

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 762 163**

51 Int. Cl.:

H02K 7/02 (2006.01)

F16F 15/305 (2006.01)

H02K 7/09 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.04.2013 E 13162226 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2019 EP 2648319**

54 Título: **Construcción de volante de inercia de núcleo abierto**

30 Prioridad:

03.04.2012 US 201213438129

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

22.05.2020

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**HULL, JOHN R.;
STRASIK, MICHAEL y
MITTLEIDER, JOHN A.**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 762 163 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

Construcción de volante de inercia de núcleo abierto

Campo tecnológico

5 La presente divulgación se refiere a dispositivos de almacenamiento de energía del volante de inercia y, más particularmente, a dispositivos de almacenamiento del volante de inercia sin centro o de núcleo abierto que tienen estabilidad y rendimiento mejorados.

Antecedentes

10 Los dispositivos y sistemas de almacenamiento de energía del volante de inercia son conocidos por almacenar energía y liberar la energía almacenada bajo demanda. Los conjuntos de volante de inercia conocidos tienen un diseño de rotor tradicional, a veces fabricado con compuestos de fibra de carbono. Dichos rotores tienen un eje en el que se montan el motor/generador (M/G) y los imanes permanentes (PM) de los cojinetes. El eje está convencionalmente conectado al reborde a través de un cubo. El diseño del volante de inercia del eje y el cubo es limitado en términos de su velocidad de extremo superior alcanzable. La coincidencia de materiales utilizables para componentes en el conjunto del volante de inercia ha sido problemática puesto que el crecimiento radial de los componentes varía a medida que aumenta la velocidad del rotor. El cubo debe acoplar mecánicamente el eje al borde sin introducir modos de flexión en la estructura del rotor a través del intervalo de frecuencias de operación en el intervalo de velocidad de operación del volante de inercia. Sin embargo, el eje exhibe a menudo un crecimiento radial insignificante, mientras que el reborde exhibe un crecimiento radial significativo. Este desequilibrio en el crecimiento de los componentes durante la operación del volante de inercia restringe el rendimiento del volante de inercia y puede conducir al fallo del sistema del volante de inercia.

El documento US6211589 describe un sistema de volante de inercia para almacenar energía que incluye un compuesto circular o un anillo de vidrio y al menos un radio que se extiende a lo largo de un diámetro del anillo.

Breve sumario

25 La presente divulgación se refiere a una arquitectura de volante de inercia y volante de inercia que elimina el problema de coincidencia de crecimiento del material y evita problemas de crecimiento radial y modo de flexión que, de lo contrario, se producen a varias frecuencias y velocidades. Más específicamente, se desvela en el presente documento conjuntos de volante de inercia que tienen una arquitectura de "núcleo abierto" (sin centro) en lugar de una arquitectura de eje y cubo.

30 La presente divulgación se refiere a un nuevo sistema de almacenamiento de energía de volante de inercia de núcleo abierto que obtendrá alta energía, alta densidad de potencia y eficacia, mientras que tiene un perfil de tamaño significativamente reducido. Los sistemas de almacenamiento del volante de inercia de la presente divulgación comprenden cojinetes y rotores superconductores de alta temperatura (HTS) que comprenden materiales de alta resistencia. Los materiales de alta resistencia preferidos incluyen, pero sin limitación, materiales que contienen fibra de carbono, materiales que contienen fibra de vidrio, materiales que contienen metal, etc. y combinaciones de los mismos.

Las propiedades deseadas inherentes a los rotores fabricados de la presente divulgación dan como resultado un rendimiento significativamente mejorado del volante de inercia en términos de una velocidad significativamente mayor, mayor almacenamiento/generación de energía y mayor durabilidad del sistema.

40 De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un conjunto de volante de inercia para almacenar y liberar energía que comprende un conjunto de rotor hueco sustancialmente cilíndrico que tiene un rotor que tiene una superficie interior y exterior. El rotor comprende un material que tiene preferentemente una resistencia a la tracción preferida de aproximadamente 2 GPa a aproximadamente 20 GPa. Un conjunto de estátor se coloca muy cerca del conjunto de rotor con al menos un imán del rotor flexible fijado a la superficie interna del rotor y al menos un imán de estátor fijado al estátor. El imán del rotor flexible comprende preferentemente polvo de FeBNd. Los imanes del estátor tienen un valor de fuerza de atracción en reposo y están dimensionados a una anchura predeterminada para mantener sustancialmente el valor de fuerza de atracción con el rotor cuando el rotor está operando a velocidades circunferenciales de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s. Los imanes del rotor y los imanes del estátor se colocan uno con respecto al otro para facilitar la levitación del rotor durante la operación. El rotor alcanza preferentemente una velocidad en su radio exterior de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s durante la operación.

El conjunto comprende una arquitectura de volante de inercia sin centro de núcleo abierto.

Ventajosamente, el rotor alcanza una velocidad de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s durante la operación.

5 Ventajosamente, el rotor se fabrica de un material seleccionado del grupo que consiste en material que contiene fibra de carbono, material que contiene fibra de vidrio, material que contiene metal y combinaciones de los mismos. Preferentemente, el material comprende una matriz de materiales seleccionados del grupo que consiste en: grafito, vidrio E, vidrio S, sílice, aluminio, titanio, acero y combinaciones de los mismos.

Ventajosamente, el rotor comprende un material que contiene nanotubos de carbono. Preferentemente, el material que contiene nanotubos de carbono comprende un material que contiene nanotubos de carbono de pared múltiple.

10 Ventajosamente, el imán del rotor flexible comprende un material que tiene un módulo de Young de aproximadamente 0,01 GPa a aproximadamente 2 GPa.

Ventajosamente, el imán del rotor flexible comprende polvo de FeBNd.

15 De acuerdo con otro aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un método para almacenar energía para su posterior liberación bajo demanda que comprende las etapas de proporcionar un conjunto de rotor hueco sustancialmente cilíndrico que comprende un rotor que tiene una superficie interna y externa. El rotor comprende preferentemente un material que contiene fibra de carbono, fibra de vidrio o metal (o una combinación de los mismos). El material tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 2 GPa a aproximadamente 20 GPa. Se proporciona un conjunto de estátor y se coloca en estrecha proximidad con el conjunto de rotor, preferentemente en una arquitectura de núcleo abierto. Al menos un imán del rotor flexible se fija a la superficie interna del rotor y el estátor y el rotor se colocan uno respecto al otro para facilitar la levitación del rotor durante la operación. Preferentemente, el rotor alcanza una velocidad circunferencial en su radio exterior de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s durante la operación. Preferentemente, el material comprende material que contiene fibra de carbono, fibra de vidrio o metal y comprende preferentemente una matriz de materiales seleccionados del grupo que consiste en grafito, vidrio E, vidrio S, sílice, aluminio, titanio, acero y combinaciones de los mismos. Un material particularmente preferido es un material que contiene nanotubos de carbono, y es preferentemente un material que contiene nanotubos de carbono de pared simple.

20

25

En las variaciones preferidas, los conjuntos de volante de inercia tienen una utilidad particular como fuente de energía sostenible para su uso en aplicaciones estacionarias y aplicaciones móviles como, por ejemplo, vehículos tripulados y no tripulados, incluidos aviones, naves espaciales y vehículos terrestres y subterráneos y terrestres, etc.

Breve descripción del uno o más dibujos

30 Habiendo descrito así las variaciones de la divulgación en términos generales, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos, que no están necesariamente dibujados a escala, y en los que:

- la Figura 1(a) es una vista en sección transversal de un conjunto de volante de inercia de eje y cubo de la técnica anterior;
- la Figura 1(b) es una vista en sección transversal de un conjunto de volante de inercia de núcleo abierto;
- 35 la Figura 2 es una vista parcialmente en despiece de un cojinete superconductor de alta temperatura;
- la Figura 3 es una cuadrícula que muestra la magnetización direccional de una matriz de Halbach de orden bajo;
- la Figura 4 es un gráfico que muestra el campo magnético radial sobre la longitud circunferencial de paso del polo completa;
- 40 la Figura 5 es un gráfico que compara las tasas de giro y las tensiones de los volantes de inercia de núcleo abierto y de eje y cubo;
- la Figura 6 es una vista en sección transversal en primer plano de un conjunto de volante de inercia alternativo mostrado en la Figura 1(b);
- la Figura 7 es una vista en sección transversal en primer plano del conjunto de volante de inercia mostrado en la Figura 1(b);
- 45 las Figuras 8(a) -8(e) y 9(a) y 9(b) son vistas transversales en primer plano de diversas configuraciones de cojinetes y magnetizaciones.
- la Figura 10 es una vista en corte de una variación de la presente divulgación que muestra una superficie interna de un rotor que muestra los PM con dirección de magnetización; y
- 50 la Figura 11 es una vista en corte de una variación de la presente divulgación que muestra una superficie interna de un rotor que muestra los PM y un conductor de cobre;

Descripción detallada

De acuerdo con la presente divulgación, hay varias tecnologías clave que se incorporan en la arquitectura del volante de inercia de núcleo abierto para lograr la alta densidad de energía deseada en los dispositivos de almacenamiento

de energía del volante de inercia para obtener resultados y rendimiento superiores. Dichos avances incluyen la incorporación de rotores fabricados con materiales de alta resistencia, y la incorporación de un rotor en una arquitectura de volante de inercia de núcleo abierto (sin centro) con una tecnología de cojinetes superconductores de alta temperatura (HTS).

