extienden del haz de fibras 586. Por tanto, el efecto de las fuerzas centrífugas tiende esencialmente a mantener en su sitio los haces de fibras 586. Un haz de fibras 586 así envuelto alrededor de una columna 584 puede ser ventajoso de una disposición en la que se dependa del pegamento u otro método de sujeción para resistir o vencer las fuerzas centrífugas. El uso de técnicas mediante las cuales las proyecciones, como fibras o varillas, atraviesan el núcleo, aunque equilibran las fuerzas centrífugas, están limitadas en cuanto a la densidad alcanzable de las proyecciones.

30 Dado que la resistencia a la tracción de las fibras de vidrio muy delgadas es típicamente muy alta (por ejemplo, mucho más alta que la resistencia a la tracción de las varillas de vidrio ordinarias), un volante de inercia que incluye una pluralidad de casetes 580 puede girarse a velocidades muy altas sin alcanzar el límite máximo de tracción de las fibras.

35 El uso de haces de fibras salientes 586 puede resultar ventajoso. Por ejemplo, se reduce la probabilidad de un fallo catastrófico del volante de inercia. Dado que el volante de inercia puede incluir millones de fibras individuales, la energía cinética de cada fibra es relativamente muy baja.

40 La figura 10 ilustra una técnica para formar un haz de fibras para el casete mostrado en la figura 9. Se puede aplicar una máquina bobinadora de filamentos estándar (no mostrada) a las fibras 590 enrolladas alrededor de dos columnas 584. Las columnas 584 pueden mantenerse en su lugar mediante un accesorio o soporte adecuado (no mostrado). Por ejemplo, la distancia entre las columnas 584 puede ser típicamente igual a aproximadamente 30 cm. Las fibras 590 pueden estar hechas de fibra de vidrio, hilo musical de acero o cualquier otra fibra de alta resistencia a la tracción. Después de que las fibras 590 se enrollen alrededor de las dos columnas 584, las fibras 590 se pegan para formar haces en la región donde las fibras 590 se envuelven alrededor de las columnas 584. Después de que cura el pegamento, se cortan las fibras 590, típicamente a lo largo de la línea media 592 entre las columnas 584. Por tanto, se forman dos haces en forma de U (alrededor de cada una de las columnas 584).

50 Alternativamente o, además, las fibras 590 pueden empaparse en un material de matriz antes de enrollarlas. Después de enrollar, las fibras 590 se pueden cortar y formar en haces (por ejemplo, cada haz tiene un diámetro típico de aproximadamente 12 cm). A continuación, los haces se pueden curar (por ejemplo, térmicamente o a temperatura ambiente, dependiendo del material de la matriz).

55 De acuerdo con realizaciones de la presente invención, un rotor de la unidad de motor/generador está acoplado mecánicamente a un árbol de la unidad de volante de inercia dentro de una caja de vacío. El estator de la unidad de motor/generador se encuentra fuera de la caja de vacío. Tal disposición se denomina en el presente documento una unidad de motor/generador de bastidor abierto.

60 La figura 11 ilustra esquemáticamente una unidad de motor/generador de bastidor abierto, de acuerdo con una realización de la presente invención.

65 El sistema de almacenamiento de energía con volante de inercia de bastidor abierto 600 incluye el volante de inercia 601 encerrado dentro de la caja de vacío 150. El volante de inercia 601 puede incluir un volante de inercia de tipo cepillo como se muestra, u otra configuración de un volante de inercia.

El rotor 604 de la unidad de motor/generador de bastidor abierto 602 está unido mecánicamente, en voladizo (sin

cojinete u otro soporte del rotor 604 que no sea el árbol 142), al árbol 142 del volante de inercia 601. El rotor 604 está alojado dentro de la tapa 162 de la caja de vacío 150. (La tapa 162 puede tener la forma de una cúpula curva). El estator 606 de la unidad de motor/generador de bastidor abierto 602 está ubicado fuera de la tapa 160. La tapa 162 está hecha de un material magnéticamente susceptible (por ejemplo, un material compuesto de vidrio como Kevlar® o fibra de vidrio u otro material) para permitir el acoplamiento magnético entre el rotor 604 y el estator 606. Por ejemplo, el rotor 604 y el estator 606 pueden estar separados por una distancia típica de 3 mm u otra distancia.

El estator 606 puede conectarse a un inversor de un bus de corriente continua (CC) de alta tensión (HV) u otro circuito adecuado.

El uso de la unidad de motor/generador de bastidor abierto 602 en un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede ser ventajoso. Por ejemplo, encerrar el rotor 604 dentro de la caja de vacío 150 puede minimizar el arrastre atmosférico sobre el rotor 604. Los cojinetes 120 que soportan el volante de inercia 601 también soportan el rotor 604, evitando así el coste de cojinetes adicionales. El estator 606 puede retirarse del resto del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de bastidor abierto 600 cuando no se está realizando ninguna carga o descarga. Tal eliminación puede reducir las pérdidas por corrientes parásitas provocadas por el rotor 604 que gira dentro del estator 606. El estator 606, que se encuentra fuera de la caja de vacío 150, puede enfriarse por convección natural o por convección forzada (por ejemplo, mediante un soplador, ventilador o bomba). No se requieren conexiones eléctricas entre los componentes dentro de la caja de vacío 150 y los circuitos fuera de la caja de vacío 150. Una sola unidad de estator puede compartirse con una pluralidad de unidades de volante de inercia mediante un sistema de movimiento automático.

De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, una pluralidad de unidades de volante de inercia individuales puede acoplarse entre sí para formar un grupo de volantes de inercia. Cada grupo de volantes de inercia se puede acoplar a una sola unidad de motor/generador. Cada unidad de volante de inercia individual puede diseñarse para una velocidad de rotación máxima particular. El acoplamiento de las unidades de volante de inercia puede permitir aumentar la cantidad de energía almacenada, sin necesidad de modificar el diseño (por ejemplo, volante de inercia o cojinetes) de las unidades de volante de inercia. Además, la energía se puede almacenar o extraer sin el coste de unidades de motor/generador adicionales.

La figura 12 ilustra esquemáticamente un grupo de volantes de inercia, de acuerdo con una realización de la presente invención.

El grupo de volante de inercia 1000 incluye una pila de unidades de volante de inercia 90. Cada unidad de volante de inercia 90 incluye un volante de inercia 1002 (que puede ser un volante de inercia de tipo cepillo, como se muestra, u otro tipo de volante de inercia) que está soportado y asegurado individualmente por un juego de cojinetes 120 dentro de su caja de vacío 150. Cada unidad de volante de inercia 90 está acoplada permanentemente a una unidad de volante de inercia adyacente 90 del grupo de volantes de inercia 1000 mediante un acoplamiento magnético 1004. Por tanto, todas las unidades de volante de inercia 90 del grupo de volantes de inercia 1000 giran en tándem a una única velocidad de rotación.

Una unidad de volante de inercia 90a en un extremo del grupo de volantes de inercia 1000 está acoplada a la unidad de motor/generador 204. Por ejemplo, la unidad de motor/generador 204 puede incluir una unidad de motor/generador de bastidor abierto como se muestra. Como otro ejemplo, el volante de inercia 1002 de la unidad de volante de inercia 90a puede acoplarse magnéticamente a la unidad de motor/generador 204. Como otro ejemplo, la unidad de motor/generador 200 puede acoplarse mecánicamente a la unidad de volante de inercia 90a y encerrarse dentro de la caja de vacío 150 de la unidad de volante de inercia 90a.

En un ejemplo, una unidad de volante de inercia puede incluir un cojinete magnético activo. Por ejemplo, el uso de cojinetes magnéticos activos puede permitir un soporte duradero y confiable del volante de inercia en el entorno de vacío, donde se excluye el uso de cojinetes de aire. El uso de cojinetes magnéticos activos normalmente incluye el uso de otro conjunto de cojinetes convencionales ("cojinetes de aterrizaje") durante el transporte y la activación inicial de la unidad de volante de inercia. Los cojinetes magnéticos activos deben estar alimentados en todo momento. Cualquier interrupción de la energía suministrada requeriría el uso de los cojinetes de aterrizaje.

Un sistema de cojinete magnético activo típico incluye un sensor de posición del árbol (por ejemplo, basado en sensores capacitivos o de corrientes parásitas) para monitorear la posición del árbol giratorio que se está estabilizando. Un rotor gira con el árbol (puede estar montado en el árbol o puede ser idéntico al árbol). Los actuadores inductivos se utilizan para atraer el rotor o el árbol que se estabiliza. Los circuitos de control y accionamiento controlan el funcionamiento de los inductores de acuerdo con la posición detectada del árbol.

En un ejemplo, un volante de inercia u otra carga giratoria puede estar soportada por cojinetes mecánicos. Puede proporcionarse un sistema de estabilización para equilibrar la carga giratoria. Por ejemplo, el sistema de estabilización puede incluir un sistema de equilibrio magnético activo.

La figura 13A ilustra esquemáticamente un sistema de equilibrio magnético activo para un volante de inercia de un

sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia. La figura 13B muestra una vista superior del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A.

5 El sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 está configurado para estabilizar el árbol 940 del volante de inercia 920. Aunque el sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 se describe aquí aplicado a un sistema de volante de inercia para almacenamiento de energía, el sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 puede aplicarse para estabilizar cualquier carga giratoria cuyo árbol esté soportado por cojinetes mecánicos.

10 El árbol 940 se mantiene continuamente en su lugar mediante el conjunto de rodamiento de bolas 910. Por ejemplo, el conjunto de cojinete de bolas 910 puede incluir un cojinete de bolas de metal, un cojinete de bolas de cerámica, un conjunto de cojinete de bolas híbrido u otro cojinete mecánico. El volante de inercia 920 se puede equilibrar en un alto grado (por ejemplo, como lo requiere ISO 1940 clase G1). Sin embargo, las fuerzas radiales en el conjunto de rodamiento de bolas 910 pueden limitar la vida útil del rodamiento y pueden crear vibraciones severas durante el funcionamiento. Las fuerzas radiales pueden contribuir a la fricción interna y pueden causar el sobrecalentamiento del conjunto de cojinete de bolas 910, reduciendo la eficiencia operativa de una unidad de volante de inercia que incluye el volante de inercia 920.

20 El sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 incluye uno o más sensores 950. Los sensores 950 pueden incluir sensores de vibración o fuerza. Los sensores 950 están montados en el lado estacionario del conjunto de rodamiento de bolas 910, o muy cerca de él. Cada sensor 950 puede dar una lectura rápida y precisa de las fuerzas de desequilibrio que operan sobre el conjunto de cojinete de bolas 910 en una dirección particular. Los sensores 950 pueden ubicarse suficientemente lejos de los actuadores inductivos 960 para evitar que los actuadores inductivos 960 influyan en las lecturas de los sensores 950.

25 Un conjunto de estabilización magnética que incluye una pluralidad de (por ejemplo, tres) electroimanes se puede controlar para crear un campo magnético resultante que reduce las fuerzas de desequilibrio que actúan sobre el árbol 940. Cada electroimán está incluido en un actuador inductivo 960. Los actuadores inductivos 960 están montados en una estructura estacionaria (no giratoria). Los accionadores inductivos 960 se pueden operar para atraer el anillo de rotor 970. El anillo de rotor 970 está montado en el árbol 940, o puede incorporarse o ser idéntico al árbol 940. Por ejemplo, el anillo de rotor 940 puede estar hecho de capas apiladas de acero eléctrico (por ejemplo, como se usa en núcleos de transformadores). El uso de acero de silicón delgado (por ejemplo, de 0,2 mm de espesor) puede contribuir a reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

35 La unidad de control 980 puede incluir un procesador u otro circuito de control. Por ejemplo, la unidad de control 980 puede incluir un circuito integrado específico de la aplicación (ASIC). La unidad de control 980 puede configurarse para recibir una señal indicativa de vibración o fuerza de los sensores 950. Se puede aplicar un algoritmo a las señales para calcular cómo deben accionarse los actuadores inductivos 960 con el fin de minimizar o reducir las fuerzas detectadas que actúan sobre el conjunto de cojinete de bolas 910.

40 El uso del sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 puede ser ventajoso. Por ejemplo, la tensión y las pérdidas causadas por el conjunto de cojinetes de bolas 910 pueden reducirse significativamente, aumentando así la fiabilidad, la vida útil y el tiempo entre el mantenimiento del conjunto de cojinetes de bolas 910. El funcionamiento del volante de inercia 920 no depende únicamente del funcionamiento de los cojinetes magnéticos, ya que un fallo temporal de los cojinetes magnéticos permitiría un funcionamiento continuo mientras que solo aumentaría temporalmente la carga sobre el conjunto de cojinetes de bolas 910. La estabilidad geométrica del árbol (que puede ser una preocupación importante con los cojinetes magnéticos convencionales) está garantizada por el conjunto de cojinetes de bolas 910. Los cambios en el equilibrio del volante de inercia, ya sea de forma dinámica (a medida que cambia la velocidad de rotación) o con el tiempo (debido a la fluencia), se pueden compensar de forma continua. La unidad de control 980 puede configurarse para proporcionar información sobre cualquier desequilibrio detectado o creación de vibraciones. La información proporcionada se puede utilizar para evitar eventos de fallos catastróficos.

55 El control del sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 puede diferir del control de un sistema de cojinete magnético. En un sistema típico de cojinetes magnéticos, la posición del árbol se mide y se corrige. Sin embargo, en el sistema de equilibrado magnético activo de volante de inercia 900, el árbol 940 está fijado en el espacio por el conjunto de cojinete de bolas 910 y el campo magnético generado por los accionadores inductivos 960 ejerce una fuerza sobre el anillo de rotor 970 (y sobre el árbol 940). El conjunto de cojinete de bolas 910 proporciona suficiente rigidez para que las fuerzas ejercidas no provoquen un movimiento o deflexión significativos del árbol 940. Por tanto, los sensores 950, que incluyen sensores de vibración o aceleración, se utilizan en el sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900. El sensor 950 mide la vibración causada por el desequilibrio del árbol 940. Esta vibración puede describirse mediante una forma funcional sinusoidal, donde la fase de la función sinusoidal está determinada por la posición del sensor 950 con respecto a un vector que describe el desequilibrio rotacional. Cuando el sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 no funciona, las fuerzas de desequilibrio son contrarrestadas por el conjunto de cojinetes de bolas 910. Cuando el sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 es funcional, el campo magnético ejerce fuerzas

para contrarrestar el desequilibrio (y las fuerzas radiales sobre el conjunto de cojinete de bolas 910 se minimizan). Puede observarse que las vibraciones que son medidas por el sensor 950 son en principio las mismas si la carga radial es manejada por el conjunto de cojinete de bolas 910 o por el sistema de balanceo magnético activo del volante de inercia 900.

