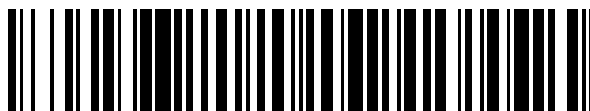


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 818 123**

51 Int. Cl.:

F16C 32/04 (2006.01)

F04D 25/06 (2006.01)

F04D 29/058 (2006.01)

H02K 7/09 (2006.01)

H02K 7/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.12.2015** **PCT/JP2015/006174**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.06.2017** **WO17098541**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.12.2015** **E 15910159 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.06.2020** **EP 3372854**

54 Título: **Dispositivo de cojinete magnético y compresor**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
09.04.2021

73 Titular/es:

DAIKIN INDUSTRIES, LTD. (100.0%)
Umeda Center Building, 4-12 Nakazaki-nishi 2-
chome, Kita-ku
Osaka-shi, Osaka 530-8323, JP

72 Inventor/es:

SAKAWAKI, ATSUSHI

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 818 123 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

Dispositivo de cojinete magnético y compresor

Campo técnico

La presente descripción se refiere a un cojinete magnético y a un compresor provisto del mismo.

5 Técnica antecedente

Se ha conocido convencionalmente un cojinete magnético, que es capaz de soportar un objeto a soportar (por ejemplo, un eje giratorio) sin contacto por medio de una fuerza electromagnética compuesta de una pluralidad de electroimanes. Por ejemplo, el Documento de Patente 1 representa en la Figura 3 un cojinete magnético que incluye un primer y segundo electroimanes opuestos entre sí con un rotor interpuesto entre ellos y una sección de control de corriente que controla las corrientes que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes. En este cojinete magnético, una corriente contráfásica o de "push-pull" (corriente de control) que varía de acuerdo con la carga aplicada al rotor (el objeto a soportar) y una corriente fija (corriente de polarización) para operar el primer y segundo electroimanes en un área lineal son combinadas, para producir las corrientes que fluyen a las bobinas del primer y segundo electroimanes. Se conoce también por el documento US 2014/234139 A1 un cojinete magnético muy similar a la solución sugerida a continuación.

Lista de citas

Documento de patente

DOCUMENTO DE PATENTE 1: Publicación de patente japonesa no examinada No. H10-141373;

DOCUMENTO DE PATENTE 2: US 2014/234139 A1

20 Compendio de la invención

Problema técnico

En el cojinete magnético descrito anteriormente, la fuerza electromagnética (fuerza de atracción) de un electroimán tiende a ser inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la separación entre el electroimán y el objeto a soportar. Es decir, a medida que el objeto a soportar está más cerca del electroimán, la fuerza electromagnética (fuerza de atracción) del electroimán aumenta. Por lo tanto, cuando un objeto a soportar que se encuentra entre dos electroimanes se desplaza desde la posición central (posición de referencia) entre los dos electroimanes, una fuerza de atracción no equilibrada que trabaja en una dirección en la que aumenta el desplazamiento debe actuar sobre el objeto a ser soportado.

Específicamente, en el rodamiento magnético anterior, en una ecuación de movimiento relacionada con el control de levitación de un objeto que se va a soportar (específicamente, una ecuación de movimiento donde un término de aceleración y un término de desplazamiento están en el lado izquierdo y el coeficiente del término de aceleración es un valor positivo), el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento del objeto que se va a soportar (es decir, el coeficiente del término relacionado con la fuerza que trabaja sobre el objeto que se va a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento del objeto ser admitido) es un valor negativo. Esto significa que el control de levitación del objeto que será soportado por el cojinete magnético anterior tiene una propiedad de resorte negativo (una propiedad de incrementar el desplazamiento del objeto que será soportado desde la posición central).

Como se describió anteriormente, en el cojinete magnético anterior, dado que una fuerza de atracción no equilibrada actúa sobre el objeto a soportar, aumentando el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central, es difícil estabilizar el control de levitación del objeto a soportar.

Para abordar el problema anterior, un objetivo de la presente divulgación es proporcionar un dispositivo de cojinete magnético capaz de prevenir o reducir la desestabilización del control de la levitación provocada por una fuerza de atracción no equilibrada.