5 Los nanotubos de carbono (CNT) son alótropos de carbono con una nanoestructura cilíndrica. Los nanotubos se han construido con una relación longitud-diámetro de hasta 132.000.000: 1, significativamente más grande que para cualquier otro material. Estas moléculas de carbono cilíndricas tienen propiedades inusuales que son valiosas para la nanotecnología, la electrónica, la óptica y otros campos de la ciencia y tecnología de materiales. Debido a su conductividad térmica y propiedades mecánicas y eléctricas, los nanotubos de carbono encuentran aplicaciones como
10 aditivos para diversos materiales estructurales. Los nanotubos se clasifican como nanotubos de pared simple (SWNT) y nanotubos de pared múltiple (MWNT). Los nanotubos individuales se alinean naturalmente en "cuerdas" unidas por las fuerzas de Van Der Waals, más específicamente, apilamiento de pi.

15 Los CNT se encuentran entre los materiales más fuertes y rígidos descubiertos hasta ahora en términos de resistencia a la tracción y módulo elástico. Esta fuerza resulta de los enlaces sp^2 covalentes formados entre los átomos de carbono individuales. Se ha probado que los MWCNT tenían una resistencia a la tracción de aproximadamente 63 gigapascales (GPa). Por ejemplo, esto se traduce en la capacidad de soportar tensiones de un peso equivalente a 6422 kg en un cable con una sección transversal de 1 mm². Los depósitos individuales de CNT tienen una resistencia de hasta aproximadamente 100 GPa. Puesto que los CNT tienen una baja densidad para un sólido de aproximadamente 1,3 a
20 aproximadamente 1,4 g/cm³, su resistencia específica de hasta aproximadamente 48.000 kNmkg⁻¹ es el mejor de los materiales conocidos, en comparación con, por ejemplo, el acero al carbono de alta resistencia que tiene una resistencia específica de aproximadamente 154 kNmkg⁻¹.

Aunque la resistencia de los depósitos individuales de CNT es extremadamente alta, las interacciones débiles de corte entre los depósitos y tubos adyacentes conducen a reducciones significativas en la resistencia efectiva de los
25 nanotubos de carbono de pared múltiple y los haces de nanotubos de carbono a solo unos pocos GPa. Sin embargo, la aplicación de irradiación de electrones de alta energía, que retícula los depósitos y tubos internos, aumenta efectivamente la resistencia de estos materiales a aproximadamente 60 GPa para nanotubos de carbono de pared múltiple y aproximadamente 17 GPa para haces de nanotubos de carbono de pared doble.

30 Los nanotubos de carbono estándar de pared simple (SWCNT) pueden soportar una presión de hasta aproximadamente 24GPa sin deformación. Después se someten a una transformación en nanotubos de fase súper-dura. Las presiones máximas medidas con las técnicas experimentales actuales son de aproximadamente 55 GPa. Sin embargo, estos nuevos nanotubos de fase súper-dura colapsan a una presión aún mayor, aunque desconocida.

35 Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) son nanotubos concéntricos múltiples anidados con precisión uno dentro del otro. Estos CNT exhiben una sorprendente propiedad telescópica por la cual un núcleo interno de nanotubos puede deslizarse, casi sin fricción, dentro de su capa exterior de nanotubos, creando así un cojinete lineal o giratorio atómicamente perfecto.

De acuerdo con la presente divulgación, los CNT se usan directamente en la fabricación de los rotores compuestos. Se cree que los hilos de MWCNT que tienen una densidad de aproximadamente 0,2 gm/cm³ producen una resistencia de material mínima conservadora de al menos aproximadamente 45 GPa, para estructuras compuestas sin torsión.

40 Los CNT preferidos para usar en la fabricación de los nuevos rotores de la presente divulgación tienen preferentemente un espesor de pared de aproximadamente 0,075 nm y un espesor de pared efectivo de aproximadamente 0,34 nm con una resistencia física de pared de aproximadamente 150 a aproximadamente 260 GPa. Esto proporciona un material preferido que tiene fracciones de volumen de hasta aproximadamente el 65 % de MWCNT de 30 nm de diámetro con matrices metálicas, vítreas y/o poliméricas. Se cree que inducir defectos en los MWCNT mejora la resistencia entre paredes para mejorar la transferencia de carga mecánica entre los hilos de MWCNT a las "paredes"
45 de los hilos internos en un factor de aproximadamente 2.

Los CNT preferidos utilizados en la presente divulgación se formulan específicamente controlando el grado de orientación y la fracción de volumen en una matriz para proporcionar el material compuesto terminado y las propiedades físicas deseadas del producto (como, por ejemplo, resistencias a la tracción del rotor más altas) que las que se conocen actualmente.

50 Además, los imanes de tipo cerámico se han utilizado en conjuntos de volante de inercia que no han sido prácticos a velocidades de giro más altas (velocidades circunferenciales) debido a sus características inherentes que incluyen, entre otras, su fragilidad, por ejemplo. Por lo tanto, a medida que aumenta la velocidad del volante de inercia giratorio, se necesitan varios tipos de imanes. Los imanes cerámicos conocidos generalmente están limitados a velocidades circunferenciales de menos de aproximadamente 300 m/s. La presente divulgación contempla la incorporación de imanes flexibles que tienen propiedades deseables, incluida su capacidad de expandirse a medida que el propio
55

material del rotor se expande en funcionamiento a velocidades muy altas. Los imanes flexibles preferidos comprenden polvo de FeBNd.

Algunas variaciones de la presente divulgación se describirán a continuación más completamente a continuación con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran algunas, pero no todas las variaciones de la divulgación. De hecho, la presente divulgación de la invención puede realizarse de muchas formas diferentes y no deberá interpretarse que esta está limitada a las variaciones que se presentan en este documento. En cambio, estas variaciones ilustrativas se proporcionan para que esta divulgación sea exhaustiva y completa, y transmitirá completamente el alcance de la divulgación a los expertos en la materia. Por ejemplo, a menos que se indique lo contrario, hacer referencia a algo como primer, segundo o similar no debe interpretarse como un orden particular. Además, algo puede describirse como "por encima" de otra cosa y, a menos que se indique lo contrario, puede estar "debajo" y viceversa. Del mismo modo, algo descrito como estando a la izquierda de otra cosa puede estar a la derecha y viceversa. Los números de referencia iguales se refieren a elementos similares en todas partes.

La Figura 1(a) muestra una vista en sección transversal de un conjunto tradicional de volante de inercia de eje y cubo que muestra un rendimiento limitado a, por ejemplo, varias frecuencias y velocidades más altas. Un rotor de reborde de material compuesto de fibra 12 está unido al cubo 14 que, a su vez, está unido al eje 16. Los imanes permanentes (PM) sinterizados 15 y 18 ejercen fuerzas de atracción y de repulsión sobre un PM elevador 20 y un superconductor de alta temperatura 22 que están unidos al eje 16. El PM 20 se muestra adjunto al soporte 17. Se muestra una bobina 24 del estátor del motor/generador (M/G) suspendida entre el PM 26 del M/G y el soporte 17.

La Figura 1(b) muestra una vista en sección transversal de una arquitectura de volante de inercia 30 realizada de acuerdo con la presente divulgación. En esta arquitectura de volante de inercia de núcleo abierto "sin centro" (con una línea discontinua indicando una línea central), los imanes permanentes (PM) elásticos 34, 36 y 38 se muestran fijados a un rotor de reborde de material compuesto de fibra 32. El PM 48 del estátor de cojinete de elevación PM y la bobina 42 del estátor del motor/generador (M/G) están unidos a la estructura de soporte 43. El superconductor de alta temperatura (HTS) 45 está colocado cerca del soporte 46. Los PM 48 y 34 comprenden el cojinete de elevación, y los elementos 45 y 38 comprenden el cojinete de estabilidad.