5 El control del sistema de equilibrado magnético activo del volante de inercia 900 puede incluir controlar los actuadores inductivos 960 para crear un vector de fuerza de rotación con la misma velocidad de rotación que la del árbol 940 (vector de fuerza síncrona). Por ejemplo, la frecuencia de excitación de la bobina (en el caso de tres actuadores inductivos 960 colocados a intervalos de 120 grados) puede ser la mitad de la velocidad de rotación del árbol 940. (Por ejemplo, la fuerza ejercida por cada uno de los actuadores inductivos 960 puede ser proporcional al cuadrado de la corriente en ese actuador inductivo 960. Por lo tanto, cuando la corriente se describe mediante una onda sinusoidal, la frecuencia de la fuerza ejercida es el doble que la de la corriente). El ángulo de fase se varía más de 360 grados mientras que el sensor 950 mide las vibraciones. Una vibración máxima detectada indica que el vector de fuerza magnética está en fase con el vector de desequilibrio mecánico. La fase del vector de fuerza magnética giratoria se cambia entonces en 180 grados (opuesto al desequilibrio mecánico) mientras que su amplitud se varía de cero a un valor máximo preestablecido. Cuando la amplitud es cero, todo el desequilibrio es manejado por el conjunto de rodamiento de bolas 910 solo. A medida que aumenta la amplitud del vector de fuerza magnética, se reduce la fuerza sobre el conjunto de cojinete de bolas 910. Cuando la fuerza sobre el conjunto de rodamiento de bolas 910 invierte la dirección, se indica la amplitud óptima. Este procedimiento puede repetirse de vez en cuando para permitir la compensación de cambios en el equilibrio del volante de inercia.

Alternativamente o, además, la fase a aplicar puede calcularse usando mediciones de dos sensores 950 que detectan vibraciones montados con una separación de 90 grados alrededor del árbol del volante de inercia. Un algoritmo de cálculo de equilibrio que se ejecuta por el controlador 980 puede configurarse para determinar el ángulo de fase deseado para la señal de equilibrio.

La figura 13C ilustra esquemáticamente el control del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A usando un puente en H trifásico.

30 Los actuadores inductivos 960 son accionados por un puente en H trifásico 981 (puentes en H similares usados en los controladores de motor). El puente en H trifásico 981 es impulsado por el controlador 982. El controlador 982 está configurado para proporcionar un control trifásico estándar de los actuadores inductivos 960. El controlador 982 está configurado adicionalmente para modificar la fase de las tres señales de onda sinusoidal que accionan los actuadores inductivos 960 para modificar la fase del vector de fuerza resultante giratoria. Por tanto, la fase puede controlarse para minimizar las vibraciones o el desequilibrio del rotor del volante de inercia según lo detecta el sensor 950.

El controlador 982 está configurado además para compensar la variación geométrica de los componentes mecánicos debido a diversas tolerancias en la producción y montaje de los actuadores inductivos 960 y el anillo de rotor 970. Tales tolerancias de fabricación (por ejemplo, con magnitudes típicas de aproximadamente 0,1 mm) podrían provocar variaciones en la fuerza resultante (que depende del recíproco del cuadrado de la distancia entre el actuador inductivo 960 y el anillo de rotor 970). Por lo tanto, incluso cuando se utilizan técnicas de mecanizado y corte de alambre de alta gama, podrían existir tolerancias de $\pm 0,1$ mm a $\pm 0,01$ mm. Dado que la distancia entre el anillo de rotor 970 y los actuadores magnéticos 960 puede ser de aproximadamente 0,3 mm, tales tolerancias podrían conducir a una variación considerable en la fuerza y podrían requerir compensación, incluso si los propios actuadores y la corriente de excitación fueran perfectamente precisos.

La tabla de búsqueda (LUT) 983 puede incluir correcciones a las señales de excitación que se basan en los datos de referencia geométricos 984. Los datos de referencia geométricos 984 pueden medirse durante la producción y pueden ser utilizados por el controlador 982, junto con LUT 983 y con los datos de rotación proporcionados por el codificador 952, para facilitar el cálculo de la corrección. Por tanto, el vector de fuerza de rotación puede generarse correctamente de forma constante para compensar la variación de dimensiones debida a las tolerancias de fabricación y montaje.

55 La figura 13D ilustra esquemáticamente el control del sistema de equilibrio magnético activo mostrado en la figura 13A usando amplificadores de potencia.

Los actuadores inductivos 960 son alimentados por amplificadores de potencia (POAMP) 986. Cada amplificador de potencia 986 puede controlarse individualmente. Por tanto, cada fase puede controlarse individualmente. La LUT 983 se puede utilizar para controlar los amplificadores de potencia 986 para compensar las tolerancias geométricas proporcionadas por los datos de referencia geométricos 984. Se pueden controlar individualmente más de tres actuadores inductivos, lo que permite una flexibilidad adicional para corregir las señales de accionamiento individuales y aumentar la precisión del vector de fuerza de rotación.

65 En un ejemplo, un rotor de volante de inercia puede incluir un sistema de equilibrado automático. El control inalámbrico se puede utilizar para cambiar la configuración de una estructura excéntrica en el árbol del volante de

inercia con el fin de ajustar el equilibrio del volante de inercia (sin el uso de anillo deslizante u otra comunicación basada en contacto entre un controlador y un mecanismo de equilibrio).

5 La figura 14A es una ilustración esquemática de un conjunto de equilibrado de volante de inercia para un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia. La figura 14B es una vista lateral del conjunto de equilibrado del volante de inercia que se muestra en la figura 14A.

10 El conjunto de equilibrado del volante de inercia 1200 puede montarse en un rotor de volante de inercia. El conjunto de equilibrado del volante de inercia 1200 puede ser controlado por el controlador 1240. El controlador 1240 puede estar estacionario (sin girar). El controlador 1240 puede controlar el funcionamiento del conjunto de equilibrado del volante de inercia 1200 de acuerdo con las señales detectadas de los sensores de desequilibrio.

15 El conjunto de equilibrado del volante de inercia 1200 incluye dos engranajes helicoidales 1210. Cada engranaje helicoidal 1210 incluye un orificio excéntrico 1215 que está alineado paralelo al árbol del engranaje helicoidal 1210. El orificio de perforación excéntrico 1215 hace que el engranaje helicoidal 1210 tenga una distribución de masa excéntrica que puede ajustarse para equilibrar el volante de inercia mediante rotación alrededor de ese árbol longitudinal del engranaje helicoidal 1210.

20 Cada engranaje helicoidal 1210 puede girarse mediante la rotación de un tornillo sin fin 1220 mediante la operación del conjunto de motor 1230. El tornillo sin fin 1220 y el conjunto de motor 1230 también giran junto con el rotor del volante de inercia. (La colocación de dos tornillos sin fin 220 y dos conjuntos de motor 1230 de manera simétrica alrededor del rotor del volante de inercia puede evitar la introducción de un desequilibrio en el volante de inercia). Cada conjunto de motor 1230 puede ser controlado por una señal generada por el controlador 1240 para girar en sentido horario o antihorario mediante un ángulo de rotación controlado. Cuando el controlador 1240 no genera una
25 señal de comando, los engranajes helicoidales 1210 se autobloquean y no hay movimiento de los engranajes helicoidales 1210.

30 Una señal de control puede transmitirse de forma inalámbrica desde un controlador fijo 1240 a un conjunto de motor 1230 que gira junto con el volante de inercia. Por ejemplo, el controlador 1240 puede generar una señal óptica, por ejemplo, mediante un diodo emisor de luz (LED), diodo láser u otro dispositivo. La señal óptica puede ser detectada por un fotosensor (por ejemplo, una célula fotovoltaica) que está montado en los componentes giratorios del conjunto de equilibrado del volante de inercia 1200. Los comandos transmitidos pueden distinguirse entre sí por la ubicación del transmisor (por ejemplo, codificación angular o radial), por la longitud de onda de la señal óptica o por
35 otra característica de la señal óptica.

El controlador 1240 puede generar una señal electromagnética. Un conjunto de motor 1230 puede estar provisto de un inductor para permitir la alimentación inductiva del conjunto de motor 1230.

40 En un ejemplo, un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede incluir una pluralidad de unidades de volante de inercia dispuestas en una o más matrices (por ejemplo, como se muestra en la figura 2). El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede controlarse para determinar una velocidad a la que una unidad de motor/generador está almacenando energía en una unidad de volante de inercia o está extrayendo energía de la unidad de volante de inercia. El control puede ser tal que una tasa de almacenamiento o extracción de energía se mantenga a un nivel sustancialmente constante, incluso cuando una unidad de
45 motor/generador está desconectada de todos los conjuntos de volante de inercia (por ejemplo, se está moviendo de un conjunto de volante de inercia a otro). El control puede coordinarse con una red inteligente que está configurada para determinar un nivel de energía que debe ser proporcionada o almacenada en el sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia.

50 La figura 15 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que incluye una serie de unidades de volante de inercia.

55 El sistema de almacenamiento de energía de la matriz de volante de inercia 303 incluye una pluralidad de unidades de volante de inercia 103 dispuestas en una pluralidad de grupos de volante de inercia 313 (por ejemplo, cuatro grupos de volante de inercia 313). Cada grupo de volante de inercia 313 está provisto de una unidad de motor/generador 200 y un controlador de potencia asociado 326. La unidad de motor/generador 200 y el controlador de potencia 326 de un grupo de volante de inercia 310 están configurados para acoplarse con cualquier unidad de volante de inercia 103 de ese grupo de volante de inercia 310. El controlador de potencia 326 está configurado para controlar su unidad de motor/generador 200 asociada, almacenar o proporcionar potencia eléctrica a una velocidad
60 determinada. Por ejemplo, una tasa de suministro o almacenamiento de energía eléctrica puede oscilar entre 0,5 kW y 15 kW (u otro rango). Las unidades de motor/generador 200 están conectadas al inversor central 330. El inversor central 330 está conectado a la red eléctrica de corriente alterna (CA) 390. Durante el funcionamiento típico, cada unidad de motor/generador 200 puede funcionar a un nivel de potencia típico. Por ejemplo, a un nivel de potencia típico de aproximadamente 10 kW por unidad de motor/generador 200, un sistema de almacenamiento de energía
65 de conjunto de volantes de inercia 303 con cuatro grupos de volantes de inercia 313 puede funcionar a un nivel de potencia total de aproximadamente 40 kW.

El nivel de potencia de cada unidad de motor/generador 200 y del inversor central 320 está controlado por el controlador local 340. El controlador local 340 está configurado para el funcionamiento de todo el sistema de almacenamiento de energía de la matriz de volante de inercia 303.

5 El controlador local 340 puede estar en comunicación con uno o más controladores remotos 360. La comunicación con el controlador remoto 360 puede tener lugar a través de la red inteligente 350, o a través de otra red o canal de comunicaciones.

10 Alternativamente o, además, el controlador 340 local puede estar en comunicación con el controlador del sitio 370. El controlador del sitio 370 puede configurarse para gestionar el flujo de energía en un sitio de generación de energía renovable u otra instalación de generación y almacenamiento de energía. (El controlador del sitio 370 puede gestionar múltiples controladores locales 340. En un sitio pequeño, el controlador local 340 puede funcionar como un controlador del sitio).

15 El sistema de control de movimiento 316 se puede operar para mover una unidad de motor/generador 200 de una unidad de volante de inercia 103 a otra. Durante el movimiento, la energía hacia o desde el grupo de volante de inercia 313 con el que está asociada esa unidad de motor/generador 200 puede interrumpirse. El controlador local 340 puede configurarse para reducir o minimizar los efectos de la interrupción.

20 El controlador local 340 puede configurarse para funcionar de modo que reduzca o elimine los efectos de la interrupción en un grupo de volante de inercia 313. Por ejemplo, antes y durante el movimiento, el nivel de potencia de otros grupos de volantes de inercia 313 del sistema de almacenamiento de energía de conjuntos de volantes de inercia 303 puede aumentarse gradualmente mientras que el nivel de potencia de ese grupo de volantes de inercia 313 se reduce gradualmente a cero.

25 Por ejemplo, en un sistema de almacenamiento de energía de red de volante de inercia 303 con cuatro grupos de volante de inercia 313 puede tener un nivel de potencia nominal de 10 kW por grupo de volante de inercia 313. Antes del movimiento, la potencia del grupo de volante de inercia 313 en el que debe tener lugar el movimiento puede reducirse a 5 kW. Al mismo tiempo, los niveles de potencia de otros dos grupos de volantes de inercia 313 se incrementan hasta un nivel de potencia de compensación de 12,5 kW. A continuación, el nivel de potencia del grupo de volantes de inercia 313 en el que tiene lugar el movimiento se reduce a cero, mientras que la potencia de los otros tres grupos de volantes de inercia 313 se aumenta a 13 kW, 14 kW y 14 kW, respectivamente. Los niveles de potencia modificados se mantienen hasta que la unidad de motor/generador 200 de ese grupo de volante de inercia 313 se acopla a otra (o la misma) unidad de volante de inercia 103. En este punto, el nivel de potencia puede cambiarse gradualmente hasta que los niveles de potencia de todos los grupos de volantes de inercia 313 se restablezcan a sus niveles nominales originales (por ejemplo, 10 kW).

30 El controlador local 340 puede configurarse para asegurar que solo una unidad de motor/generador 200 de solo un grupo de volante de inercia 313 del sistema de almacenamiento de energía de conjunto de volante de inercia 303 se esté moviendo (o preparándose para ser movido) en un momento dado. Por ejemplo, el controlador local 340 puede configurarse (por ejemplo, mediante instrucciones programadas) para permitir una flexibilidad limitada con respecto a los límites generales de almacenamiento de energía del sistema de almacenamiento de energía de la matriz de volante de inercia 303. Por ejemplo, un margen de flexibilidad (por ejemplo, de aproximadamente 1 kWh) permitiría que una unidad de motor/generador 200 permanezca conectada a una unidad de volante de inercia 103 particular hasta que se complete otro movimiento (y acoplamiento) de otra unidad de motor/generador 200. Cualquier variación en el nivel de potencia del sistema de almacenamiento de energía de la matriz de volante de inercia 303 puede comunicarse (por ejemplo, a través de la red inteligente 350 o de otro modo) al controlador 360 remoto o al controlador del sitio 370.