Solución al problema

El dispositivo de cojinete magnético según el primer aspecto de la divulgación incluye un cojinete magnético (20) y un controlador (40). El cojinete magnético (20) tiene un primer y un segundo electroimanes (51, 52) opuestos entre sí, con un objeto a soportar interpuesto entre ellos y soporta el objeto a soportar sin contacto por medio de una fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52). El controlador (40) controla una primera corriente (i1) y una segunda corriente (i2) de modo que se cumplen las ecuaciones 1 y 2 siguientes.

$$i_1 = \frac{g_0 - ax}{g_0} (i_b + i_a) \quad \dots (1)$$

$$i_2 = \frac{g_0 + ax}{g_0} (i_b - i_d) \quad \dots (2)$$

en donde i_1 es la primera corriente (i_1) que fluye hacia el primer electroimán (51), i_2 es la segunda corriente (i_2) que fluye hacia el segundo electroimán (52), i_d es una corriente de control (i_d) correspondiente a un componente de corriente que varía según el desplazamiento del objeto a soportar en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), i_b es una corriente de polarización (i_b) correspondiente a un componente de corriente que indica un valor de corriente predeterminado, g_0 es una longitud de separación de referencia correspondiente a una longitud de separación entre el objeto a soportar y el primer y segundo electroimanes (51, 52) en el momento en que el objeto a soportar se encuentra en una posición central entre el primer y segundo electroimanes (51, 52), x es una cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar con respecto a la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), y a es un coeficiente de corrección predeterminado (a) en donde el coeficiente de corrección (a) se establece en un valor distinto de cero.

En el primer aspecto descrito anteriormente, la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52) se puede expresar como la ecuación 3 siguiente.

$$F = k \left\{ \frac{(g_0 - ax)(i_b + i_d)}{g_0(g_0 - x)} \right\}^2 - k \left\{ \frac{(g_0 + ax)(i_b - i_d)}{g_0(g_0 + x)} \right\}^2 \quad \dots (3)$$

Desarrollando la anterior ecuación 3 mediante desarrollo de Taylor y realizando una aproximación de primer orden, se puede obtener la ecuación 4 siguiente.

$$F \cong k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d - k \frac{4}{g_0^3} (i_b^2 + i_d^2)(a - 1)x \quad \dots (4)$$

A partir de la ecuación 4 anterior, una ecuación de movimiento relacionada con el control de levitación del objeto que será soportado por el dispositivo de cojinete magnético (una ecuación de movimiento de un sistema de control de levitación magnética) se puede expresar como la ecuación 5 a continuación.

$$m\ddot{x} + k \frac{4}{g_0^3} (i_b^2 + i_d^2)(a - 1)x = k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d \quad \dots (5)$$

Como se muestra en la ecuación 5 anterior, el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) (es decir, el coeficiente del término relacionado con la fuerza que trabaja sobre el objeto que se soportará de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a ser soportado) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética (específicamente, la ecuación de movimiento donde el término de aceleración y el término de desplazamiento están en el lado izquierdo y el coeficiente del término de aceleración es un valor positivo) depende del coeficiente de corrección (a). Debido a esto, ajustando el coeficiente de corrección (a), es posible ajustar el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética y, como resultado, ajustar la fuerza que trabaja sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, una fuerza de atracción no equilibrada).

Según el segundo aspecto de la divulgación, en el dispositivo de cojinete magnético según el primer aspecto, el coeficiente de corrección (a) se establece en un valor mayor que 1.

En el segundo aspecto, al establecer el coeficiente de corrección (a) en un valor mayor que 1, el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética puede ser un valor positivo. Así, se puede hacer que el control de levitación del objeto a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético (10) tenga una propiedad de resorte positiva (es decir, una propiedad de impedir un desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central).

Según el tercer aspecto de la divulgación, en el dispositivo de cojinete magnético según el primer o segundo aspecto, el coeficiente de corrección (a) es un valor variable.

En el tercer aspecto, al hacer variable el coeficiente de corrección (a), es posible ajustar arbitrariamente el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética. Por lo tanto, es posible ajustar arbitrariamente la fuerza que trabaja sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, una fuerza de atracción no equilibrada).

Según el cuarto aspecto de la divulgación, en el dispositivo de cojinete magnético según cualquiera de los aspectos primero a tercero, el controlador (40) realiza la operación de control de levitación de determinar la corriente de control (i_d) según un valor de desviación de posición (e) correspondiente a un valor diferencial entre la cantidad de

desplazamiento (x) y un valor de comando de posición predeterminado (x^*) y, usando la corriente de control (i_d), controlando la primera y segunda corrientes (i_1 , i_2) de modo que se cumplan las ecuaciones 1 y 2 anteriores, y la operación de establecimiento del coeficiente de corrección de establecimiento del coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación, de manera que una función de transferencia ($P(s)$) que tiene la corriente de control (i_d) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida presenta un valor de pico de ganancia en una banda de frecuencia objetivo predeterminada.