La arquitectura de núcleo abierto de la presente divulgación presenta un diseño novedoso que permite que el reborde de fibra compuesta y el cojinete del HTS consigan el máximo rendimiento sin las limitaciones de diseño de las disparidades de crecimiento radial de los componentes inherentes al diseño del volante de inercia del eje y del cubo. Se entiende que todo el volante de inercia 30 de núcleo abierto en su orientación vertical mostrada, está contenido dentro de una cámara de vacío (no mostrada). En una orientación vertical preferida, el rotor en forma de anillo 32 está suspendido preferentemente por un cojinete magnético pasivamente estable que comprende un PM 48 y 34 del cojinete de elevación en un extremo o "parte superior" y un cojinete de estabilidad 45 y 38 del HTS en un segundo extremo, o "parte inferior". Preferentemente, un motor/generador 36 y 42 del PM sin escobillas suministra energía dentro y fuera del rotor. Como se muestra en la Figura 1(b), los PM 34, 36 y 38 del rotor se sitúan a lo largo de la superficie interna 33 del rotor 32. De acuerdo con la presente divulgación, estos PM deben ser lo suficientemente flexibles para acomodar el crecimiento radial o "expansión dimensional" del volante de inercia sin romperse o comprometer la integridad estructural o el rendimiento. Como tal, los PM tienen deseablemente un módulo de Young relativamente bajo en el intervalo de aproximadamente 0,01 MPa a aproximadamente 2 MPa. Un ejemplo de materiales para estos imanes incluye aquellos que comprenden polvo de FeBNd disperso en caucho. El cabezal frío de un crioenfriador pequeño (no mostrado) conduce térmicamente al cojinete de estabilidad 45 del HTS a mantener una temperatura deseada de aproximadamente -243,15 °C (30 K) a aproximadamente -183,15 °C (90 K), y preferentemente de aproximadamente -213,15 °C (60 K). Una pequeña bomba turbomolecular o recogedora de sublimación (no mostrada) mantiene el vacío dentro de la cámara.

El uso del cojinete del HTS es importante para la presente divulgación y permite que el rotor del volante de inercia gire a alta velocidad y aproveche los beneficios de la arquitectura de núcleo abierto. El cojinete del HTS permanece pasivamente estable siempre que la temperatura de los componentes del HTS permanezca por debajo de -193,15 °C (80 K). La capacidad de calor del HTS combinada con una baja fuga de calor en el HTS da como resultado la capacidad de mantener una temperatura suficientemente baja para mantener la estabilidad y operar los cojinetes.

En los cojinetes del HTS conocidos anteriormente, los elementos del HTS se bañaban en nitrógeno líquido. Los cojinetes del HTS avanzados no requieren un criógeno líquido. La Figura 2 muestra esquemáticamente la parte de HTS del sistema 60 de acuerdo con la presente divulgación, que incluye el enfriamiento criogénico. El crioenfriador 64 comprende el cabezal frío 66. El cabezal frío 66 se conecta a cables 68 que pueden ser flexibles, y que preferentemente actúan como conductores térmicos a temperatura criogénica. Los cables comprenden preferentemente cobre, aleaciones de cobre, aluminio, aleaciones de aluminio y combinaciones de los mismos, etc. Los cables 68 se conectan a una placa 70 preferentemente conductora, térmicamente plana, por medio de una orejeta conductora 72. El elemento de HTS 62 descansa sobre la placa térmicamente conductora 70. La placa térmicamente conductora 70 descansa preferentemente sobre y se soporta por una placa no conductora térmicamente 74. Las orejetas 72 penetran preferentemente la placa no conductora térmicamente 74 a través de las aberturas en la placa 74 en uno o más lugares, y preferentemente no entran en contacto con la placa 74. La placa 74 está conectada

mecánicamente por un soporte no conductor térmicamente 76 que se conecta al soporte a tierra 78. La porción criogénica del sistema puede estar cubierta por una o más láminas de película (no mostradas) que tienen una baja emisividad para reducir la entrada de calor al sistema por medio de radiación.

Esta configuración es similar al componente del estátor de un cojinete de estabilidad superconductor utilizado en un conjunto de volante de inercia de 5 kWh y 3 kWh como se informa en Materiales Ciencia e Ingeniería B 151 (2008) 195-198 M Strasik, J.R. Hull, P.E. Johnson, J. Mittleider, K.E. McCrary, C.R. McIver, A.C. Rendimiento Diario de un Cojinete Superconductor de Alta Temperatura de Conducción Refrigerada. Como lo indican los valores experimentales de pérdida de carga, la presencia del bus térmico de cobre debajo de los elementos de HTS no aumentó significativamente la pérdida de carga. El espacio es la distancia entre la parte inferior del imán del rotor del volante de inercia y la parte superior de los cristales del HTS. Se prefiere un espacio de aproximadamente 2 mm a aproximadamente 4 mm para el cojinete del HTS. La pérdida en giro en un cojinete del HTS es proporcional a $(\Delta B)^3/J_c$, donde ΔB es la falta de homogeneidad del campo magnético del componente de PM medida en la dirección de giro, y J_c es la densidad de corriente crítica en el HTS.

De acuerdo con otras variaciones de la presente divulgación, para que el cojinete del HTS funcione de forma óptima, la parte del estátor del cojinete debe mantenerse preferentemente a temperaturas criogénicas inferiores a aproximadamente $-193,15\text{ }^\circ\text{C}$ (80 K), y más preferentemente de aproximadamente $-243,15\text{ }^\circ\text{C}$ (30 K) a aproximadamente $-193,15\text{ }^\circ\text{C}$ (80 K). Esto se logra mediante el establecimiento de una conexión mecánica flexible con alta conductancia térmica entre la base de soporte para el HTS a granel y el cabezal frío de un criofriador. Un criofriador preferido contemplado para su inclusión en los sistemas de volante de inercia preferidos de la presente divulgación es el Sunpower Cryotel TM (SunPower Inc., Athens, OH). El criofriador preferido es una máquina lineal de ciclo Stirling de pistón libre que utiliza cojinetes de aire y no tiene modos de fallo basados en fricción, y tiene la capacidad de proporcionar hasta aproximadamente 15 W de enfriamiento a aproximadamente $-196,15\text{ }^\circ\text{C}$ (77 K). Además, el criofriador preferido tiene la capacidad de regular la potencia de entrada cuando se requiere menos enfriamiento, y debe proporcionar enfriamiento al cojinete del HTS para tamaños de volante de inercia de hasta 100 kWh.

De acuerdo con la presente divulgación, el M/G funciona como un diseño sin escobillas de espacio radial convencional en el que en modo motor las corrientes pasan a través de las bobinas del estátor de forma temporizada para interactuar con el campo magnético de los PM del rotor para producir par. En el modo generador, el flujo magnético de los PM giratorios recorre las bobinas del estátor y produce tensión de acuerdo con la ley de Faraday. A bajas velocidades, un sensor de efecto Hall mide el campo magnético de los M/G PM para controlar el tiempo de las corrientes del estátor. A altas velocidades, el campo electromagnético posterior en las bobinas proporciona la entrada para este control. En un M/G de espacio radial convencional, la bobina del estátor se ubica normalmente radialmente hacia afuera de los PM. Sin embargo, de acuerdo con las variaciones preferidas de la presente divulgación, en el diseño preferido de núcleo abierto, las ubicaciones se invierten, con las bobinas del estátor ubicadas radialmente hacia adentro de los PM, como se muestra en la Figura 1(b).

De acuerdo con la presente divulgación, los PM del M/G de núcleo abierto están magnetizados en una matriz Halbach de orden bajo, como se muestra en la Figura 3. La magnetización de una matriz de Halbach de orden bajo sobre una longitud de un solo polo de 8 grados se muestra en la dirección circunferencial (x). El valor "z" representa las direcciones vertical e "y" las direcciones radiales. La delgadez de la carcasa del imán unido dicta que la longitud del polo circunferencial no puede ser demasiado grande sin limitar severamente el flujo disponible y distorsionar la forma de onda sinusoidal deseada en el núcleo del estátor. La longitud del polo es preferentemente mayor que aproximadamente 10 veces el espacio entre el radio interno del PM del rotor y el radio externo de la bobina del estátor. Cálculos experimentales para un volante de inercia ejemplar, mostrado en la Figura 4 indican que una máquina de 90 polos, con un espacio de aproximadamente 5 mm entre los PM y el estátor, proporciona suficiente flujo y forma de onda. La Figura 4 muestra un campo magnético radial sobre el paso de polo completo λ a 5 mm radialmente hacia dentro desde los PM mostrados en la Figura 3. La frecuencia eléctrica máxima preferida para tal M/G es de aproximadamente 30 kHz. Un estátor que comprende devanados de alambre Litz sin núcleo ferromagnético es suficiente para proporcionar la potencia de salida requerida sin crear una corriente de Foucault sustancial u otra pérdida parasitaria.

La alta velocidad del rotor y la gran cantidad de polos crean una alta densidad de potencia. Además, para los requisitos de potencia relativamente bajos de los volantes de inercia fabricados de acuerdo con ciertas variaciones de la presente divulgación, el espesor radial de los devanados del estátor es relativamente pequeño, como, por ejemplo, de aproximadamente 1 mm a aproximadamente 10 mm.