35 El controlador local 340 puede configurarse para cambiar los niveles de potencia de los grupos de volante de inercia 313 para permitir el desacoplamiento de una unidad de motor/generador 200 de una unidad de volante de inercia 103 para reducir las horas de funcionamiento de esa unidad de motor/generador 200.

40 Típicamente, un sistema de almacenamiento de energía de matriz de volante de inercia está configurado para operar a una tensión de CC alta (por ejemplo, tan alto como 1000 V, o más típicamente a aproximadamente 400 V). Por ejemplo, una matriz de células solares típica puede incluir un bus de CC que se crea agregando la salida de varios paneles solares para crear un bus de alta tensión y alta corriente. El bus está conectado a un inversor que convierte la salida en tensión de corriente alterna sincronizada (CA) que se alimenta a una red eléctrica de CA. En algunos casos, se puede utilizar una unidad de gestión de energía activa para optimizar la transferencia de energía desde cada panel solar al bus central.

45 Normalmente, y como se describió anteriormente, un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede interactuar con la red eléctrica de CA. El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede almacenar energía de la red o suministrar energía almacenada a la red. Las múltiples conversiones de energía involucradas pueden afectar la eficiencia del proceso.

En un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede conectarse directamente a un bus de corriente continua (CC) de energía renovable. De esta manera, se puede reducir el número de conversiones de potencia.

5 La figura 16 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que está conectado directamente a un bus de CC de energía renovable.

10 El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de energía renovable 400 está diseñado para almacenar energía de dispositivos generadores de energía renovable. Los dispositivos de generación de energía renovable, tales como la turbina eólica 402 o la matriz de células solares 404, están conectados al bus de CC de alta tensión 435. El bus de CC de alta tensión 435 puede funcionar con una variedad de posibles tensiones de CC. Por ejemplo, la tensión de CC del bus de CC de alta tensión 435 puede oscilar entre 400 V y 1000 V. La tensión de CC se puede alimentar al inversor principal 450. El inversor principal 450 está configurado para convertir la tensión de CC en una tensión de CA monofásica o trifásica que está sincronizada con la fase y frecuencia de la red eléctrica de CA 390.

20 En algunos casos, el controlador de turbina eólica 411 y el controlador de células solares 421 pueden estar en comunicación con el controlador del sistema 460. El controlador de turbina eólica 411 y el controlador de células solares 421 pueden configurarse para supervisar el funcionamiento de la turbina eólica 402 y la matriz de células solares 404, respectivamente. Por ejemplo, el controlador de turbina eólica 411 y el controlador de célula solar 421 pueden informar al controlador de sistema 460 el nivel de suministro de corriente al que la energía es suministrada por la turbina eólica 402 o la matriz de células solares 404. El controlador de turbina eólica 411 y el controlador de célula solar 421 pueden informar de cualquier mal funcionamiento detectado de la turbina eólica 402 o del conjunto de células solares 404 que podría reducir la energía que se suministra o que se prevé que se suministre.

25 Según un ejemplo, el bus de CC de alta tensión 435 está conectado a la unidad de enrutamiento de energía 440. La unidad de enrutamiento de energía 440 está configurada para funcionar como un enrutador de energía administrado. La unidad de enrutamiento de energía 440 puede dirigir la energía de fuentes renovables al bus de CC de almacenamiento del volante de inercia 431. La potencia dirigida se alimenta a las unidades de inversor 432 que accionan los motores de CC de las unidades de motor/generador 200. Alternativamente, la unidad de enrutamiento de energía 440 puede dirigir la energía suministrada por las unidades inversoras 432 a través del bus de CC de almacenamiento del volante de inercia 431 para alimentarla al inversor principal 450. Alternativamente, la unidad de enrutamiento de energía 440 puede dirigir energía desde el bus de CC de alta tensión 435 al inversor principal 450.

30 El controlador del sistema 460 puede configurarse para controlar la unidad de enrutamiento de energía 440 de acuerdo con un sistema de decisión programado. Alternativamente o, además, el controlador del sistema 460 puede configurarse para emitir comandos basados en información recibida de otras entidades o controladores remotos, por ejemplo, a través de la red inteligente 350 o mediante otros medios viables de comunicaciones.

35 Cuando la tensión del bus de CC de almacenamiento del volante de inercia 431 es esencialmente la misma que el del bus de CC de alta tensión 435, entonces el bus de CC de almacenamiento del volante de inercia 431 puede conectarse directamente al bus de CC de alta tensión 435 sin la unidad de enrutamiento de energía 440. El flujo de energía hacia y desde una unidad de volante de inercia puede gestionarse mediante el inversor 432 y el flujo de energía hacia el inversor principal 450 puede gestionarse mediante un controlador inversor. De esta manera, la simplificación del sistema puede evitar el coste y las pérdidas debidas a componentes adicionales, y se puede mejorar la confiabilidad y resiliencia del sistema.

40 El uso de un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de energía renovable 400 puede ser ventajoso. La eficiencia general puede mejorarse evitando múltiples conversiones de energía (dado que la corriente CC se convierte en corriente CA solo cuando se alimenta a la red eléctrica de CA 390). La unidad de enrutamiento de energía 440 puede aumentar la flexibilidad del sistema al permitir aumentar la potencia al inversor principal 450 cuando hay una disminución temporal en la potencia suministrada por la turbina eólica 402 o por la matriz de células solares 404. La unidad de enrutamiento de energía 440 puede encaminar el exceso de energía para que sea almacenada por el sistema de almacenamiento del volante de inercia. Por ejemplo, las regulaciones pueden limitar la energía eléctrica que se alimenta a la red eléctrica de CA 390. Por lo tanto, la energía excedente se puede utilizar en un momento posterior. La conexión de todas las unidades a un único bus de CC de alta tensión 435 y un controlador de sistema central 460 puede permitir el control individual de cada unidad de volante de inercia.

45 De acuerdo con una realización de la presente invención, un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia puede incluir un bus de CC de tensión constante. Un bus de CC de tensión constante puede evitar el uso de una configuración maestro-esclavo, donde un fallo o desperfecto en la unidad maestra podría resultar en un fallo en el funcionamiento de todo el sistema.

50 La figura 17 ilustra esquemáticamente un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia que incluye un bus de CC de tensión constante, de acuerdo con una realización de la presente invención.

El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de tensión CC constante 1300 incluye una pluralidad de unidades de volante de inercia 1310. Cada unidad de volante de inercia 1310 está asociada con la unidad de motor/generador 1320 y la unidad de controlador/controlador/inversor 1330.

Por ejemplo, una unidad de volante de inercia 1310 asociada y una unidad de motor/generador 1320 pueden incluir un volante de inercia/rotor de bastidor abierto dentro de una caja de vacío, y un exterior de la caja de vacío, como se muestra. Se pueden usar otras configuraciones de unidades de volante de inercia y unidades de motor/generador (por ejemplo, una unidad de motor/generador cuyo rotor está acoplado magnéticamente a una unidad de volante de inercia dentro de una caja de vacío, o una unidad de motor/generador que está acoplada mecánicamente a una unidad de volante de inercia y que también está encerrada dentro de la caja de vacío).

Los componentes del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de tensión CC constante 1300 pueden controlarse mediante un controlador del sistema local 1370 a través del bus de control 1350. Alternativamente o, además, el controlador del sistema local 1370 puede ser controlado por el controlador global 1390 a través de la red 1380, que controla los componentes del sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de tensión CC constante 1300 a través del bus de control 1350.

Cada unidad de controlador/inversor 1330 está conectada al bus de CC de alta tensión 1340. El bus de CC de alta tensión 1340 se puede conectar a la red eléctrica de CA 390 a través del rectificador/inversor 1360. En algunos casos, el bus de CC de alta tensión 1340 se puede conectar a una o más fuentes de energía renovable a través del bus de energía de energía renovable 1345. La tensión de CC del bus de CC de alta tensión 1340 puede mantenerse constante. Por ejemplo, la tensión de CC del bus de CC de alta tensión 1340 puede tener un valor de aproximadamente 650 V u otro valor.

Durante una fase de carga de funcionamiento, la unidad de controlador/inversor 1330 funciona en un modo de carga para convertir la corriente CC para el bus de CC de alta tensión 1340 en una tensión CA. Por ejemplo, una tensión de bus de CC de 650 V se puede convertir en una tensión de CA con una amplitud de aproximadamente 300 V para una velocidad de rotación del volante de inercia de 20.000 rpm, o que tenga una amplitud de aproximadamente 600 V para una velocidad de rotación del volante de inercia de 40.000 rpm. La tensión de CA se alimenta a las bobinas del estator de la unidad de motor/generador 1320 para crear un par para acelerar el volante de inercia de la unidad de volante de inercia 1310.

Durante una fase de descarga de funcionamiento, se induce una tensión de CA que se puede describir mediante una onda sinusoidal dentro de las bobinas del estator de la unidad de motor/generador 1320 que funciona en un modo de descarga. La amplitud de la tensión CA inducida es de magnitud similar a la amplitud de la tensión CA que se alimenta a las bobinas del estator durante la fase de carga (por ejemplo, 300 V con 20.000 rpm y 600 V con 40.000 rpm). La unidad de controlador/inversor 1330 incluye un circuito de puente y un controlador de modulación de ancho de pulso (PWM) 1335. Por ejemplo, el circuito puente y el controlador PWM 1335 pueden incluir un circuito puente H y un circuito de control PWM. La unidad de controlador/inversor 1330 utiliza la inductancia de la unidad de motor/generador 1320 para aumentar la señal de tensión para alimentar al bus de CC de alta tensión 1340 en un modo de corriente limitada. El modo de corriente limitada hace que la tensión de la salida de la unidad de controlador/inversor 1330 aumente a un nivel de tensión que permite el flujo de corriente desde la unidad de controlador/inversor 1330 al bus de CC de alta tensión 1340 a un nivel de corriente predeterminado. Con tal operación de corriente limitada, múltiples unidades inversoras 342 pueden alimentar simultáneamente energía a un único bus de CC de alta tensión 1340 sin interferencia mutua. El controlador del sistema local 1370 puede controlar un punto de ajuste de la corriente a ser alimentada por la unidad del controlador/inversor 1330 al bus de CC 1340. Por tanto, la velocidad de descarga de energía de un volante de inercia de cada unidad de volante de inercia 1310 es controlada por el controlador del sistema local 1370.

Un sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de tensión CC constante 1300 que incluye un bus de CC de tensión constante puede ser ventajoso. Por ejemplo, la carga y descarga de múltiples unidades de volante de inercia 1310 (con las correspondientes unidades de controlador/inversor 1330 funcionando en modo de carga o descarga, respectivamente) que están conectadas a un único bus de CC de alta tensión 1340 puede realizarse simultáneamente. Una única unidad de controlador/inversor 1330 admite funciones de carga y descarga. La conexión directa del bus de CC de alta tensión 1340 al bus de energía de energía renovable 1345 está habilitada.

El sistema de almacenamiento de energía del volante de inercia de tensión de CC constante 1300 puede permitir una mayor flexibilidad funcional y resistencia. Por ejemplo, el fallo de una unidad de controlador/inversor 1330 individual (excepto debido a un cortocircuito) no afectaría el funcionamiento adecuado de las unidades de inversor 1330. En contraste, un sistema configurado para operación secuencial, por ejemplo, un sistema en el que diferentes unidades de volante de inercia proporcionarían potencia a diferentes tensiones, limitaría los niveles de potencia al de una unidad de volante de inercia individual 1310.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un sistema de almacenamiento de energía por volante de inercia (600) para almacenar energía eléctrica, comprendiendo el sistema:
- 10 un volante de inercia (601) que incluye una masa giratoria (110) y un árbol (142), la masa configurada para girar junto con el árbol, estando el volante de inercia encerrado dentro de una caja de vacío (150) que es evacuable para formar un vacío, el árbol soportado por cojinetes (120) en lados opuestos de la masa giratoria; y una unidad de motor/generador eléctrico de bastidor abierto (602) que tiene un estator anular (606) ubicado fuera de la caja y un rotor (604), estando el sistema **caracterizado por que** el rotor (604) está fijado al árbol en voladizo dentro de la caja para girar dentro del estator y acoplarse magnéticamente al estator.
- 15 2. El sistema de la reivindicación 1, en el que el volante de inercia comprende plomo envuelto en una carcasa que comprende fibra de carbono.
- 20 3. El sistema de la reivindicación 1, en el que el volante de inercia comprende una pluralidad de fibras de vidrio (586), estando cada fibra envuelta al menos parcialmente alrededor de una columna de una pluralidad de columnas que están dispuestas en un patrón circular que está centrado en un eje de rotación del volante de inercia, de modo que cada fibra se extienda sustancialmente radialmente hacia fuera desde el árbol cuando el volante de inercia gira.
- 25 4. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el volante de inercia incluye una estructura (1200) con una distribución de masa excéntrica que es giratoria para ajustar un equilibrio del volante de inercia.
- 30 5. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que una sección de la caja entre el rotor y el estator comprende vidrio.
- 35 6. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que los cojinetes comprenden un cojinete mecánico (910) para soportar continuamente un árbol de la carga giratoria para mantener el árbol en un eje de rotación sustancialmente fijo y un conjunto de estabilización magnética (900) que incluye una pluralidad de electroimanes (960) dispuestos alrededor del árbol, el sistema comprende además un circuito de control para controlar un campo magnético resultante generado por los electroimanes de modo que el campo magnético actúa sobre un elemento ferromagnético (970) del árbol para reducir las fuerzas de desequilibrio actuando sobre el árbol.
- 40 7. El sistema de la reivindicación 6, que comprende un sensor (950) para detectar una vibración del árbol, estando configurada la circuitería de control para controlar el campo magnético resultante para minimizar la vibración detectada.
- 45 8. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que además comprende:
- una pluralidad de volantes de inercia;
un bus de corriente continua (CC) (431):
- 50 una pluralidad de unidades de motor/generador (200), estando cada unidad de motor/generador de dicha pluralidad de unidades de motor/generador acoplada magnéticamente a un volante de inercia de dicha pluralidad de volantes de inercia;
una pluralidad de controladores/inversores (432), estando cada controlador/inversor acoplado eléctricamente a una unidad de motor/generador de dicha pluralidad de unidades de motor/generador y al bus de CC; y
un controlador central (460) para controlar cada controlador/inversor a fin de establecer una tasa de descarga para cada uno de los volantes de inercia cuando su unidad de motor/generador está operando en un modo de descarga, y para aumentar un nivel de tensión de una señal de tensión generada por la unidad de motor/generador en modo de descarga.
- 55 9. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que una tapa (162) de la caja entre el estator y el rotor comprende un material magnéticamente susceptible.
- 60 10. El sistema de la reivindicación 9, en el que el material magnéticamente susceptible comprende fibra de vidrio.
11. El sistema de la reivindicación 9, en el que el material magnéticamente susceptible comprende un material compuesto de vidrio.
12. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que la unidad de motor/generador comprende un motor de CC.