En el cuarto aspecto de la divulgación, cuando el control de levitación del objeto que va a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético tiene una propiedad de resorte positivo, la función de transferencia que tiene la corriente de control (i_d) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como la salida (en lo sucesivo denominada función de transferencia de planta ($P(s)$)) tiende a presentar un valor de pico de ganancia en una banda de frecuencia determinada. Por lo tanto, al establecer el coeficiente de corrección (a) utilizado en la operación de control de levitación de modo que la función de transferencia de planta ($P(s)$) presente un valor pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo, el control de levitación del objeto a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético puede hacer que tenga la propiedad de resorte positivo.

El compresor según el quinto aspecto de la divulgación incluye: el dispositivo de cojinete magnético según cualquiera de los aspectos primero a cuarto; un mecanismo de compresión (3); un motor eléctrico (4); y un eje giratorio (5) que conecta el mecanismo de compresión (3) y el motor eléctrico (4), en el que el dispositivo de cojinete magnético está configurado de modo que el primer y segundo electroimanes (51, 52) del cojinete magnético (20) están opuestos entre sí con una parte a soportar del eje giratorio (5) interpuesto entre ellos.

En el quinto aspecto de la divulgación, la desestabilización del control de la levitación provocada por una fuerza de atracción no equilibrada se puede prevenir o reducir en el dispositivo de cojinete magnético.

Ventajas de la invención

Según el primer aspecto de la divulgación, dado que la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, la fuerza de atracción desequilibrada) se puede ajustar ajustando el coeficiente de corrección (a), se puede prevenir o reducir la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada.

De acuerdo con el segundo aspecto de la divulgación, dado que se puede hacer que el control de levitación del objeto que va a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético (10) tenga la propiedad de resorte positivo, estableciendo el coeficiente de corrección (a) en un valor mayor que 1, se puede prevenir la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada.

De acuerdo con el tercer aspecto de la divulgación, dado que la fuerza que trabaja sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, la fuerza de atracción no equilibrada) se puede ajustar arbitrariamente, la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción desequilibrada se puede prevenir o reducir de manera apropiada.

De acuerdo con el cuarto aspecto de la divulgación, dado que se puede hacer que el control de levitación del objeto que va a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético tenga la propiedad de resorte positivo estableciendo el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación, de manera que la función de transferencia de planta ($P(s)$) indica un valor de pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo, se puede prevenir la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada.

De acuerdo con el quinto aspecto de la divulgación, la desestabilización del control de levitación provocada por la fuerza de atracción no equilibrada se puede prevenir o reducir en el dispositivo de cojinete magnético y, por lo tanto, se puede mejorar la eficiencia operativa del compresor.

Breve descripción de los dibujos

[FIG. 1] La Figura 1 es una vista en sección transversal longitudinal que muestra un ejemplo de configuración de un compresor según una realización.

[FIG. 2] La Figura 2 es una vista en sección transversal que muestra un ejemplo de configuración de un cojinete magnético radial.

[FIG. 3] La Figura 3 es una vista en sección transversal longitudinal que muestra el ejemplo de configuración del cojinete magnético radial.

[FIG. 4] La Figura 4 es una vista en planta que muestra un ejemplo de configuración de un cojinete magnético de impulsión.

[FIG. 5] La Figura 5 es una vista en sección transversal longitudinal que muestra el ejemplo de configuración del cojinete magnético de impulsión.

[FIG. 6] La Figura 6 es un diagrama de bloques que muestra un ejemplo de configuración de un controlador.

[FIG. 7] La Figura 7 es un gráfico para explicar la rigidez dinámica del control de levitación.

[FIG. 8] La Figura 8 es un gráfico para explicar una función de transferencia del control de levitación.

[FIG. 9] La Figura 9 es un diagrama de flujo para explicar la operación de establecimiento del coeficiente de corrección.

5 Descripción de realizaciones

A continuación se describirá en detalle una realización con referencia a los dibujos adjuntos. Téngase en cuenta que los componentes idénticos o equivalentes se indican con los mismos símbolos de referencia, y la descripción de los mismos no se repetirá.

(Compresor)

- 10 La Figura 1 muestra un ejemplo de configuración de un compresor (1) según la realización. El compresor (1) incluye una carcasa (2), un mecanismo de compresión (3), un motor eléctrico (4), un eje giratorio (5), cojinetes radiales de contacto (6), un cojinete de impulsión de contacto (7) y un dispositivo de cojinete magnético (10).