Una ventaja significativa de la arquitectura de volante de inercia de núcleo abierto de la presente divulgación es que el crecimiento del rotor con velocidad amplía significativamente el intervalo de velocidad sobre el que la electrónica de potencia puede extraer energía eficazmente del volante de inercia. De acuerdo con las variaciones de la arquitectura de núcleo abierto, la dimensión del rotor crece radialmente a medida que aumenta la velocidad del volante de inercia. Además, a medida que los PM del M/G se alejan de las bobinas del estátor, el flujo magnético a través de la bobina disminuye. Esto da como resultado una tensión que es relativamente constante en el intervalo de velocidad superior

del volante de inercia. Un ejemplo de cálculo para el volante de inercia exterior del diseño se muestra en la Figura 5. El radio del rotor aumenta en aproximadamente 4,2 mm al aumentar la velocidad a aproximadamente 48.500 rpm. La electrónica de potencia estándar puede por lo general eliminar energía del volante de inercia cuando la tensión del generador está entre aproximadamente 0,6 y aproximadamente 1,0 del valor de diseño máximo. Esto limita la energía disponible de un volante de inercia de eje y cubo al 64 % de la energía cinética máxima. Como se ve en la Figura 5, en el diseño de núcleo abierto de variaciones de la presente divulgación, el 60 % de la tensión máxima está disponible para velocidades superiores a aproximadamente 15.000 rpm, y más del 90 % de la energía cinética máxima está disponible para la carga. En el ejemplo mostrado en la Figura 5, la tensión máxima ocurre a aproximadamente 40.000 rpm, y disminuye ligeramente a una velocidad superior a aproximadamente 40.000 rpm.

La Figura 6 muestra un volante de inercia de núcleo abierto 100 concéntrico alrededor de una línea central 102. El volante de inercia comprende el rotor 110 y el estátor 120. El rotor 110 comprende preferentemente un reborde 112 compuesto de fibra, un imán permanente (PM) 114 del soporte de estabilidad superior, un imán permanente PM 116 de estabilidad inferior y una matriz de imán permanente (PM) 118 del motor/generador. El estátor 120 comprende una matriz de HTS 124 del cojinete de estabilidad superior, una matriz de HTS con cojinete de estabilidad inferior 126, un conjunto de bobinas 128 del estátor y soportes mecánicos 134, 136 y 138. El soporte mecánico 134 soporta el HTS 124 del cojinete de estabilidad superior. El soporte mecánico 136 soporta una matriz de HTS 126 del cojinete de estabilidad inferior. El soporte mecánico 138 soporta el conjunto de bobinas 128 del estátor. Los soportes mecánicos 134, 136 y 138 están unidos de forma fija a una cámara de vacío (no mostrada) que rodea el conjunto de volante de inercia 100. Se entiende que, si bien los soportes 134 y 138 se muestran inmediatamente adyacentes entre sí, dichos soportes pueden estar separados a una distancia deseada entre sí. El rotor 110 del volante de inercia se levita magnéticamente a través de los componentes del cojinete magnético, incluido el cojinete de estabilidad superior (que comprende el rotor PM 114 y el HTS 124 del estátor y el cojinete de estabilidad inferior (que comprende el PM 116 del rotor y la matriz de HTS 126 del estátor inferior). La aceleración giratoria del rotor 110 sobre la línea central 102 se logra mediante la interacción electromagnética entre el PM 118 del rotor y la bobina 128 del estátor. El soporte mecánico 136 aísla térmicamente la matriz de HTS 126 del suelo. También hay normalmente una estructura termoconductora (no mostrada) ubicada entre la matriz de HTS 126 y la estructura térmicamente aislante 136 que conecta la matriz de HTS 126 a una fuente fría, por ejemplo, un crioenfriador, etc. como se muestra en la Figura 2. De manera similar, el soporte mecánico 134 aísla térmicamente el HTS 124 del suelo, y normalmente hay una estructura térmicamente conductora (no mostrada) situada entre el HTS 124 y el soporte 134 que conecta el HTS 124 a una fuente fría.

La Figura 7 muestra una variación adicional en la que el volante de inercia de núcleo abierto 150 es concéntrico alrededor de una línea central 152. El volante de inercia comprende el rotor 160 y el estátor 170. El rotor 160 comprende un reborde 162 compuesto de fibra, un PM 164 del cojinete de elevación, un PM de estabilidad 166 y una matriz de PM 168 del motor/generador. El estátor 170 comprende un PM 174 del cojinete de elevación, un conjunto de HTS 176, un conjunto de bobinas 178 del estátor y soportes mecánicos 184, 186 y 188. El soporte mecánico 184 soporta el PM 174 del cojinete de elevación del estátor. El soporte mecánico 186 soporta la matriz de HTS 176. El soporte mecánico 188 soporta el conjunto de bobinas 178 del estátor. Los soportes mecánicos 184, 186 y 188 están unidos de forma fija a una cámara de vacío (no mostrada) que preferentemente rodea el conjunto de volante de inercia 150. El rotor 160 del volante de inercia se levita magnéticamente a través de los componentes del cojinete magnético, incluido el cojinete de elevación (que comprende el PM 164 del rotor y el PM 174 del estátor), y el cojinete de estabilidad (que comprende el PM 166 del rotor y el HTS 176 del estátor). La aceleración giratoria del rotor 160 sobre la línea central 152 se logra mediante la interacción electromagnética entre el PM 168 del rotor y la bobina 178 del estátor. El soporte mecánico 186 aísla térmicamente la matriz de HTS 176 del suelo. También hay normalmente una estructura termoconductora (no mostrada) situada entre el conjunto de cojinete 176 del HTS y la estructura térmicamente aislante 186 que conecta el HTS 176 a una fuente fría, como, por ejemplo, un crioenfriador, etc., como se muestra en la Figura 2.

Se contemplan diversas configuraciones considerando el cojinete de elevación en los nuevos conjuntos de volante de inercia de núcleo abierto. La Figura 8 se refiere a una variación que muestra una porción superior del conjunto del volante de inercia. El PM 204 está unido a la parte superior del reborde de material compuesto 202. El estátor PM 206 está ubicado verticalmente sobre el PM 204, y está unido al soporte mecánico 208. Las flechas negras en la Figura 8(a) designan la dirección preferida de magnetización. En este ejemplo, hay una fuerza de atracción hacia arriba en el PM 204 que ayuda a elevar el rotor 202 contra la fuerza de la gravedad. El PM 206 del estátor es lo suficientemente ancho como para que la fuerza de atracción sea casi uniforme a medida que el reborde de material compuesto 202 del rotor crece radialmente hacia fuera.

Un cojinete de elevación alternativo se muestra en la Figura 8(b), que muestra un segundo PM 207 del estátor ubicado debajo y radialmente hacia dentro desde el PM 204 del rotor. La fuerza magnética en este caso es repelente, y la ubicación del PM 207 del estátor debajo del PM 204 del rotor proporciona preferentemente una fuerza ascendente adicional sobre el rotor 202. Se entiende que se pueden agregar imanes adicionales para aumentar la fuerza como se indica en la Figura 8(c). En este caso, hay una fuerza de atracción adicional con la fuerza ascendente adicional resultante sobre el rotor 202, entre las interacciones del PM 207 del estátor y el PM 210 del rotor. También hay una fuerza de repulsión adicional, con la fuerza ascendente resultante sobre el rotor, entre las interacciones del PM 210

del rotor y el PM 212 del estátor.

Como se muestra en la Figura 8(d) variaciones adicionales actualmente desveladas contemplan magnetizaciones que no son verticales, por ejemplo, magnetización radial, etc. 8(e) muestra un PM 207 adicional unido al soporte mecánico 209.

5 Además, la presente divulgación contempla orientar la estabilidad en diferentes disposiciones. La Figura 9(a) muestra la magnetización de PM 116 como existiría en la Figura 6. En la Figura 9(b), una alternativa muestra el HTS 306 ubicado radialmente hacia dentro del PM 304 del cojinete de estabilidad. En esta orientación, el PM 304 se magnetiza en la dirección radial. Si bien la Figura 9(b) muestra la dirección de magnetización como radialmente hacia dentro, se entiende que dicha magnetización podría dirigirse radialmente hacia fuera.

10 Además, la Figura 6 muestra una alternativa adicional en la que el cojinete de elevación se reemplaza por un segundo cojinete de estabilidad. El PM 118 del motor/generador mostrado en la Figura 6, y descrito en relación con las Figuras 3-5, muestra magnetizaciones radiales, circunferenciales o una combinación de ambas. La Figura 9 muestra otra variación contemplada dirigida a una disposición en la que el PM del motor/generador tiene magnetizaciones verticales que alternan la dirección alrededor de la circunferencia.