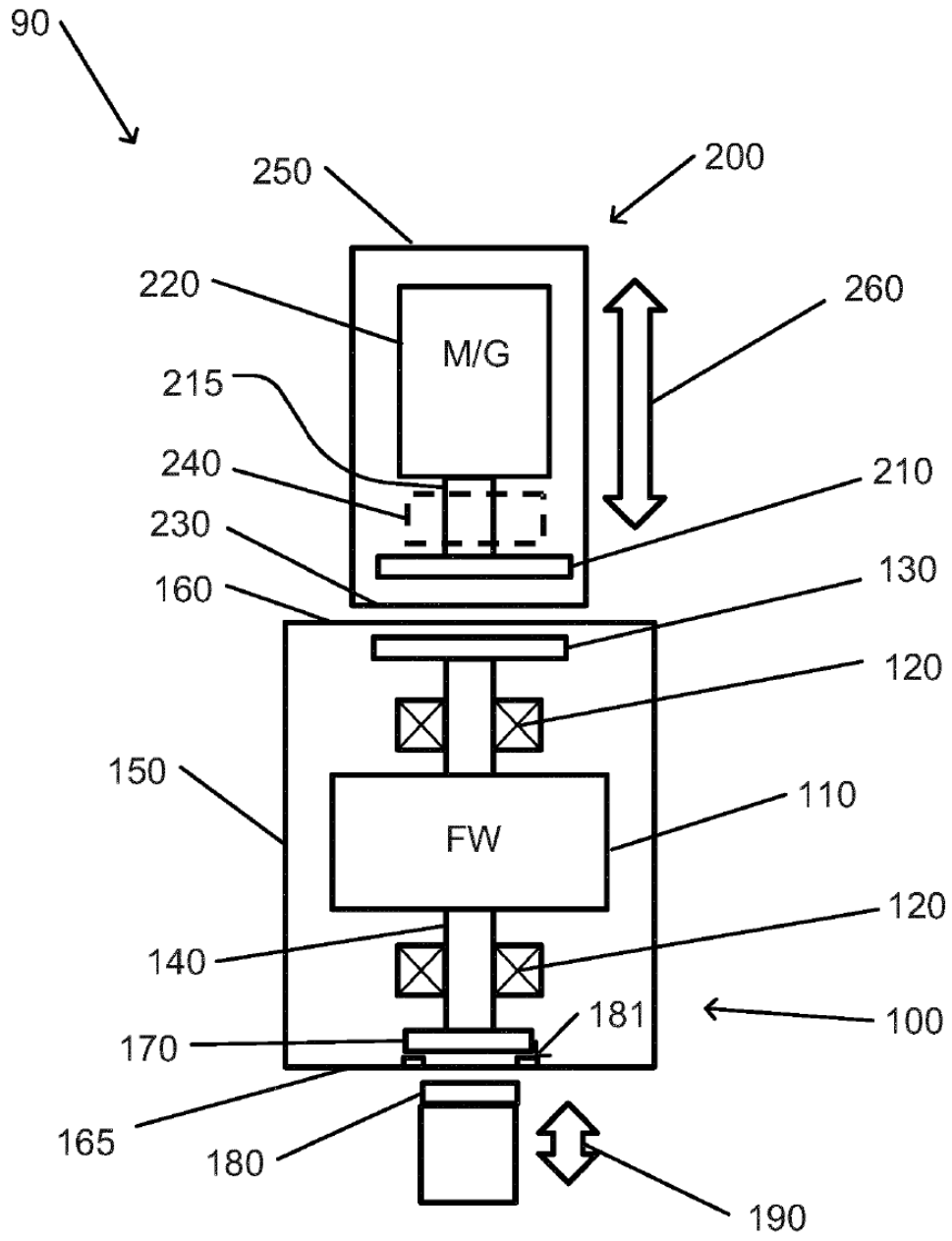


Fig. 1

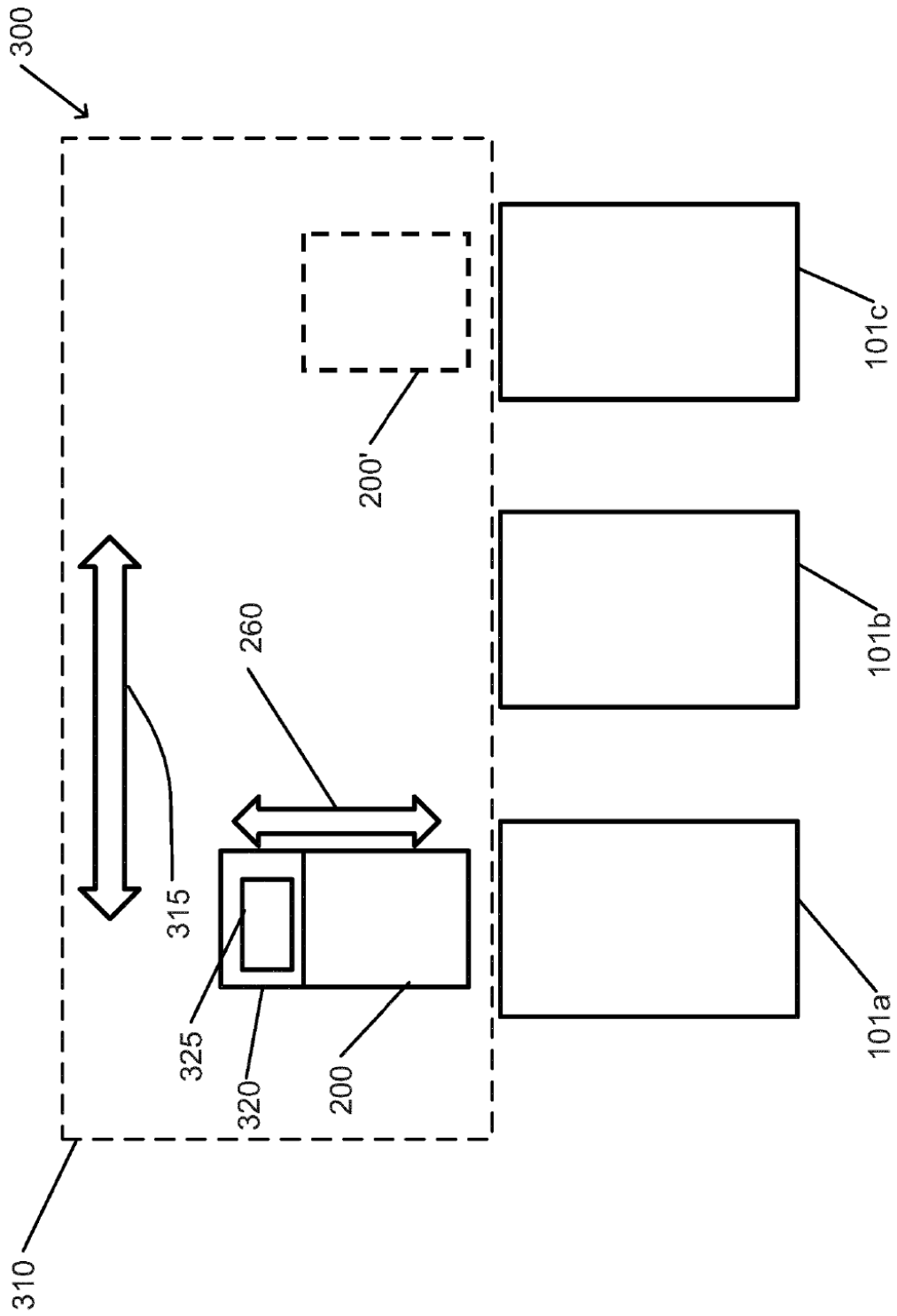


Fig. 2

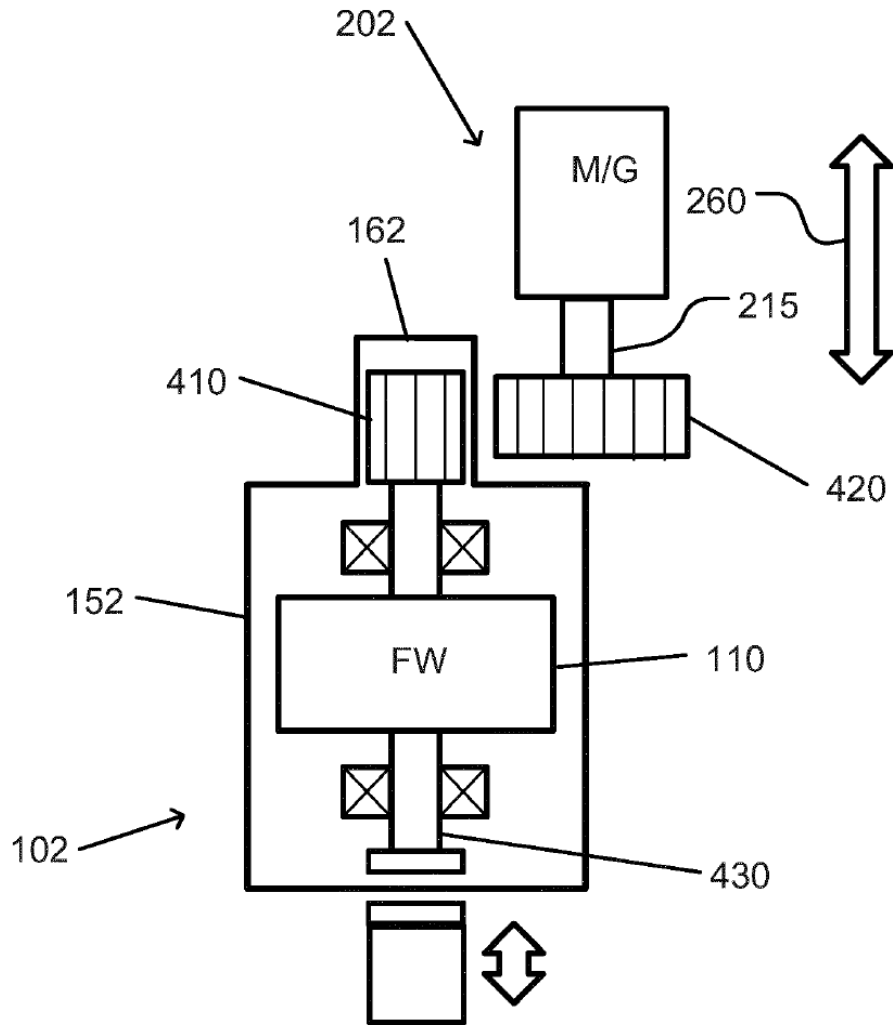


Fig. 3

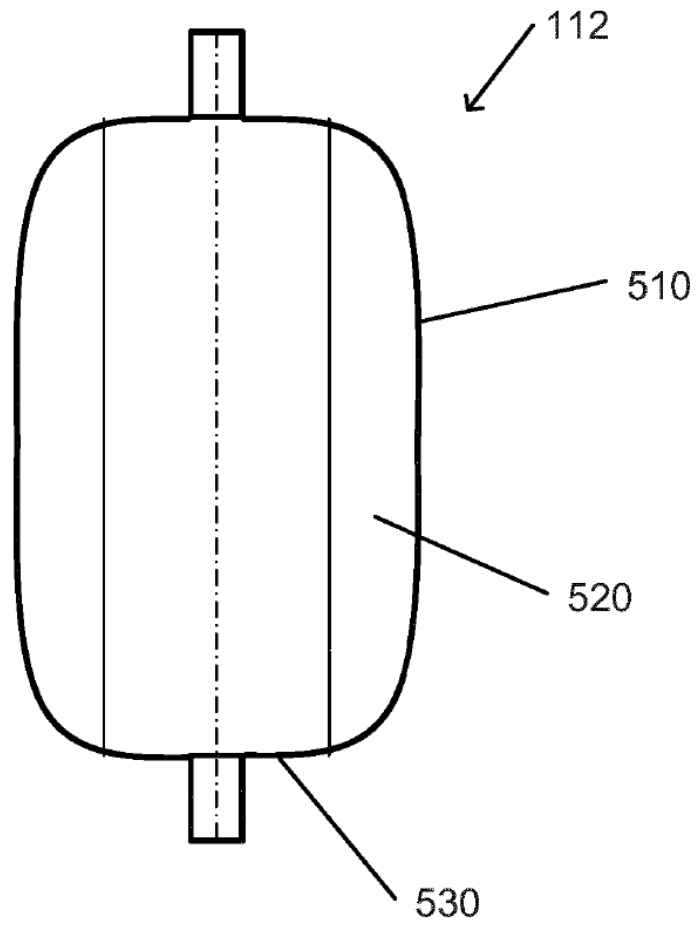


Fig. 4

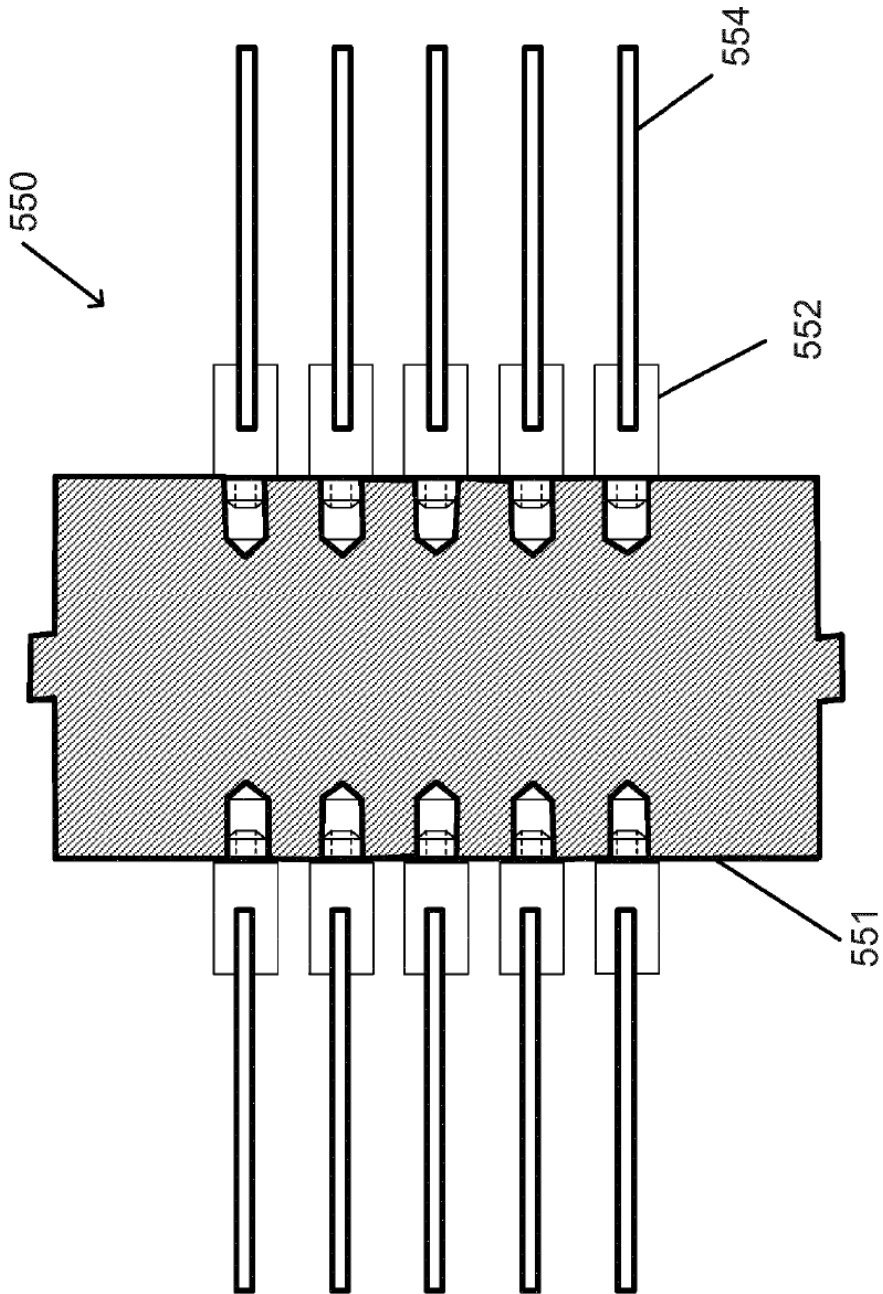