[Carcasa]

- 15 La carcasa (2) está configurada para tener la forma de un cilindro con ambos extremos cerrados y colocados de manera que la línea del eje del cilindro sea horizontal. El espacio en la carcasa (2) está dividido por una parte de pared (2a): el espacio en el lado derecho de la parte de pared (2a) constituye una cámara del mecanismo de compresión (S1) que aloja el mecanismo de compresión (3), y el espacio en el lado izquierdo de la parte de pared (2a) constituye una cámara de motor eléctrico (S2) que aloja el motor eléctrico (4). El eje giratorio (5) que se extiende axialmente dentro de la carcasa (2) conecta el mecanismo de compresión (3) y el motor eléctrico (4).

- 20 [Mecanismo de compresión]

El mecanismo de compresión (3) está configurado para comprimir fluido. En el ejemplo ilustrado, el mecanismo de compresión (3) está constituido por un impulsor (3a). El impulsor (3a) tiene una pluralidad de álabes que se forman una forma exterior aproximadamente cónica y se fija a un extremo del eje giratorio (5).

[Motor eléctrico]

- 25 El motor eléctrico (4) está configurado para hacer girar el eje giratorio (5). En este ejemplo, el motor eléctrico (4) tiene un estator (4a) y un rotor (4b). El estator (4a), formado para tener forma cilíndrica, está fijado en el interior de la carcasa (1). El rotor (4b), formado para tener una forma de columna, está insertado de forma que puede girar a lo largo de la circunferencia interior del estator (4a). Está formado un orificio de eje en la parte central del rotor (4b), a través del cual se inserta y fija el eje giratorio (5).

- 30 [Cojinete de contacto]

Los cojinetes de contacto radial (6) y el cojinete de contacto de impulsión (7) están configurados para soportar el eje giratorio (5) cuando el dispositivo de cojinete magnético (10) no está energizado (es decir, cuando el eje giratorio (5) no está levitando).

[Dispositivo de cojinete magnético]

- 35 El dispositivo de cojinete magnético (10) incluye uno o una pluralidad de (tres en este ejemplo) cojinetes magnéticos (20), uno o una pluralidad de (cinco en este ejemplo) sensores de separación (30) y un controlador (40).

<Cojinete magnético>

- 40 El cojinete magnético (20) tiene un par de electroimanes (por ejemplo el primer y segundo electroimanes (51, 52)) opuestos entre sí con un objeto a soportar (en este ejemplo, una parte a soportar del eje rotatorio (5)) interpuesto entre ellos, y está configurado para soportar el objeto a soportar sin contacto por medio de una fuerza electromagnética compuesta (F) del par de electroimán. En el cojinete magnético (20), controlando un par de corriente que fluye hacia el par de electroimán (por ejemplo, las corrientes primera y segunda (i1, i2) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51, 52)), es posible controlar la fuerza electromagnética compuesta (F) del par de electroimán y así controlar la posición del objeto a soportar en la dirección opuesta del par de electroimán.

- 45 En este ejemplo, dos cojinetes magnéticos radiales (21) y un cojinete magnético de impulsión (22) constituyen los tres cojinetes magnéticos (20). Uno de los dos cojinetes magnéticos radiales (21) se denomina en lo sucesivo un "primer cojinete magnético radial (21)" y el otro como un "segundo cojinete magnético radial (21)".

<<Cojinete magnético radial>>

Como se muestra en las Figuras 2 y 3, el cojinete magnético radial (21) tiene primer a cuarto electroimanes (51 a 54), constituyendo un cojinete magnético radial de tipo heteropolar. El primer y segundo electroimanes (51, 52) están opuestos entre sí con la parte a soportar (parte del eje) del eje rotatorio (5) interpuesta entre ellos, soportando la parte a soportar del eje rotatorio (5) de una manera sin contacto por medio de la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52). El tercer y cuarto electroimanes (53, 54) están opuestos entre sí con la parte a soportar (parte de eje) del eje rotatorio (5) interpuesta entre ellos, soportando la parte a soportar del eje rotatorio (5) de una manera sin contacto por medio de la fuerza electromagnética compuesta (F) del tercer y cuarto electroimanes (53, 54). Nótese que la dirección opuesta del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) (la dirección diagonalmente hacia abajo como se ve en la Figura 2) es ortogonal a la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (la dirección diagonalmente derecha hacia arriba como se ve en la Figura 2) en una vista en planta.

Específicamente, en este ejemplo, el cojinete magnético radial (21) incluye un núcleo de cojinete magnético (61) y ocho bobinas (65). El núcleo del cojinete magnético (61) está constituido por una pluralidad de láminas de acero electromagnéticas apiladas una encima de la otra, por ejemplo, y tiene un yugo trasero (62) y ocho dientes (63). El yugo trasero (62) está formado para tener una forma cilíndrica. Los ocho dientes (63) están dispuestos en la dirección circunferencial a lo largo de la circunferencia interior del yugo trasero (62) a distancias dadas (en este ejemplo, a distancias de 45°). Cada uno de los dientes (63) sobresale de la circunferencia interior del yugo trasero (62) en la dirección radial con su circunferencia interior (cara de la punta) opuesta a la circunferencia exterior de la parte a soportar del eje giratorio (5) con una separación determinada entre ellos.