15 En la Figura 10, el rotor 460 de un conjunto de volante de inercia de núcleo abierto comprende preferentemente un reborde de material compuesto de fibra 462, un PM superior 464, un PM inferior 466 y un anillo de PM 468. Se entiende que el rotor 460 es sustancialmente cilíndrico, y se entiende que los PM 464, 466 y 468 se extienden preferentemente alrededor de toda la circunferencia de la superficie interna del reborde 462 del rotor. El PM 468 colocado centralmente se muestra magnetizado de acuerdo con las flechas, con la dirección de magnetización alternando en la dirección
20 vertical hacia arriba o hacia abajo.

La Figura 11 muestra una variación alternativa para un rotor de la presente divulgación. El rotor 510 de un conjunto de volante de inercia de núcleo abierto comprende preferentemente un reborde de material compuesto de fibra 512, un PM superior 514, un PM inferior 516 y un conductor de cobre en forma de escalera 518. Se entiende que el reborde 512 del rotor es sustancialmente cilíndrico, y que se entiende que los PM 514, 516 y 518 se extienden preferentemente
25 alrededor de toda la circunferencia de la superficie interna del reborde 512 del rotor. En esta variación, la función motor/generador se realiza preferentemente con una topología de motor de inducción.

De acuerdo con la presente divulgación, al incorporar en una arquitectura de volante de inercia de núcleo abierto, los materiales del rotor que tienen relaciones de resistencia/densidad significativamente mejoradas, incluidos los MWCNT preferidos, aumentarán las densidades de energía del rotor del volante de inercia de los valores actualmente conocidos
30 de aproximadamente 264 Wh/kg a al menos aproximadamente 473 Wh/kg, y un aumento proporcional de y resistencia a la tracción de la fibra de aproximadamente 11 a aproximadamente 63 GPa (un aumento en la eficacia y resistencia de al menos aproximadamente el 80 % con respecto a los dispositivos conocidos). De hecho, cuando el espesor de la pared de los MWCNT se normaliza a aproximadamente 0,075 nm, se pueden conseguir resistencias teóricas de pared de al menos aproximadamente 300 GPa. Se entiende además que los CNT de pared simple (SWCNT) también están
35 contemplados por la presente divulgación y pueden incorporarse en los componentes del rotor de los conjuntos de volante de inercia de invenciones presentadas en el presente documento, puesto que los SWCNT pueden proporcionar un refuerzo de masa eficaz adecuado o incluso superior. Un SWCNT convencional tiene un diámetro de aproximadamente 1,35 nm. Usando este diámetro con un espacio interatómico de 1 átomo, se pueden obtener Vf de solo el 39 %. Un diámetro de 3 nm produciría Vf del 60%. Se entiende que los CNT óptimos para su uso en relación
40 con las variaciones de la presente divulgación equilibran el diámetro de los CNT, el Vf alcanzable y la eficacia del refuerzo de CNT.

De acuerdo con las variaciones preferidas de la presente divulgación, la mayor parte del rotor del volante de inercia comprende un material compuesto de fibra de filamento enrollado que es levitado magnéticamente por un cojinete del HTS. El cojinete del HTS comprende un rotor del PM y un estátor del HTS. Debido a las propiedades superconductoras
45 del estátor del HTS, la levitación es pasiva y no requiere retroalimentación significativa ni controles activos. El estátor del HTS comprende preferentemente una matriz de cristales de HTS individuales de Y-Ba-Cu-O, u otros materiales donde Y es reemplazado por otros elementos de tierras raras como, por ejemplo, Gd, Nd, Eu, etc., que se enfrían por conducción térmica para el cabezal frío de un crioenfriador a una temperatura de aproximadamente -203,15 °C (70 K) a aproximadamente -193,15 °C (80 K). Preferentemente no se requieren fluidos criogénicos (por ejemplo, nitrógeno líquido, etc.) para la operación del cojinete. El M/G sin escobillas comprende un rotor de PM y un estátor que comprende preferentemente devanados de cobre en un yugo ferromagnético. El enfriamiento del estátor del M/G se realiza por conducción térmica a las paredes de la cámara de vacío. No se requiere energía parasitaria para esta función. Se coloca un revestimiento de contención que absorbe energía entre el volante de inercia giratorio y la carcasa de vacío exterior. Se prefiere mantener el peso de la cámara de vacío y de los componentes estacionarios dentro de
50 la cámara de vacío al mínimo para cumplir con los requisitos de densidad de energía de la matriz del volante de inercia. Otros componentes principales del sistema preferido incluyen un cojinete de elevación, un cojinete de contacto y componentes electrónicos de potencia.

Si bien las variaciones y alternativas preferidas se han ilustrado y descrito, se apreciará que se pueden hacer varios cambios y sustituciones en las mismas sin apartarse del alcance de la divulgación. En consecuencia, el alcance de la divulgación solo debe estar limitado por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un conjunto de volante de inercia (30) para almacenar y liberar energía, que comprende:

un conjunto de rotor hueco sustancialmente cilíndrico que comprende un rotor (32) que tiene una superficie interior y exterior, y comprendiendo dicho rotor un material que tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 2 GPa a aproximadamente 20 GPa, siendo dicho material de rotor capaz de expandirse radialmente hacia fuera a velocidades circunferenciales de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s;
 un conjunto de estátor (42) muy cerca del conjunto de rotor;
 al menos un imán (34, 36, 38) del rotor flexible fijado a la superficie interna (33) del rotor (32); al menos un imán (48) del estátor fijado al estátor, teniendo dichos imanes (48) del estátor un valor de fuerza de atracción en reposo y dimensionados a una anchura predeterminada para mantener sustancialmente el valor de la fuerza de atracción con el rotor (32) cuando el rotor (32) opera a velocidades circunferenciales de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s; y
 un cojinete superconductor de alta temperatura (45);

en el que el imán (34, 36, 38) del rotor y el imán (48) del estátor se sitúan uno con respecto al otro para facilitar la levitación del rotor durante la operación; y en el que el conjunto comprende una arquitectura de volante de inercia sin centro de núcleo abierto.

2. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 1, en el que el rotor (32) está configurado para alcanzar una velocidad de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s durante la operación.

3. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 1, en el que el rotor (32) está fabricado con un material seleccionado del grupo que consiste en material que contiene fibra de carbono, material que contiene fibra de vidrio, material que contiene metal y combinaciones de los mismos.

4. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 3, en el que el material comprende una matriz de materiales seleccionados del grupo que consiste en: grafito, vidrio E, vidrio S, sílice, aluminio, titanio, acero y combinaciones de los mismos.

5. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 1, en el que el rotor (32) comprende un material que contiene nanotubos de carbono.

6. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 1, en el que el imán (34, 36, 38) del rotor flexible comprende un material que tiene un módulo de Young de aproximadamente 0,01 GPa a aproximadamente 2 GPa.

7. El conjunto de volante de inercia de la reivindicación 1, en el que el imán (34, 36, 38) del rotor flexible comprende polvo de FeBNd.

8. Un método para almacenar energía para su posterior liberación bajo demanda que comprende las etapas de:

proporcionar un conjunto de rotor sustancialmente cilíndrico hueco (30) que comprende un rotor (32) que tiene una superficie interna y externa y comprendiendo dicho rotor (32) un material que tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 2 GPa a aproximadamente 20 GPa, siendo dicho material del rotor capaz de expandirse radialmente hacia fuera a velocidades circunferenciales de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s;
 proporcionar un conjunto de estátor (42) muy cerca del conjunto de rotor (30);
 fijar al menos un imán (34, 36, 38) del rotor flexible a la superficie interna del rotor (32); y proporcionar al menos un imán (48) del estátor fijado al estátor, teniendo dicho imán (48) del estátor un valor de fuerza de atracción en reposo y dimensionado a una anchura predeterminada para mantener sustancialmente el valor de fuerza de atracción con el rotor (32) cuando el rotor (32) está operando a velocidades circunferenciales de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s; y
 proporcionar un cojinete superconductor de alta temperatura (45) en contacto con una fuente de enfriamiento;

en el que el imán (34, 36, 38) del rotor y el imán (48) del estátor se sitúan uno con respecto al otro para facilitar la levitación del rotor durante la operación; y en el que el conjunto de rotor (30) y el conjunto de estátor están contenidos en una arquitectura de volante de inercia sin centro de núcleo abierto.

9. El método de la reivindicación 8, en el que el conjunto de rotor alcanza una velocidad de aproximadamente 300 m/s a aproximadamente 3000 m/s durante la operación.

10. El método de la reivindicación 8, en el que el rotor (32) está hecho de un material seleccionado del grupo que consiste en material que contiene fibra de carbono, material que contiene fibra de vidrio, material que contiene metal

y combinaciones de los mismos.