Fig. 5A

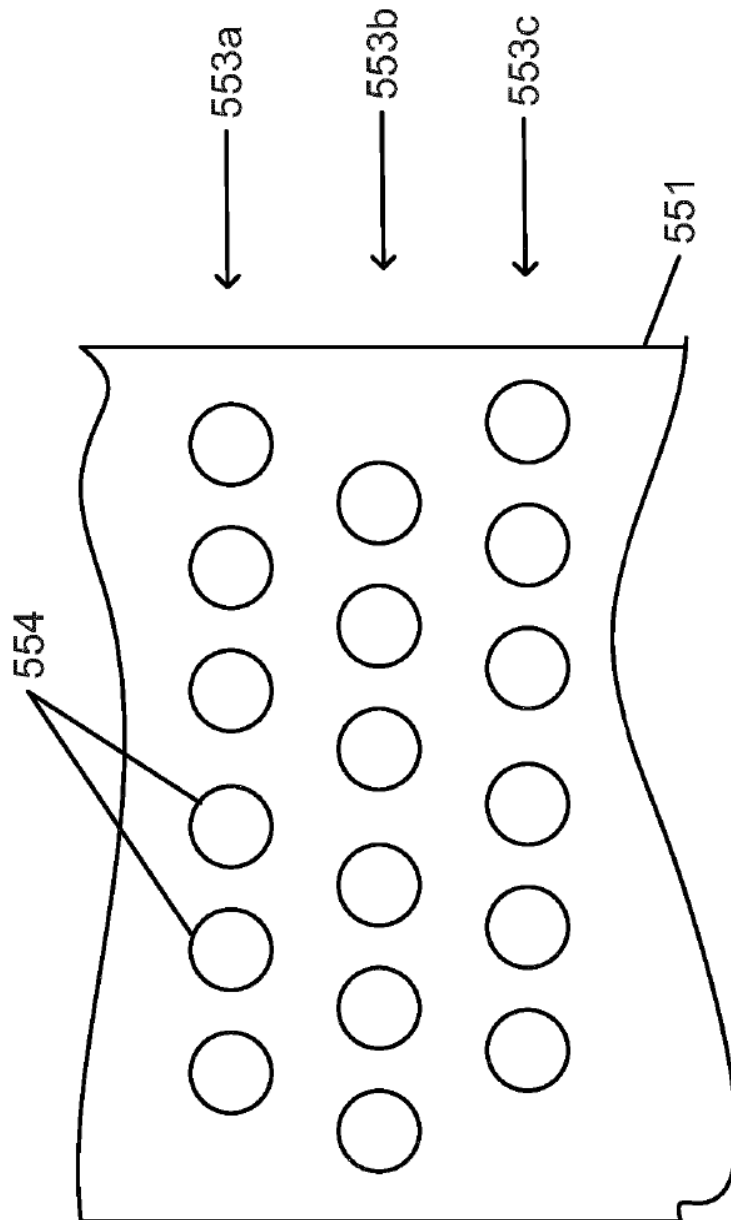


Fig. 5B

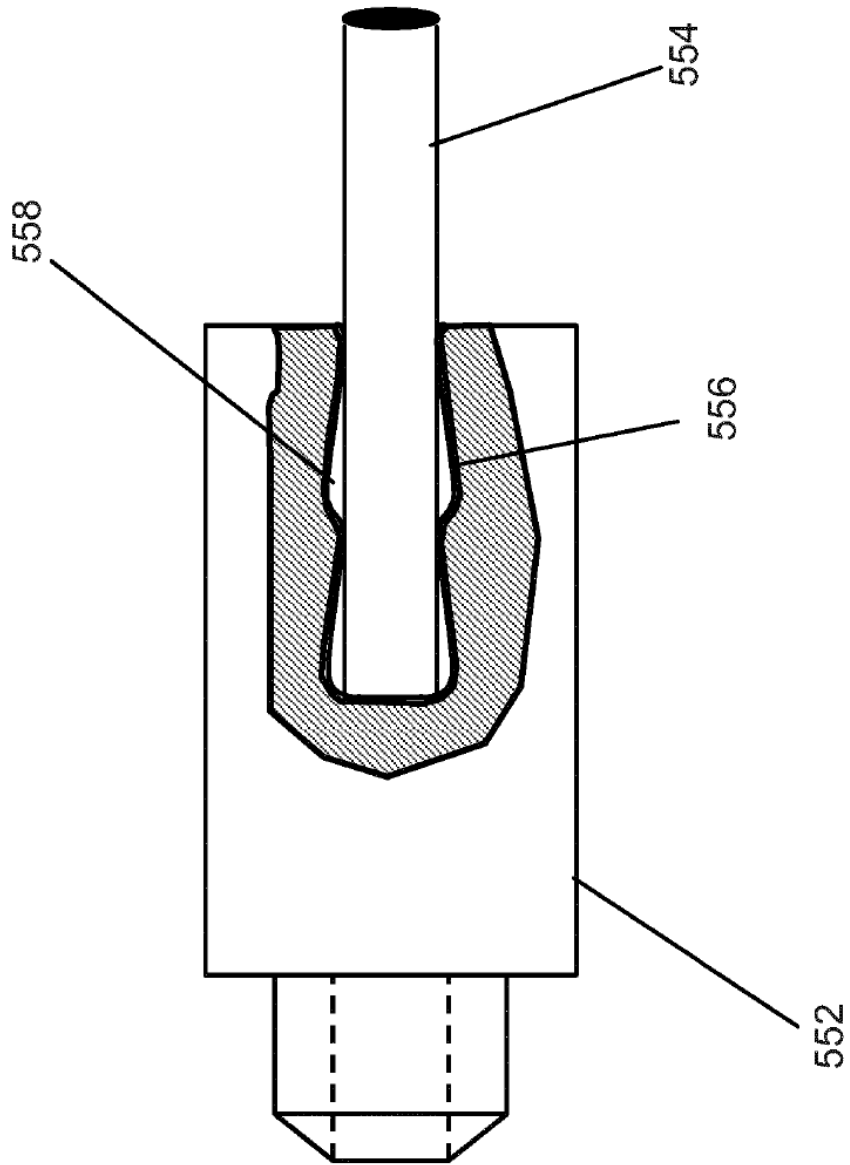


Fig. 6

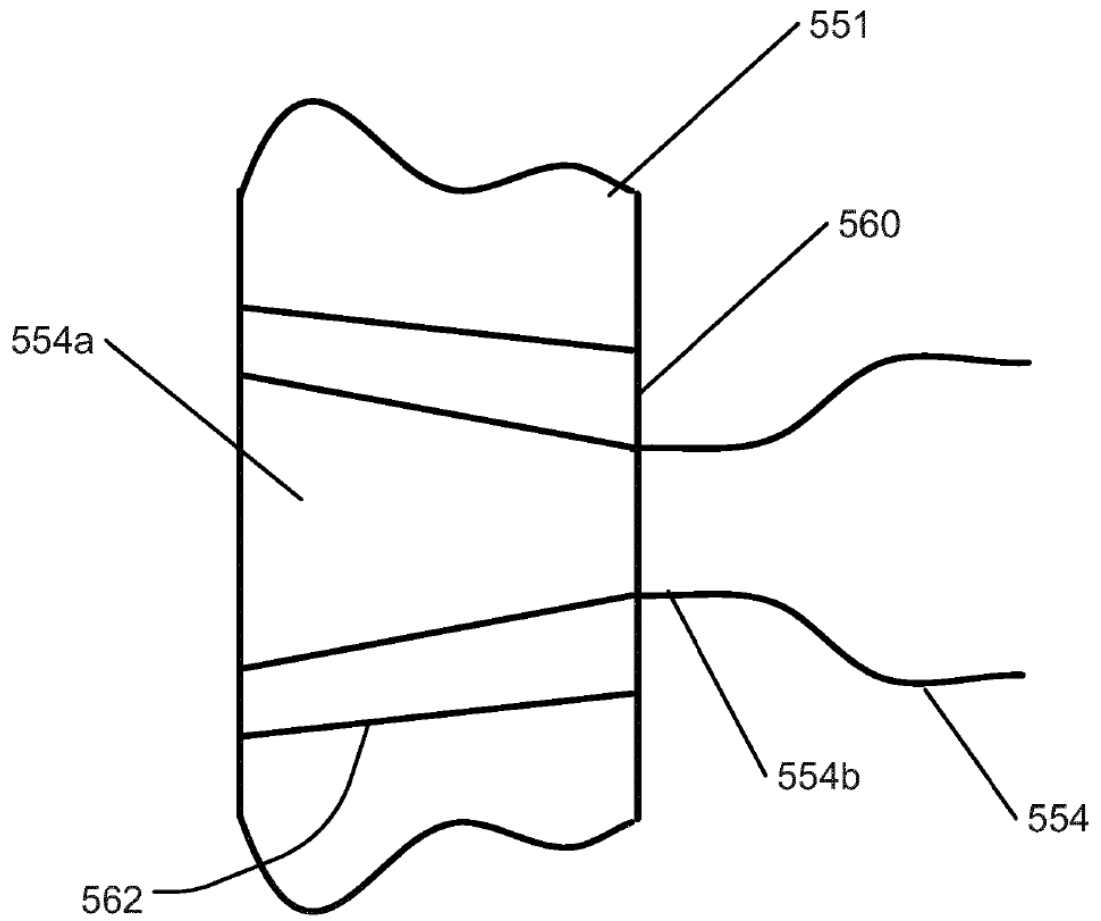


Fig. 7

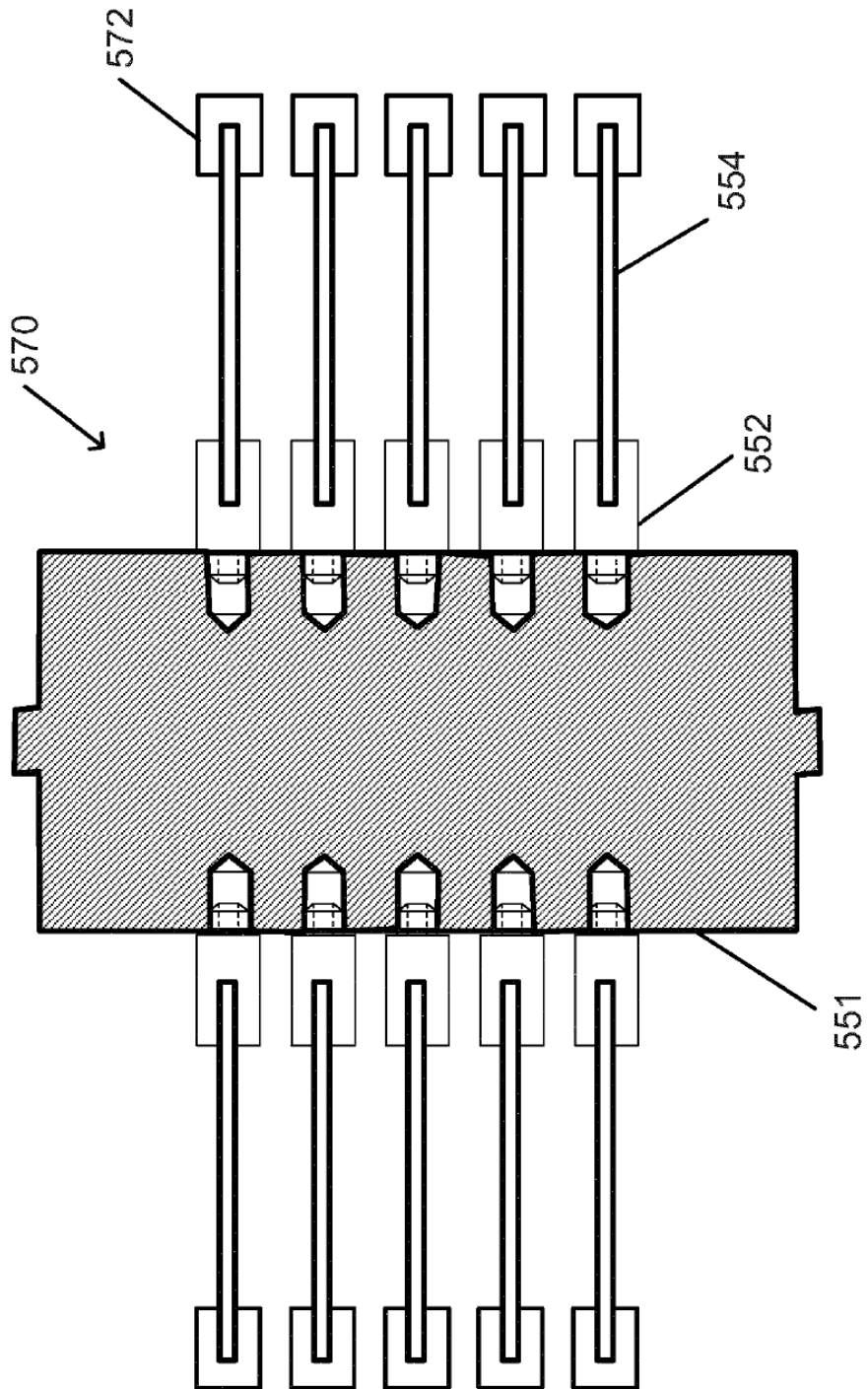