Las ocho bobinas (65) están enrolladas alrededor de los ocho dientes (63) del núcleo de cojinete magnético (61), formando así ocho partes de electroimán (primera a octava partes de electroimán (71 a 78)) en este ejemplo. Específicamente, la primera parte de electroimán (71), la segunda parte de electroimán (72), la séptima parte de electroimán (77), la octava parte de electroimán (78), la tercera parte de electroimán (73), la cuarta parte de electroimán (74), la quinta parte de electroimán (75) y la sexta parte de electroimán (76) están dispuestas en este orden en el sentido de las agujas del reloj, como se ve en la Figura 2.

La primera y segunda partes de electroimán (71, 72), cuyas bobinas (65) están conectadas en serie, constituyen el primer electroimán (51). La tercera y cuarta partes de electroimán (73, 74), cuyas bobinas (65) están conectadas en serie, constituyen el segundo electroimán (52). La primera corriente (i1) es alimentada a las bobinas del primer electroimán (51) (es decir, las bobinas (65) de la primera y segunda partes de electroimán (71, 72)), y la segunda corriente (i2) es alimentada a las bobinas del segundo electroimán (52) (es decir, las bobinas (65) de la tercera y cuarta partes de electroimán (73, 74)). Controlando la primera y segunda corrientes (i1, i2) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51, 52), es posible controlar la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52) y así controlar la posición de la parte a soportar (parte del eje) del eje rotatorio (5) en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (es decir, la dirección radial; la dirección diagonalmente hacia arriba como se ve en la Figura 2).

La quinta y sexta partes de electroimán (75, 76), cuyas bobinas (65) están conectadas en serie, constituyen el tercer electroimán (53). Las partes de electroimán séptima y octava (77, 78), cuyas bobinas (65) están conectadas en serie, constituyen el cuarto electroimán (54). Una tercera corriente (i3) es alimentada a las bobinas del tercer electroimán (53) (es decir, las bobinas (65) de la quinta y sexta partes de electroimán (75, 76)), y una cuarta corriente (i4) es alimentada a las bobinas del cuarto electroimán (54) (es decir, las bobinas (65) de la séptima y octava partes de electroimán (77, 78)). Controlando la tercera y cuarta corrientes (i3, i4) que fluyen hacia el tercer y cuarto electroimanes (53, 54), es posible controlar la fuerza electromagnética compuesta (F) del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) y así controlar la posición de la parte a soportar (parte del eje) del eje giratorio (5) en la dirección opuesta del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) (es decir, la dirección radial ortogonal a la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52); la dirección diagonalmente hacia abajo como se ve en la Figura 2).

Téngase en cuenta que la dirección de bobinado de las bobinas (65) y la orientación de las corrientes que fluyen hacia las bobinas (65) se establecen de modo que una fuerza de atracción (es decir, una fuerza electromagnética que actúa en una dirección en la que la parte a soportar (parte del eje) del eje giratorio (5) es atraída) se produce en cada uno de los electroimanes primero a cuarto (51 a 54). Específicamente, la dirección de bobinado de las bobinas (65) y la orientación de las corrientes que fluyen hacia las bobinas (65) se establecen de modo que los flujos magnéticos se produzcan en las direcciones mostradas por las flechas en la Figura 2.

<<Cojinete magnético de impulsión>>

Como se muestra en las Figuras 4 y 5, el cojinete magnético de impulsión (22) tiene un primer y un segundo electroimanes (51, 52). Nótese que, en este ejemplo, el eje giratorio (5) tiene, en el otro extremo del mismo (el extremo opuesto al extremo al que está fijado el impulsor (3a)), una forma de disco que sobresale hacia fuera en la dirección radial. El primer y segundo electroimanes (51, 52) están opuestos entre sí con una parte a soportar (parte de disco) del eje rotatorio (5) interpuesta entre ellos, para soportar la parte a soportar del eje giratorio (5) en una manera sin contacto por medio de la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52).