11. El método de la reivindicación 10, en el que el material comprende una matriz de materiales seleccionados del grupo que consiste en: grafito, vidrio E, vidrio S, sílice, aluminio, titanio, acero y combinaciones de los mismos.

5 12. El método de la reivindicación 10, en el que el material que contiene fibra de carbono es un material que contiene nanotubos de carbono.

13. Un vehículo que comprende el sistema de la reivindicación 1.

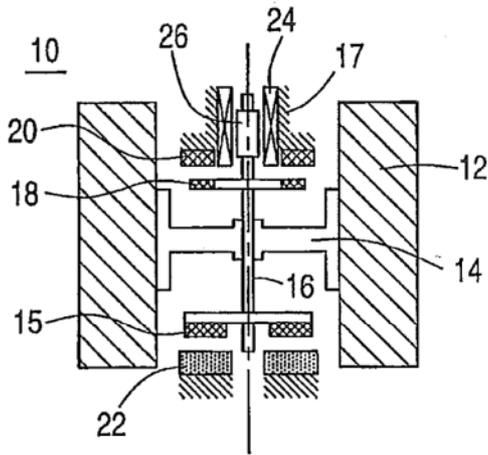


FIG. 1a

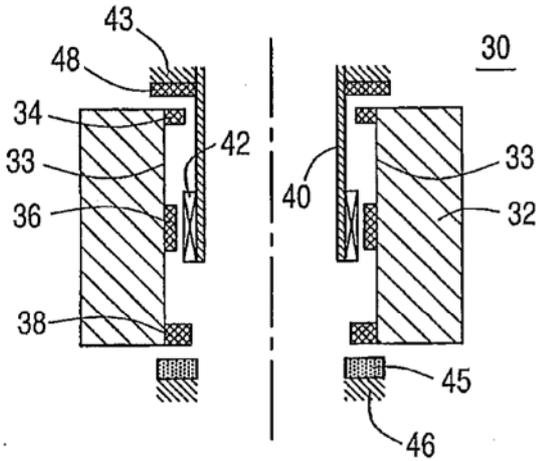