Fig. 8

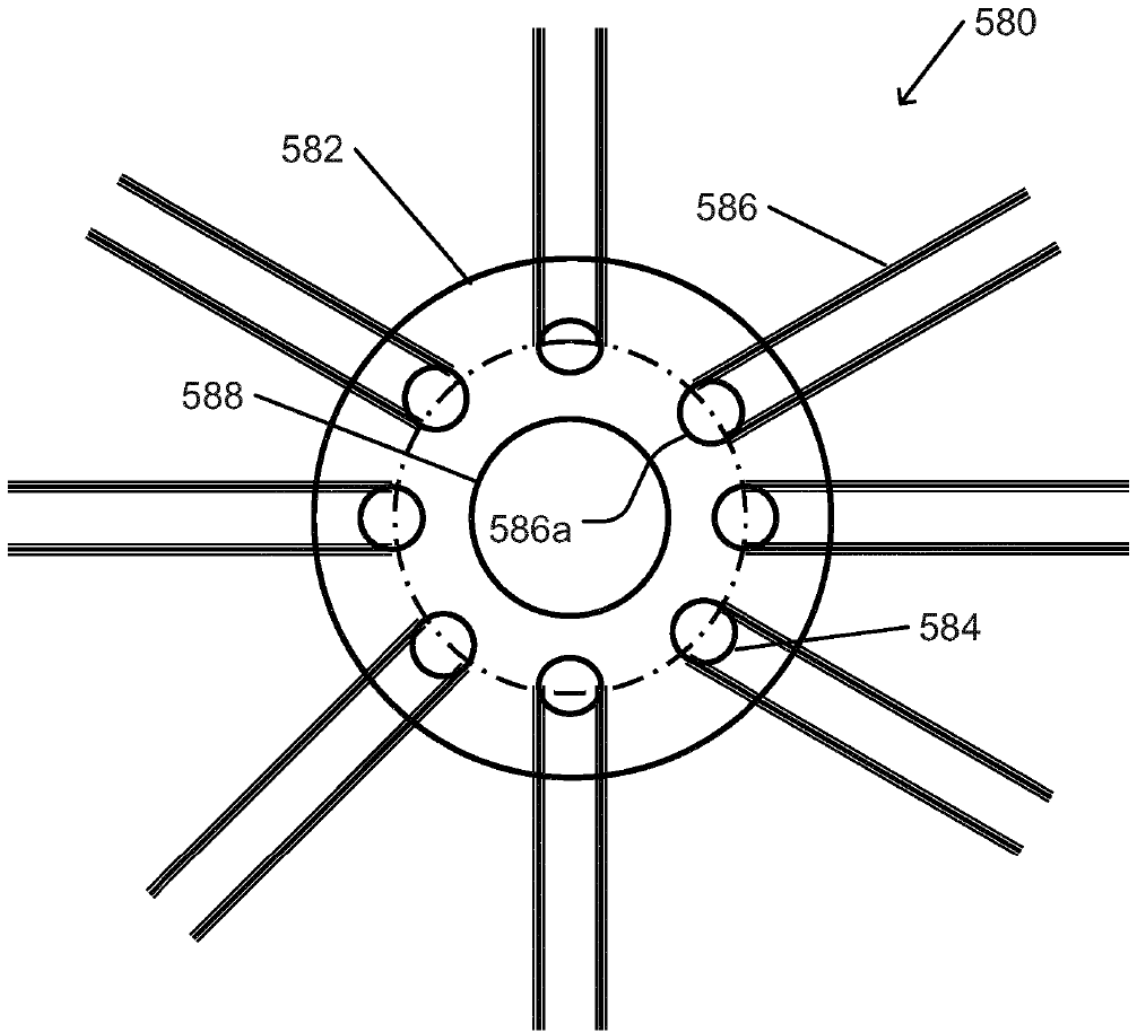


Fig. 9

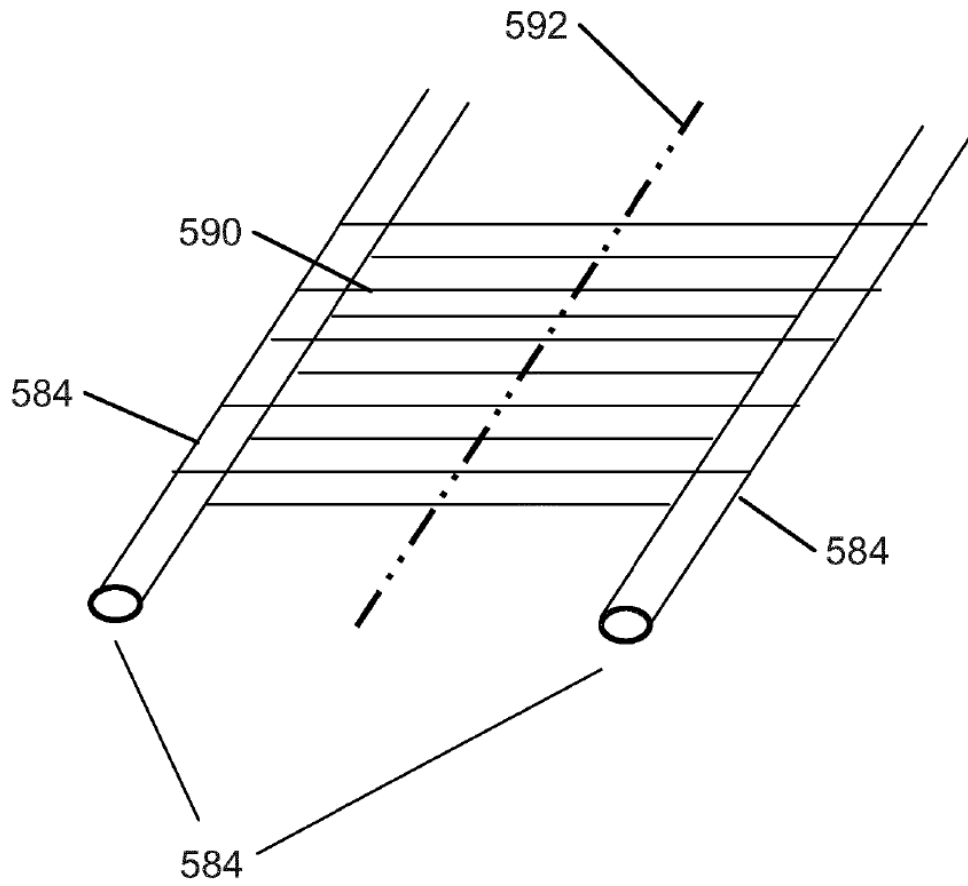


Fig. 10

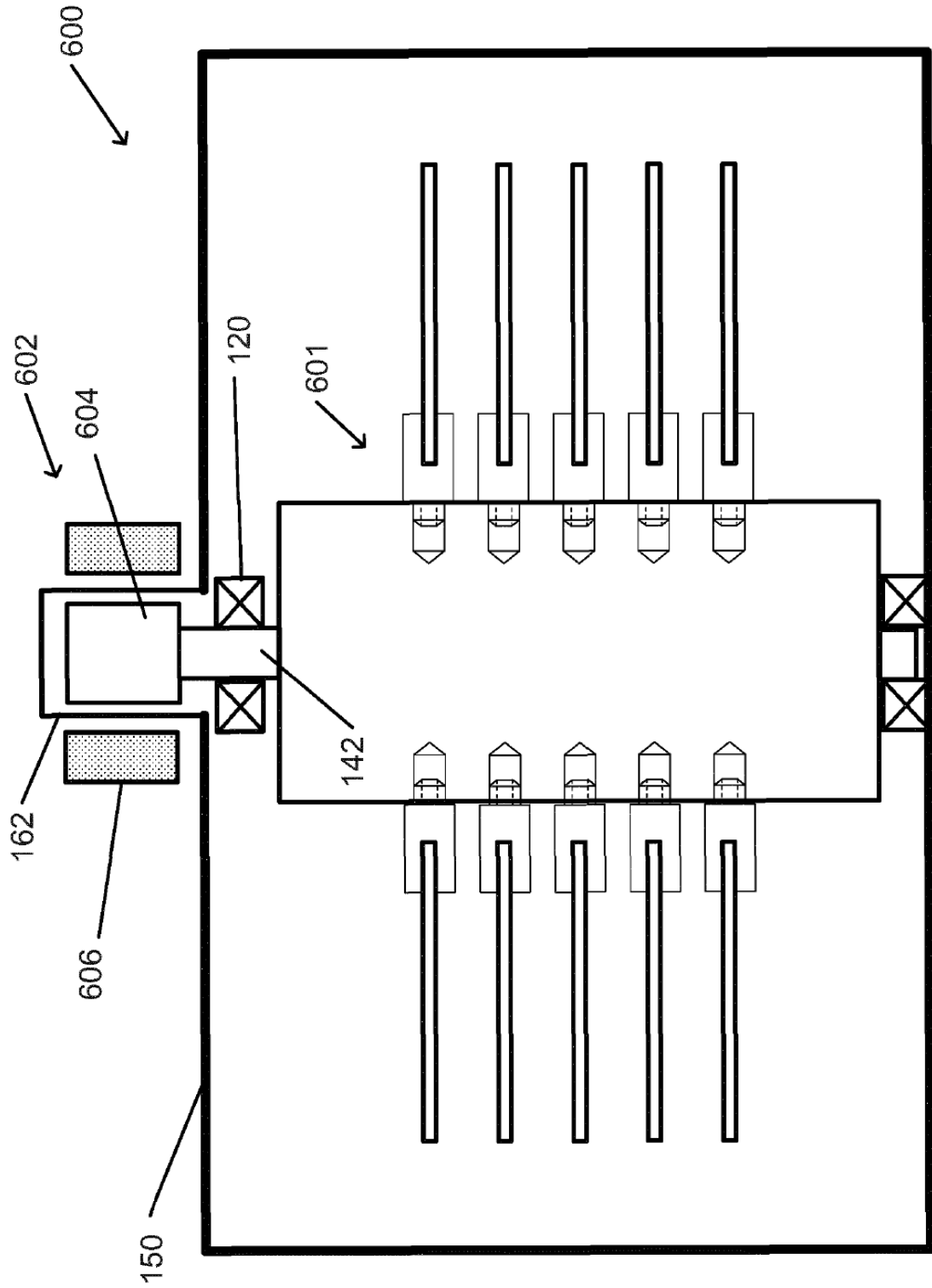


Fig. 11

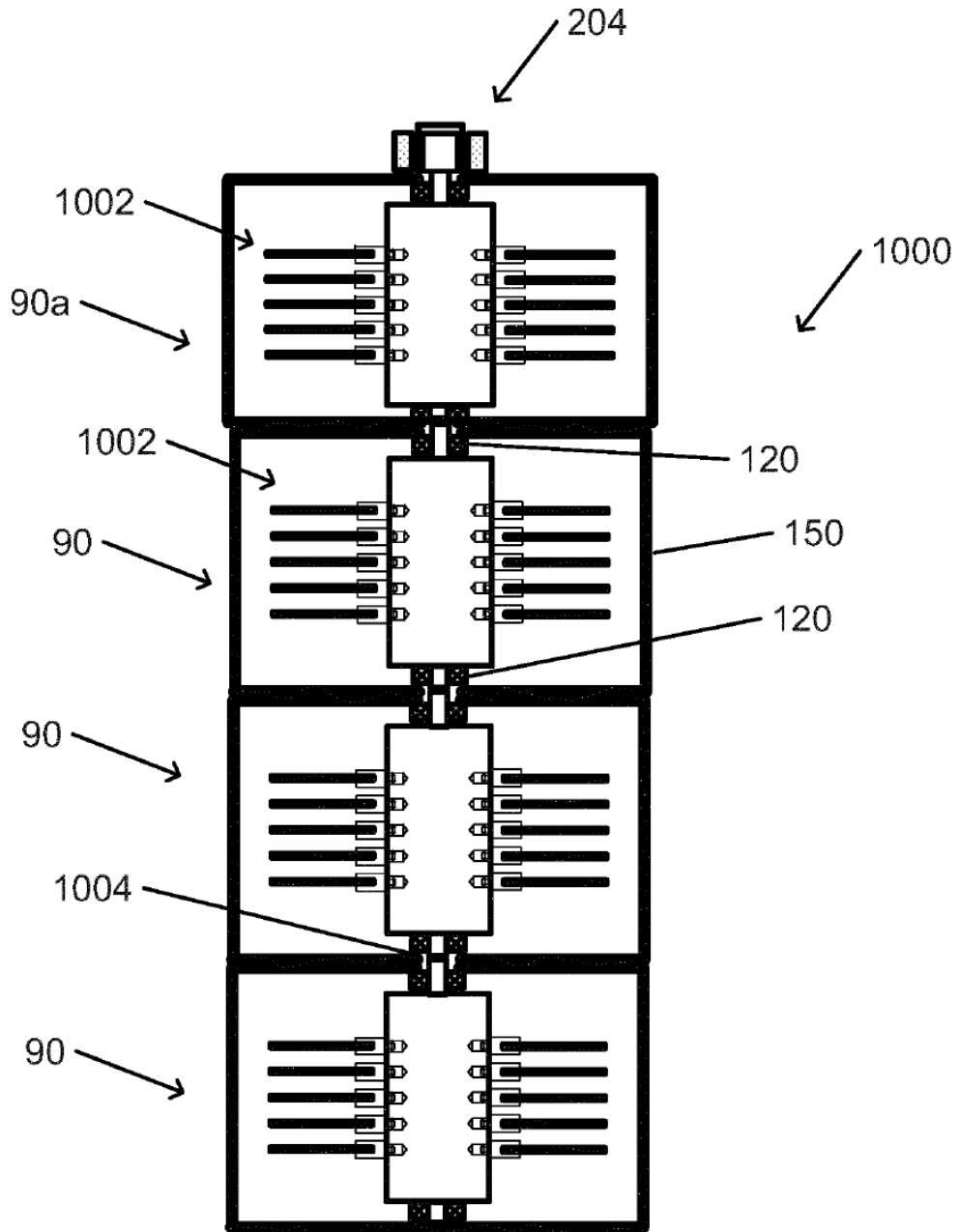


Fig. 12