Específicamente, en este ejemplo, el cojinete magnético de impulsión (22) tiene dos núcleos de cojinete magnético (61) y dos bobinas (65). Los dos núcleos de cojinetes magnéticos (61), cada uno formado para tener una forma anular, están colocados en ambos lados de la parte a soportar (parte de disco) del eje rotatorio (5) en la dirección axial con una separación determinada desde la parte a ser apoyada. Está formada una ranura circunferencial en toda la circunferencia de cada una de las caras opuestas de los núcleos de cojinetes magnéticos (61). Las dos bobinas (65) están alojadas en las ranuras circunferenciales de los dos núcleos de cojinetes magnéticos (61). En este ejemplo, por lo tanto, se proporcionan dos electroimanes (el primer electroimán (51) y el segundo electroimán (52)). Una primera corriente (i1) es alimentada a la bobina (65) del primer electroimán (51), y una segunda corriente (i2) es alimentada a la bobina (65) del segundo electroimán (52). Controlando la primera y segunda corrientes (i1, i2) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51) y (52), es posible controlar la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52) y así controlar la posición de la parte a soportar (parte de disco) del eje giratorio (5) en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (es decir, la dirección axial; la dirección horizontal como se ve en Figura 5).

Téngase en cuenta que la dirección de bobinado de las bobinas (65) y la orientación de las corrientes que fluyen hacia las bobinas (65) se establecen de modo que una fuerza de atracción (es decir, una fuerza electromagnética que actúa en una dirección en la que la parte a soportar (parte de disco) del eje giratorio (5) es atraída) se produce en cada uno de los electroimanes primero y segundo (51, 52). Específicamente, la dirección de bobinado de las bobinas (65) y la orientación de las corrientes que fluyen hacia las bobinas (65) se establecen de modo que los flujos magnéticos se produzcan en las direcciones mostradas por las flechas en la Figura 5.

<Sensor de separación>

Como se muestra en la Figura 1, los sensores de separación (30) corresponden a los pares de electroimanes (por ejemplo, el par del primer y segundo electroimanes (51, 52)) cada uno opuesto entre sí con el objeto a soportar (en este ejemplo, la parte a ser soportados del eje giratorio (5)) interpuesto entre ellos, y están configurados para detectar una cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar con respecto a la posición central en la dirección opuesta del par de electroimán (la posición de referencia; por ejemplo, la posición central entre el primer y segundo electroimanes (51, 52)). En este ejemplo, cuatro sensores de separación radial (31) y un sensor de separación de impulsión (32) constituyen los cinco sensores de separación (30).

<<Sensor de separación radial>>

Los cuatro sensores de separación radial (31) están constituidos por un sensor de separación radial correspondiente al par del primer y segundo electroimanes (51, 52) del primer cojinete magnético radial (21) (en adelante denominado "primer sensor de separación radial (31)"), un sensor de separación radial correspondiente al par del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del primer cojinete magnético radial (21) (en adelante denominado "segundo sensor de separación radial (31)"), un sensor de separación radial correspondiente al par del primer y segundo electroimanes (51, 52) del segundo cojinete magnético radial (21) (en adelante denominado "tercer sensor de separación radial (31)"), y un sensor de separación radial correspondiente al par del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del segundo cojinete magnético radial (21) (en lo sucesivo denominado "cuarto sensor de separación radial (31)").

Cada uno del primer y tercer sensores de separación radial (31) está configurado para detectar una cantidad de desplazamiento (x) de la parte a ser soportada del eje rotatorio (5) con respecto a la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (es decir, la dirección radial; la dirección diagonalmente hacia arriba como se ve en la Figura 2). Téngase en cuenta que, cuando la parte a soportar (parte del eje) del eje giratorio (5) se encuentra en la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), la longitud de la separación entre el primer electroimán (51) y la parte a soportar del eje rotatorio (5) es la misma que la longitud de la separación entre el segundo electroimán (52) y la parte a soportar del eje giratorio (5).

Cada uno de los segundo y cuarto sensores de separación radial (31) está configurado para detectar una cantidad de desplazamiento (x) de la parte a soportar (parte de eje) del eje giratorio (5) con respecto a la posición central en la dirección opuesta del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) (es decir, la dirección radial ortogonal a la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52); la dirección derecha diagonalmente hacia abajo como se ve en la Figura 2). Téngase en cuenta que, cuando la parte a soportar (parte del eje) del eje giratorio (5) se encuentra en la posición central en la dirección opuesta del tercer y cuarto electroimanes (53, 54), la longitud de la separación entre el tercer electroimán (53) y la parte a soportar del eje rotatorio (5) es la misma que la longitud de la separación entre el cuarto electroimán (54) y la parte a soportar del eje rotatorio (5).