FIG. 1b

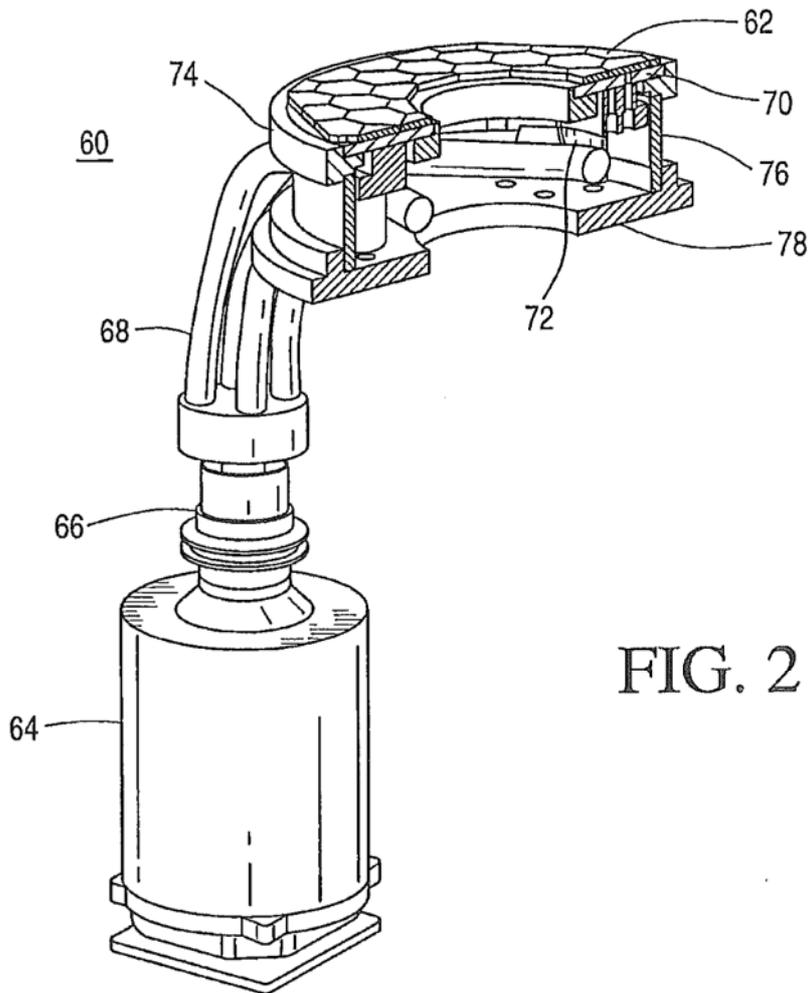


FIG. 2

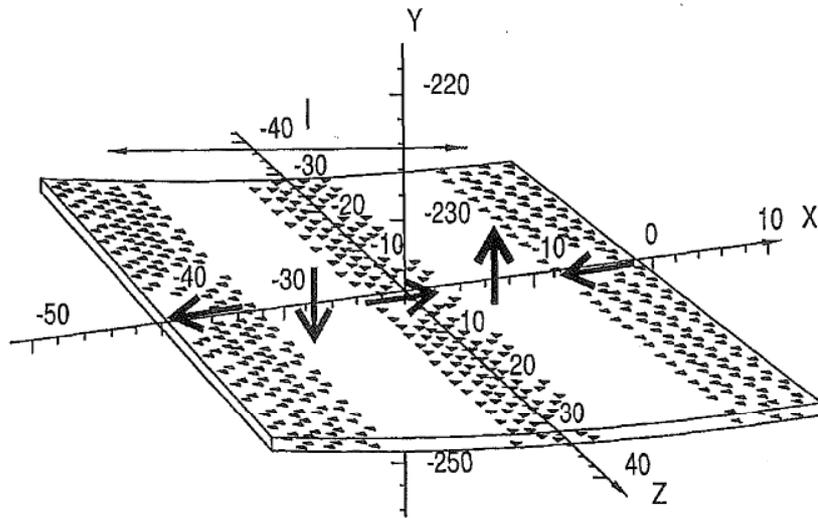


FIG. 3

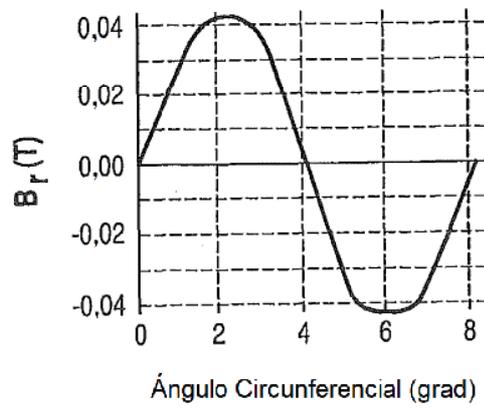


FIG. 4

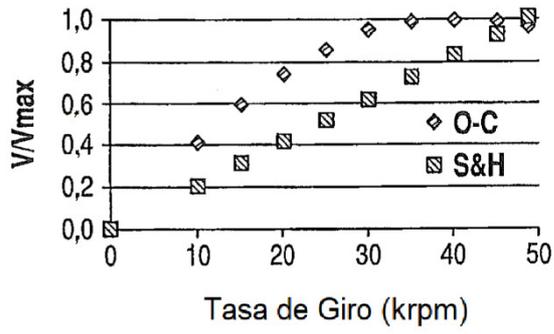


FIG. 5

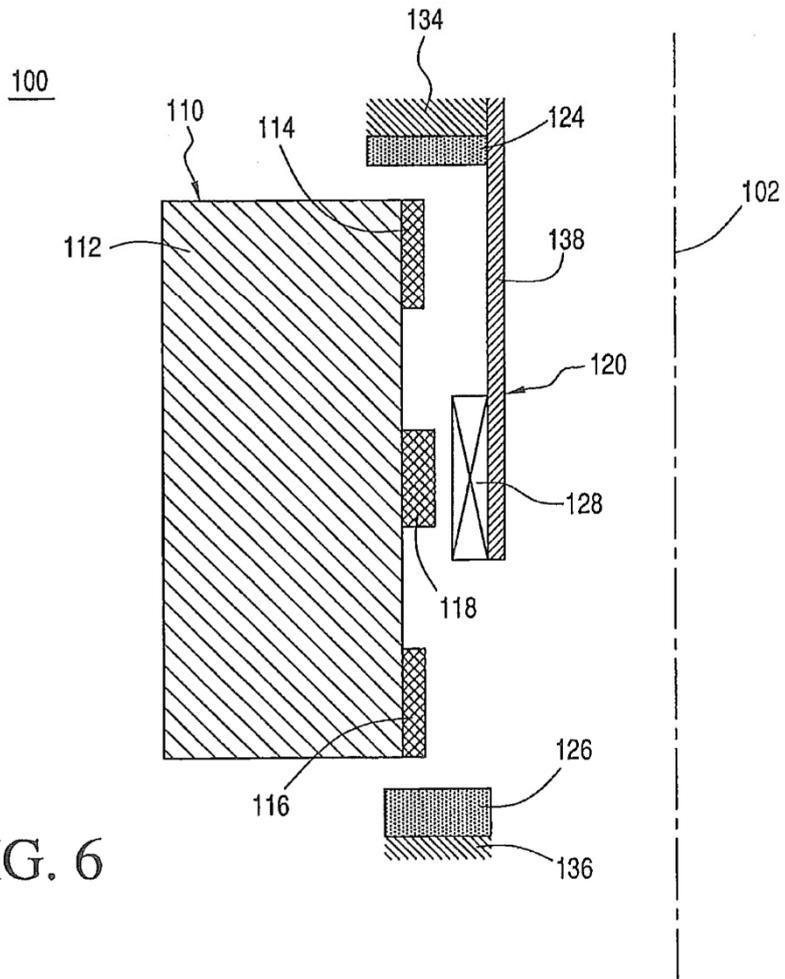


FIG. 6

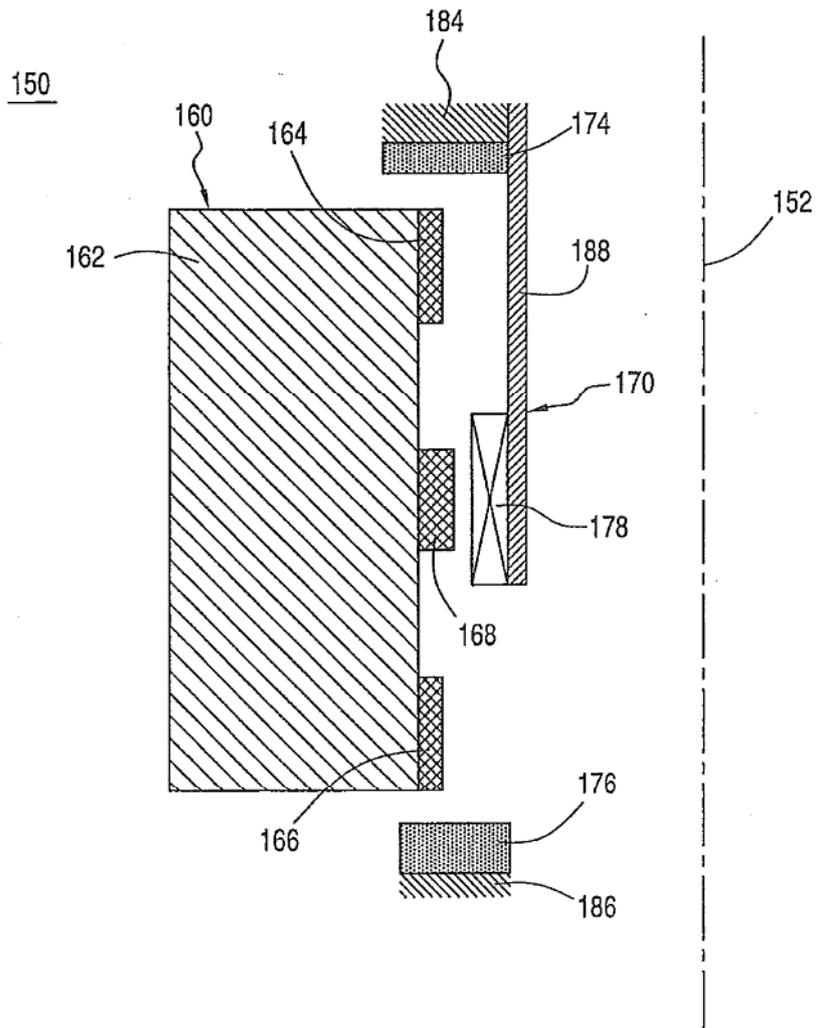


FIG. 7

FIG. 8a

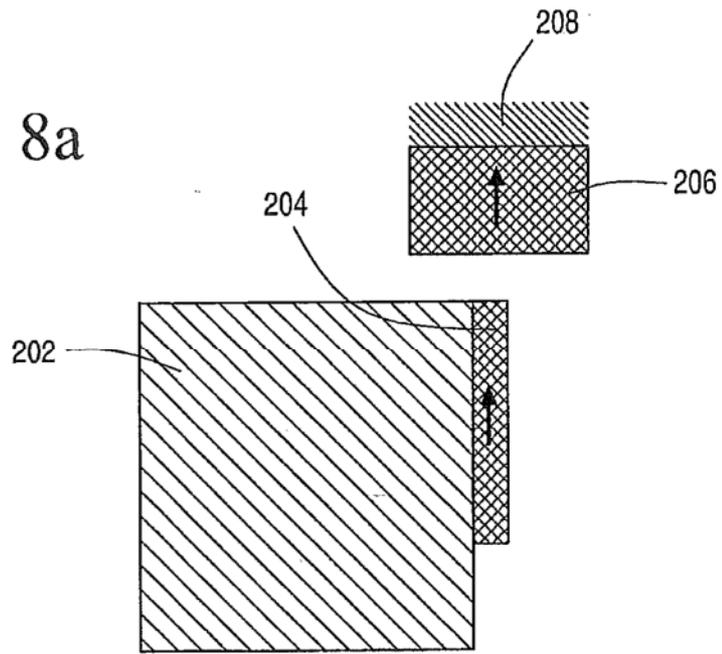


FIG. 8b

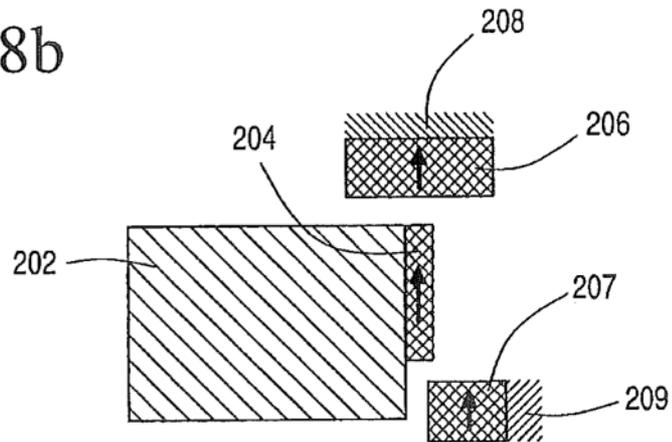


FIG. 8c

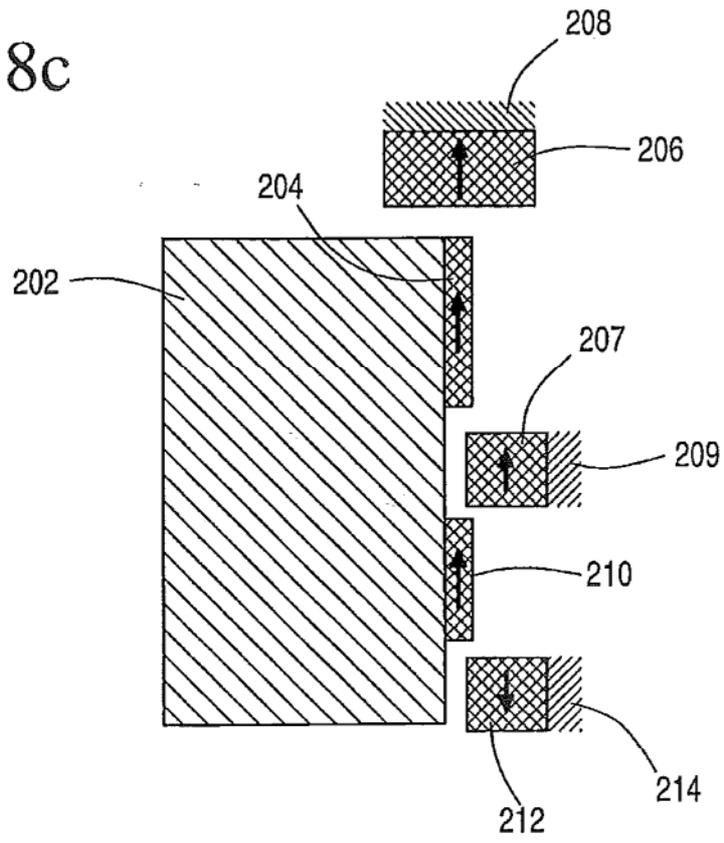
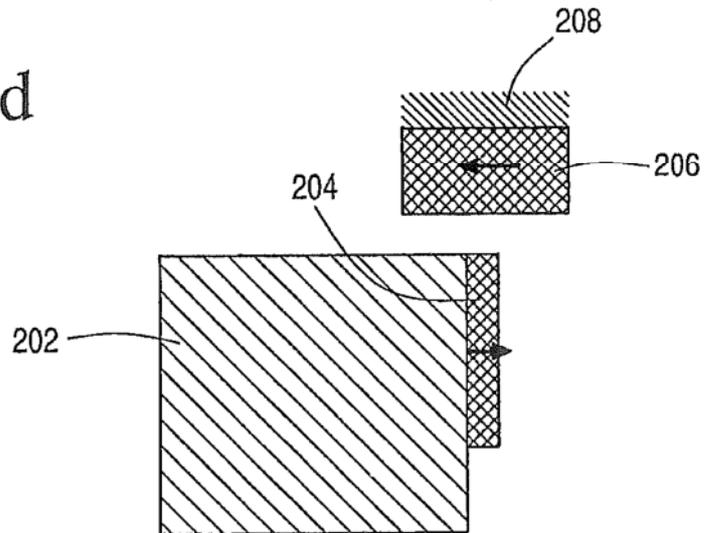