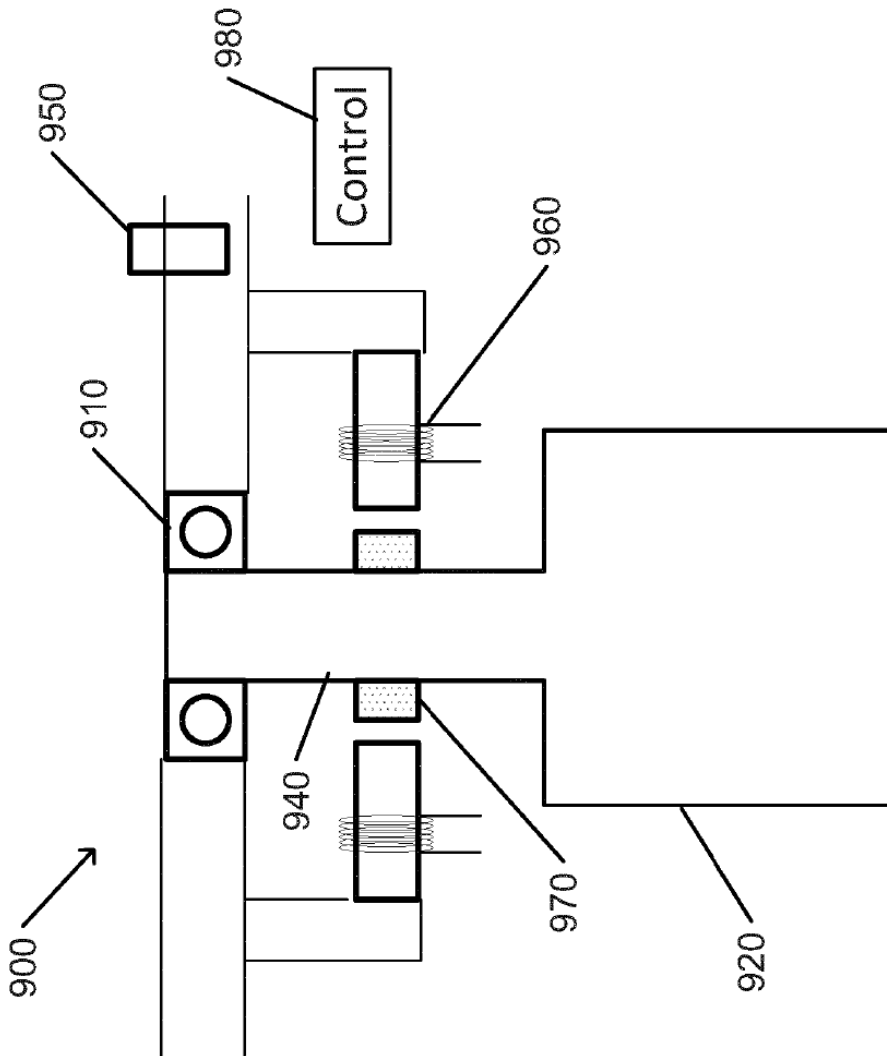


Fig. 13A

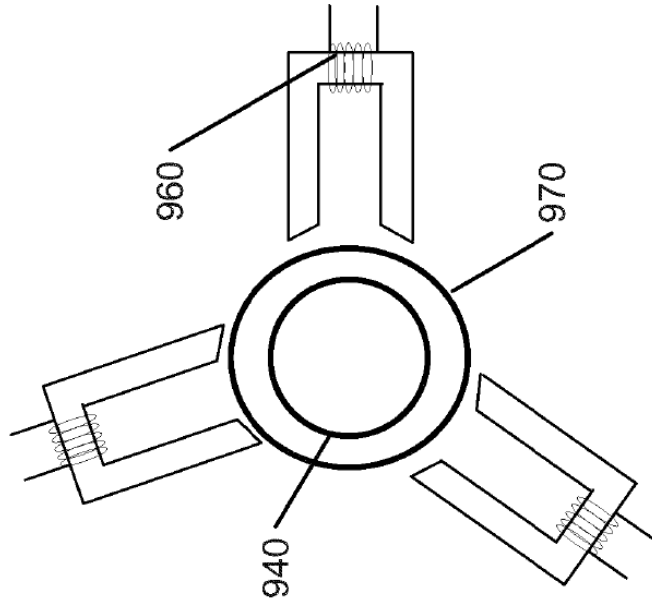


Fig. 13B

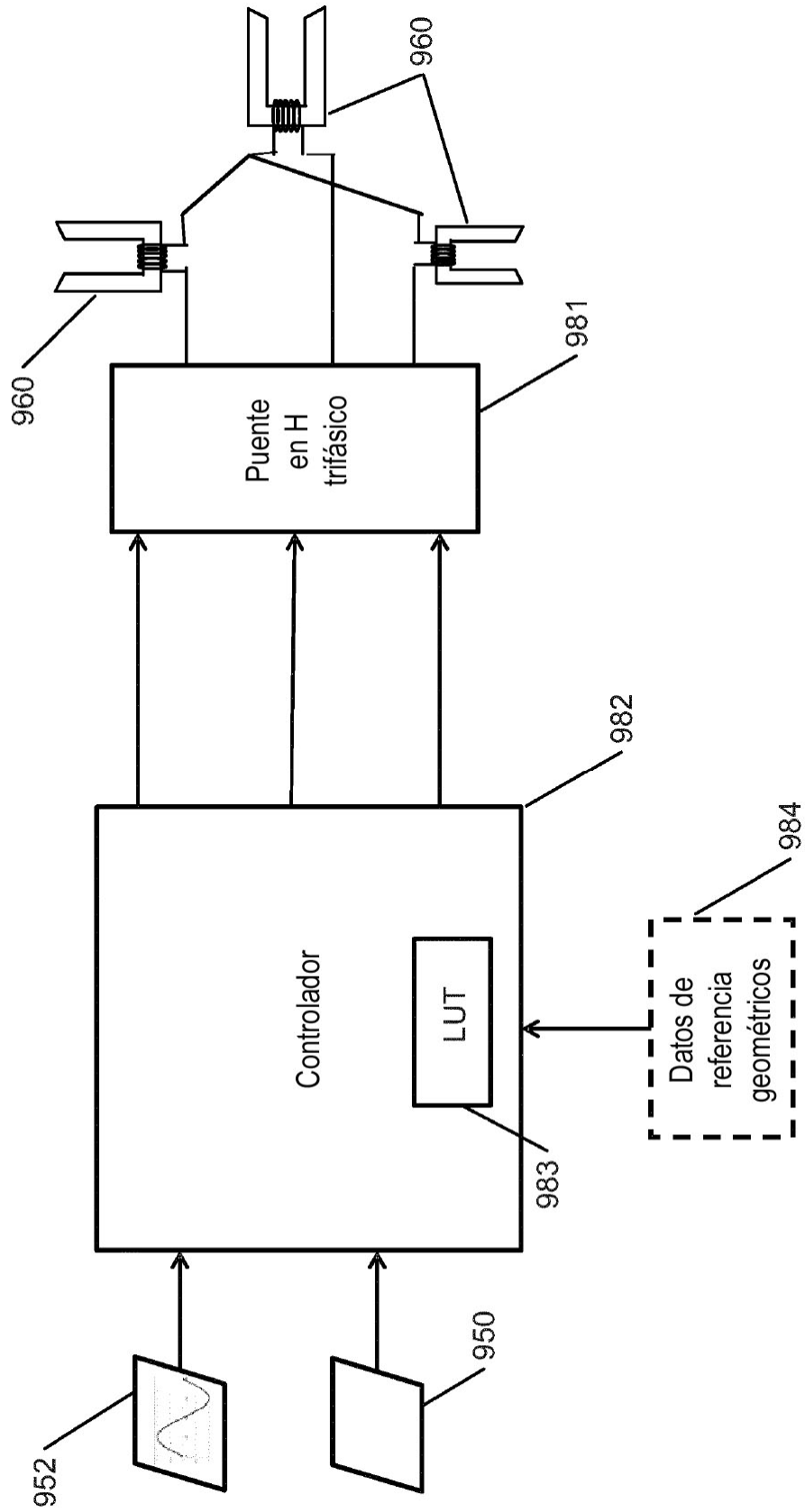


Fig 13 C

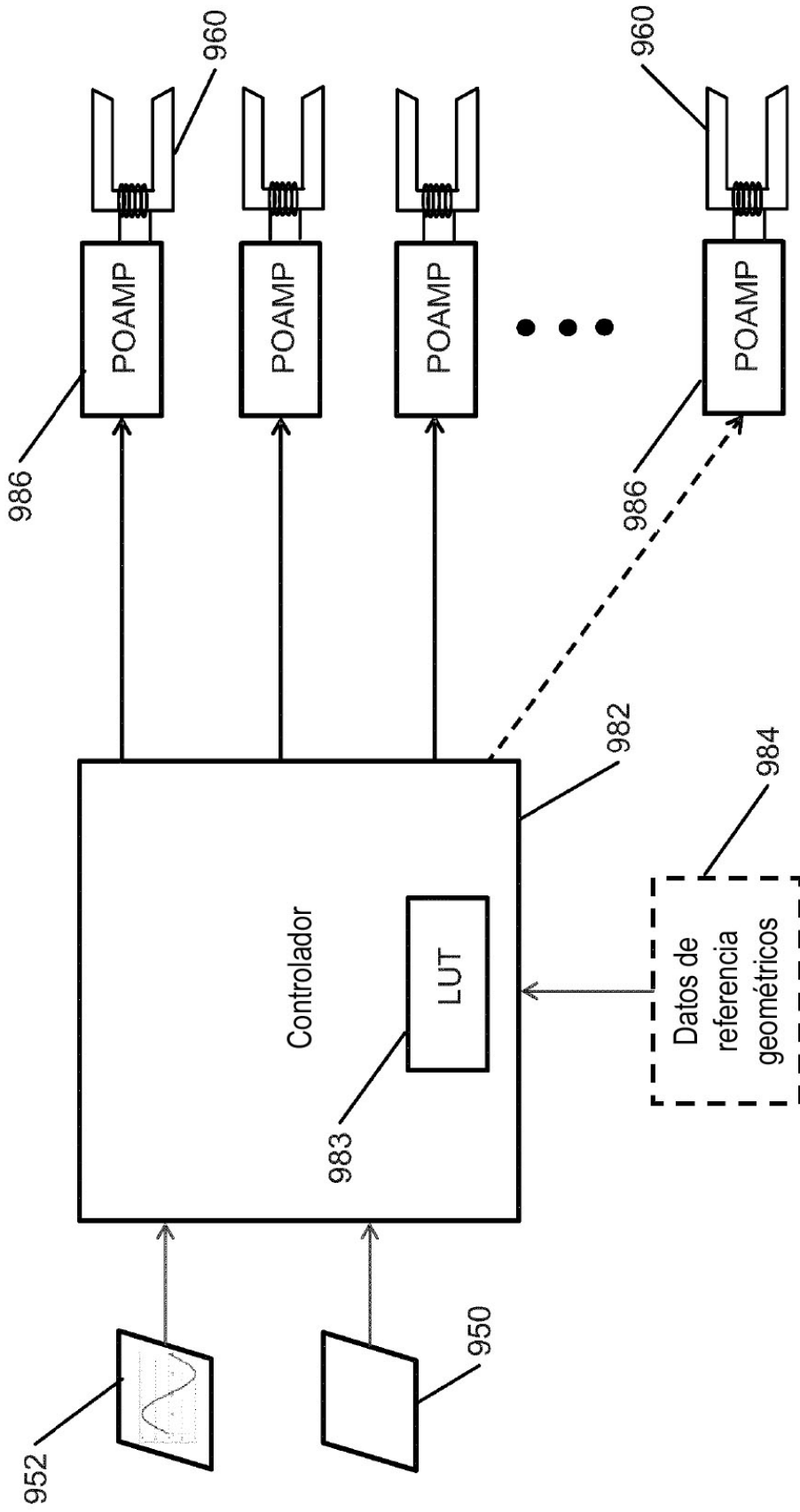


Fig 13D

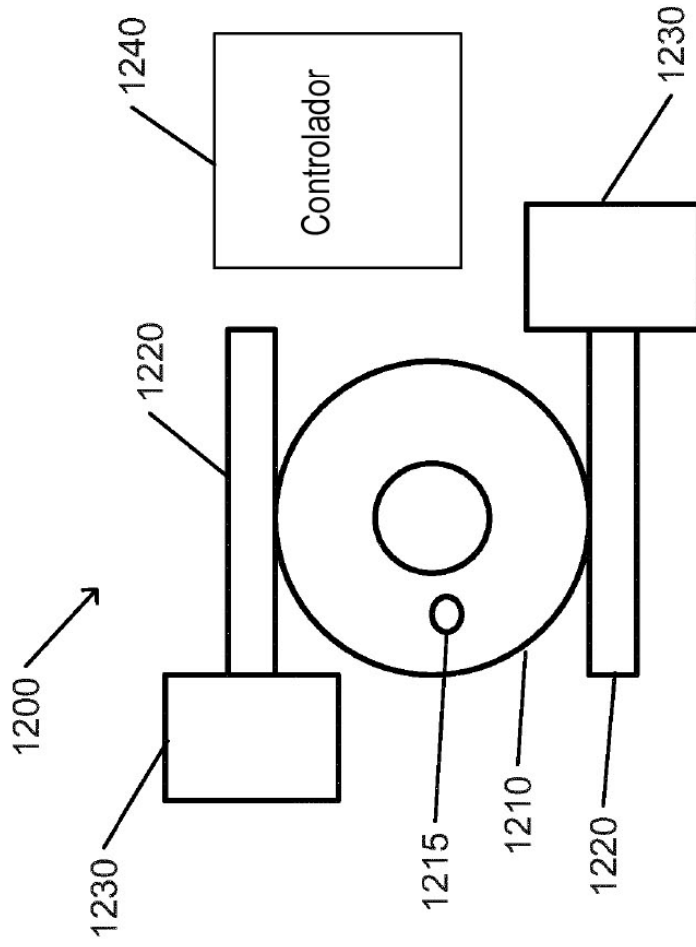