<<Sensor de separación de impulsión>>

El sensor de separación de impulsión (32) corresponde al par del primer y segundo electroimanes (51, 52) del cojinete magnético de impulsión (22), y está configurado para detectar una cantidad de desplazamiento (x) de la parte a ser soportada del eje giratorio (5) con respecto a la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (es decir, la dirección axial; la dirección horizontal como se ve en la Figura 2). Nótese que, cuando la parte a soportar (parte de disco) del eje rotatorio (5) se encuentra en la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), la longitud de la separación entre el primer electroimán (51) y la

parte a soportar del eje rotatorio (5) es la misma que la longitud de la separación entre el segundo electroimán (52) y la parte a soportar del eje giratorio (5).

<Controlador>

El controlador (40) controla uno o una pluralidad de cojinetes magnéticos (20) de manera que el objeto a soportar (en este ejemplo, la parte a soportar del eje rotatorio (5)) se soporta sin contacto. Para describir con más detalle, el controlador (40) realiza la operación de control de levitación para cada uno de los pares de electroimán (en este ejemplo, cinco pares de electroimán) de uno o una pluralidad de cojinetes magnéticos (20). En la operación de control de levitación, en base a la cantidad de desplazamiento (x) detectada por un sensor de separación (30) correspondiente a un par de electroimán, el controlador (40) controla un par de corriente que fluye hacia el par de electroimán. Específicamente, asumiendo que un electroimán del par de electroimán es el "primer electroimán (51)" y el otro electroimán es el "segundo electroimán (52)", el controlador (40) controla la primera y segunda corrientes (i₁, i₂) que fluyen al primer y segundo electroimanes (51, 52) para que se cumplan las ecuaciones 1 y 2 siguientes.

$$i_1 = \frac{g_0 - ax}{g_0} (i_b + i_d) \quad \dots (1)$$

$$i_2 = \frac{g_0 + ax}{g_0} (i_b - i_d) \quad \dots (2)$$

En las ecuaciones anteriores, "i₁" es la primera corriente (i₁) que fluye hacia el primer electroimán (51), "i₂" es la segunda corriente (i₂) que fluye hacia el segundo electroimán (52), "i_d" es un componente de corriente que varía según el desplazamiento de un objeto a soportar (en este ejemplo, la parte a soportar del eje giratorio (5)) en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52) (en lo sucesivo denominada corriente de control (i_d)), e "i_b" es un componente de corriente que indica un valor de corriente predeterminado (en lo sucesivo denominado corriente de polarización (i_b)).

Además, "g₀" es la longitud de la separación entre el objeto a soportar y el primer y segundo electroimanes (51, 52) en el momento en que el objeto a soportar se encuentra en la posición central (es decir, la posición de referencia) entre el primer y segundo electroimanes (51, 52) (en lo sucesivo, longitud de la separación de referencia (g₀)), "x" es la cantidad de desplazamiento (x) del objeto que a soportar con respecto a la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes. (51, 52) y "a" es un coeficiente de corrección predeterminado (a).

<Configuración del Controlador>

En este ejemplo, el controlador (40) incluye cuatro secciones de control radial (41) y una sección de control de impulsión (42). Las cuatro secciones de control radial (41) están constituidas por una sección de control radial correspondiente al par del primer y segundo electroimanes (51, 52) del primer cojinete magnético radial (21) (en adelante denominado primera sección de control radial (41)), una sección de control radial correspondiente al par del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del primer cojinete magnético radial (21) (en adelante, una segunda sección de control radial (41)), un control radial sección correspondiente al par del primer y segundo electroimanes (51, 52) del segundo cojinete magnético radial (21) (en lo sucesivo, tercera sección de control radial (43)), y una sección de control radial correspondiente al par del tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del segundo cojinete magnético radial (21) (en lo sucesivo denominado cuarta sección de control radial (41)).

<<Primera sección de control radial>>

La primera sección de control radial (41) realiza la operación de control de levitación para el primer y segundo electroimanes (51, 52) del primer cojinete magnético radial (21) en base a la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el primer sensor de separación radial (31). Específicamente, la primera sección de control radial (41) controla la primera y segunda corrientes (i₁, i₂) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51, 52) del primer cojinete magnético radial (21) de modo que se cumplen las ecuaciones 1 y 2 anteriores.

<<Segunda sección de control radial>>

La segunda sección de control radial (41) realiza la operación de control de levitación para el tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del primer cojinete magnético radial (21) en base a la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el segundo sensor de separación radial (31). Específicamente, la segunda sección de control radial (41) controla la tercera y cuarta corrientes (i₃, i₄) que fluyen hacia el tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del primer cojinete magnético radial (21), de modo que dos ecuaciones similares a las ecuaciones 1 y 2 anteriores (es decir, dos ecuaciones obtenidas sustituyendo la tercera corriente (i₃), la cuarta corriente (i₄), el tercer electroimán (53) y el cuarto electroimán (54) por la primera corriente (i₁), la segunda corriente (i₂), el primer electroimán (51) y el segundo electroimán (52), respectivamente, en las ecuaciones 1 y 2) se cumplen.