FIG. 8d



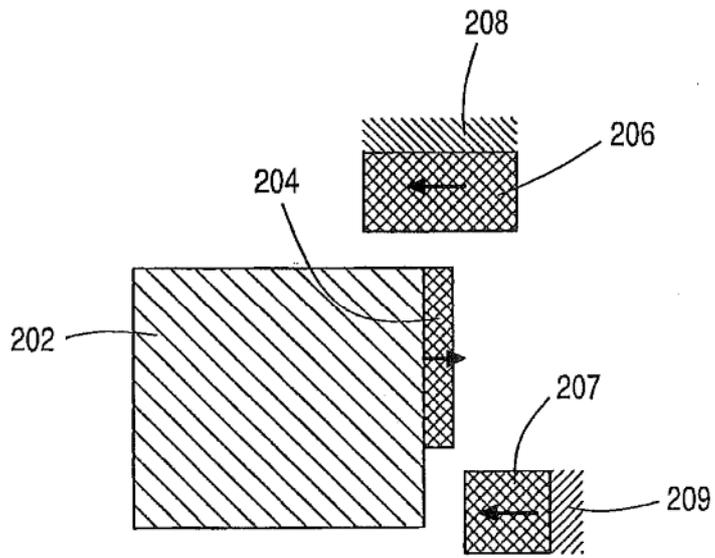


FIG. 8e

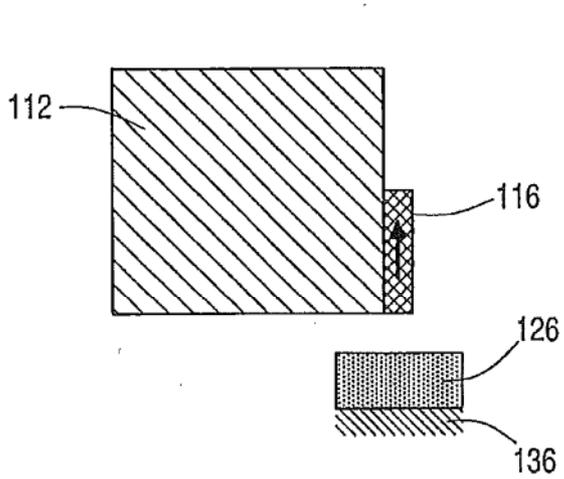


FIG. 9a

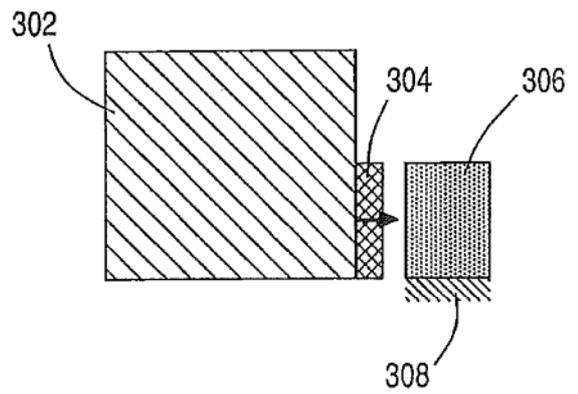


FIG. 9b

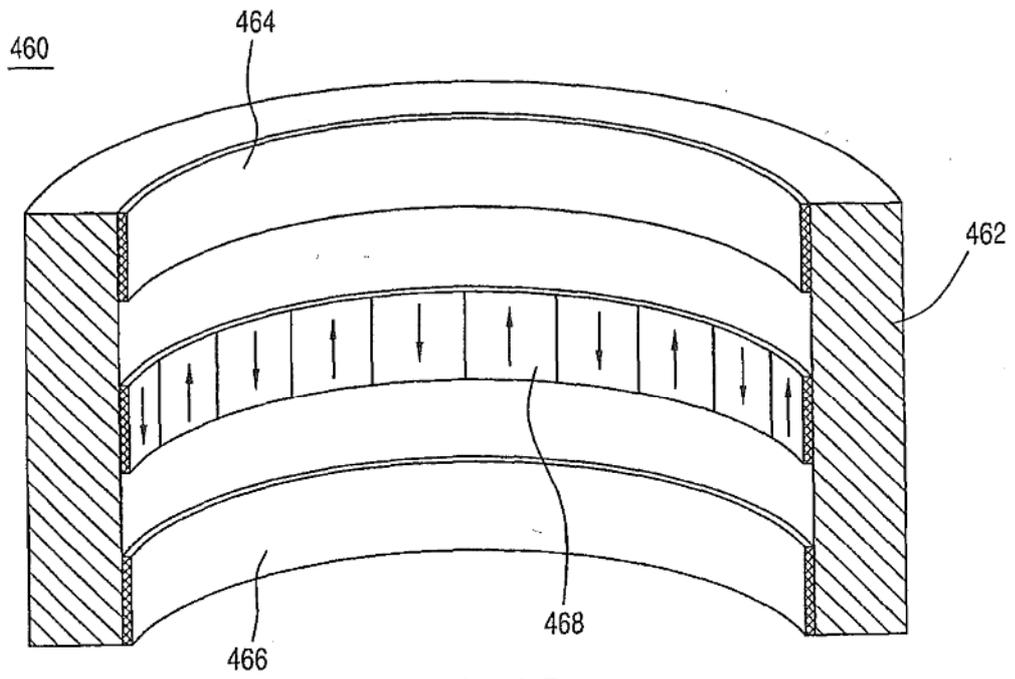


FIG. 10

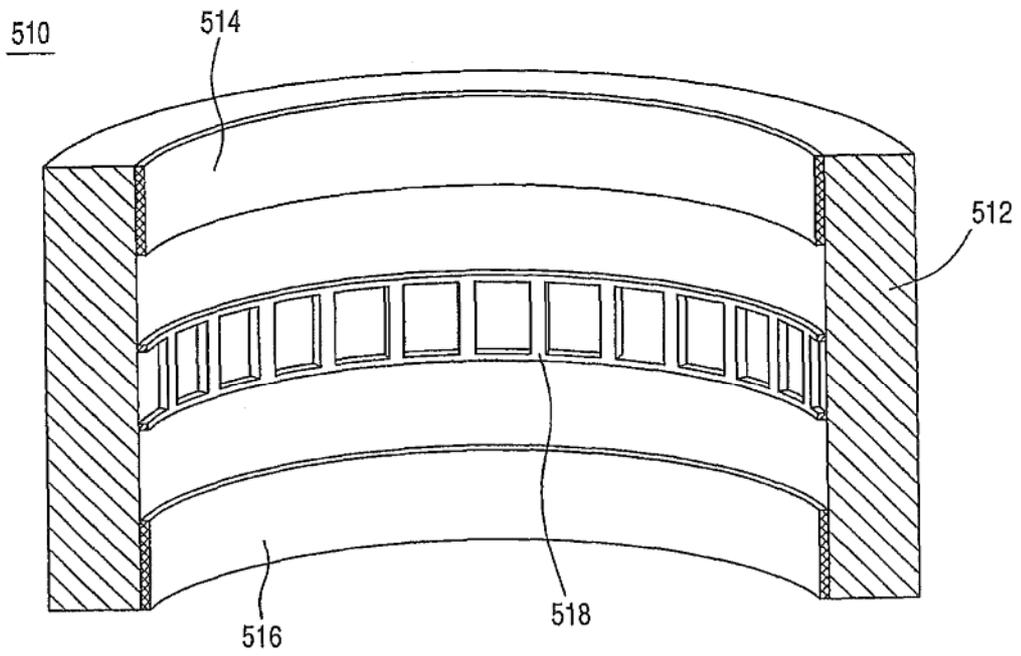


FIG. 11