Fig. 14A

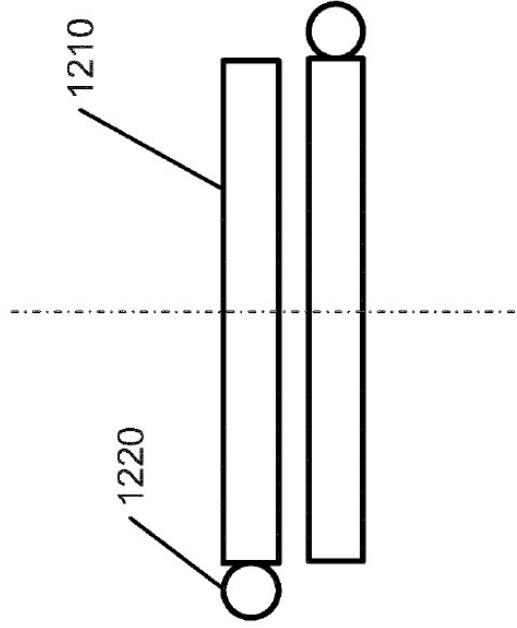


Fig. 14B

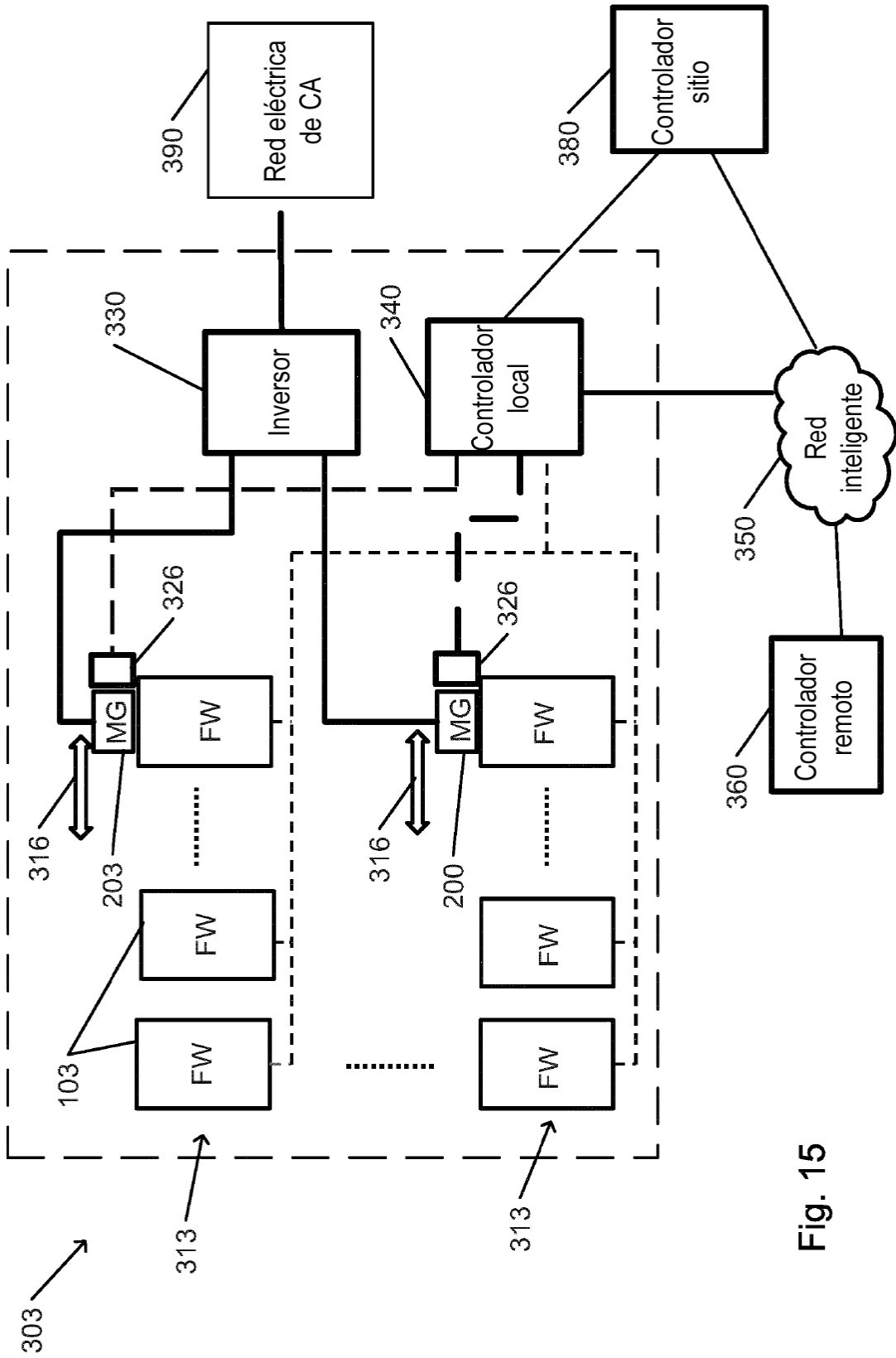


Fig. 15

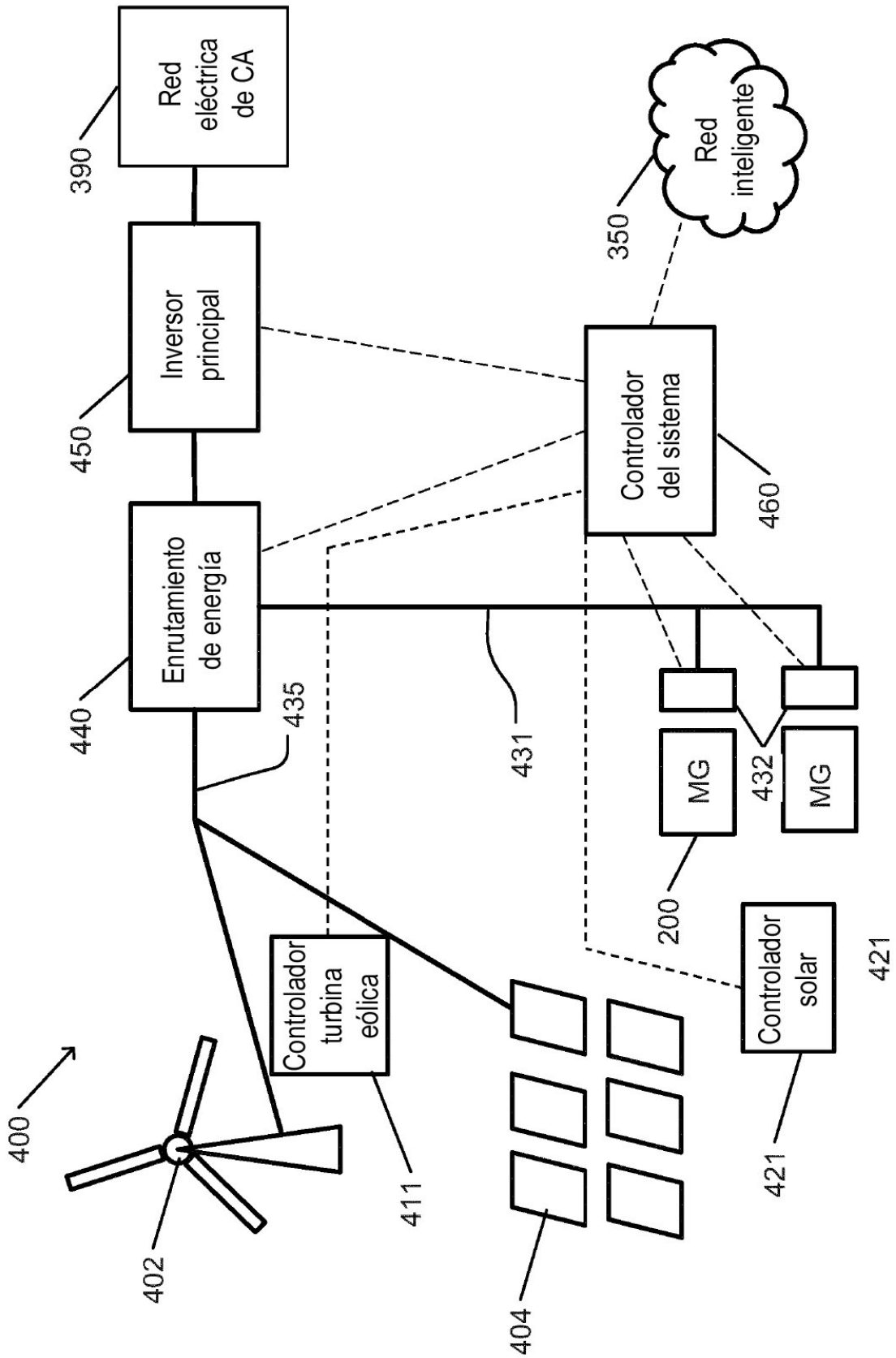


Fig. 16

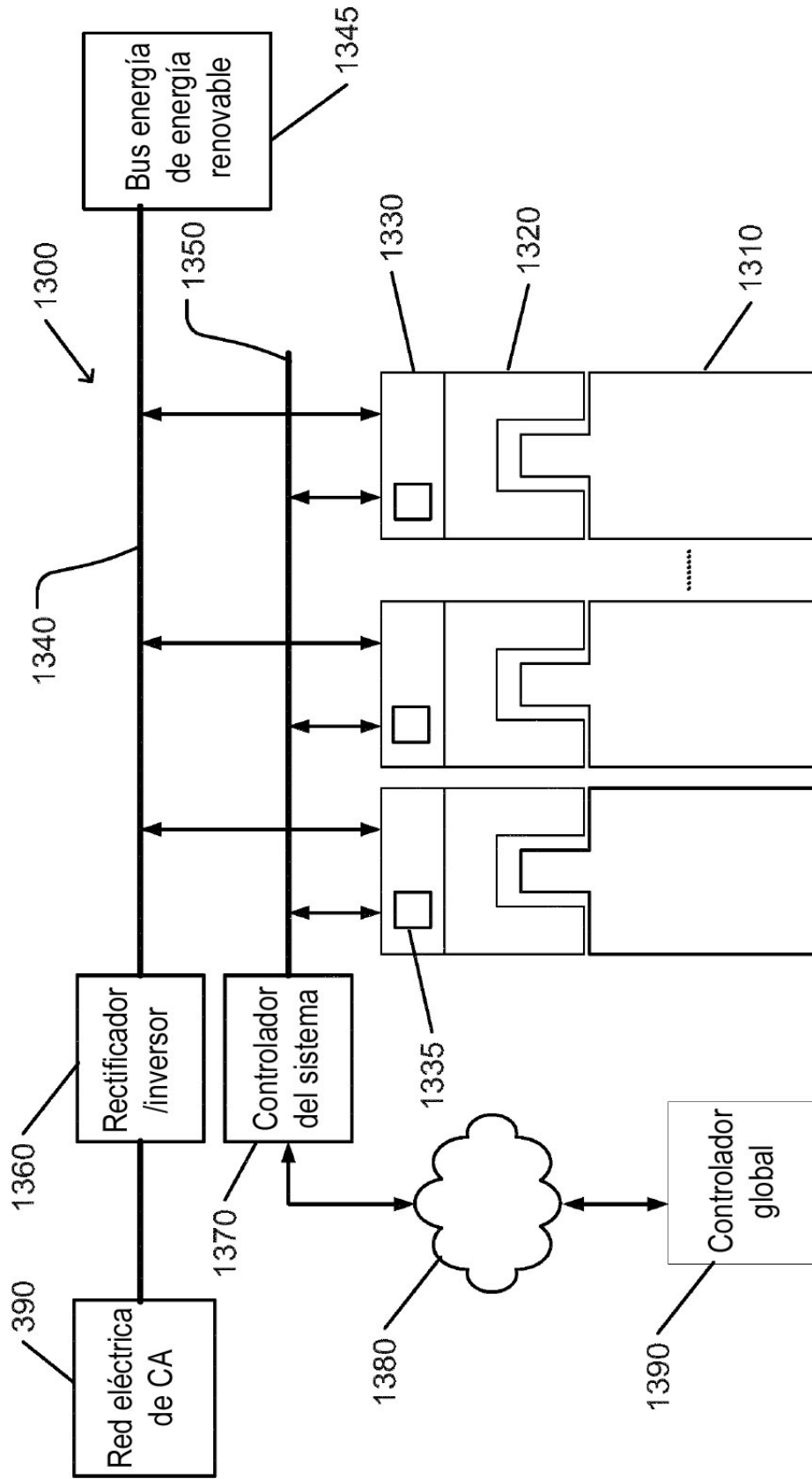


Fig. 17