<<Tercera sección de control radial>>

La tercera sección de control radial (41) realiza la operación de control de levitación para el primer y segundo electroimanes (51, 52) del segundo cojinete magnético radial (21) en base a la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el tercer sensor de separación radial (31). Específicamente, como la primera sección de control radial (41), la tercera sección de control radial (41) controla la primera y segunda corrientes (i1, i2) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51, 52) del segundo cojinete magnético radial (21) para que las ecuaciones 1 y 2 anteriores se cumplan.

<<Cuarta sección de control radial>>

La cuarta sección de control radial (41) realiza la operación de control de levitación para el tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del segundo cojinete magnético radial (21) basándose en la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el cuarto sensor de separación radial (31). Específicamente, como la segunda sección de control radial (41), la cuarta sección de control radial (41) controla la tercera y cuarta corrientes (i3, i4) que fluyen hacia el tercer y cuarto electroimanes (53, 54) del segundo cojinete magnético radial (21), de modo que se cumplen las dos ecuaciones similares a las ecuaciones 1 y 2 anteriores.

<<Sección de control de impulsión>>

La sección de control de impulsión (42) realiza la operación de control de levitación para el primer y segundo electroimanes (51, 52) del cojinete magnético de impulsión (22) basándose en la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el sensor de separación de impulsión (32). Específicamente, la sección de control de impulsión (42) controla la primera y segunda corrientes (i1, i2) que fluyen hacia el primer y segundo electroimanes (51, 52) del cojinete magnético de impulsión (22) de modo que se cumplen las ecuaciones 1 y 2 anteriores.

<Detalles del controlador>

A continuación, haciendo referencia a la Figura 6, se describirá en detalle el controlador (40). El controlador (40) tiene una o una pluralidad de secciones de control (en este ejemplo, cuatro secciones de control radial (41) y una sección de control de impulsión (42)) correspondientes respectivamente a pares de electroimán (en este ejemplo, cinco pares de electroimán) de uno o una pluralidad de cojinetes magnéticos (20), y cada sección de control está configurada como se muestra en la Figura 6. Como ejemplo, a continuación se describirá la configuración de la sección de control radial (41).

En la operación de control de levitación, la sección de control radial (41) determina la corriente de control (id) de acuerdo con un valor de desviación de posición (e) correspondiente a un valor diferencial entre la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el sensor de separación (30) y un valor de comando de posición predeterminado (x*) y, utilizando la corriente de control (id), controla la primera y la segunda corrientes (i1, i2) de modo que se cumplan las ecuaciones 1 y 2 anteriores. Específicamente, la sección de control radial (41) incluye una unidad de ajuste de coeficiente de corrección (81), una unidad de cálculo de desviación de posición (82), una unidad de control de posición (83), una unidad de cálculo de corriente (84), una primera unidad de control de corriente (85), y una segunda unidad de control de corriente (86).

<<Unidad de establecimiento del coeficiente de corrección>>

La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) establece el coeficiente de corrección (a), que es un valor variable. Por ejemplo, la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) está configurada para cambiar el coeficiente de corrección (a) en respuesta al control desde el exterior. Es preferible establecer el coeficiente de corrección (a) en un valor mayor que 1. El coeficiente de corrección (a) se describirá más adelante con detalle.

<<Unidad de cálculo de desviación de posición y unidad de control de posición>>

La unidad de cálculo de desviación de posición (82) determina el valor de desviación de posición (e) correspondiente al valor diferencial entre la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el sensor de separación (30) y el valor de comando de posición (x*). Específicamente, la unidad de cálculo de desviación de posición (82) determina el valor de desviación de posición (e) restando la cantidad de desplazamiento (x) del valor de comando de posición (x*). La unidad de control de posición (83) determina la corriente de control (id) en base al valor de desviación de posición (e) determinado por la unidad de cálculo de desviación de posición (82). Específicamente, la unidad de control de posición (83) decide la corriente de control (id), de modo que la corriente de control (id) sea mayor cuanto mayor sea el valor de desviación de posición (e).

<<Unidad de cálculo de corriente>>

La unidad de cálculo de corriente (84) determina un primer valor de comando de corriente (i1*) y un segundo valor nominal de corriente (i2*) basado en el coeficiente de corrección (a) establecido por la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81), la corriente de control (id) determinada por la unidad de control de posición (83), la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el sensor de separación (30), la corriente de polarización

predeterminada (i_b), y la longitud de separación de referencia predeterminada (g_0). Específicamente, la unidad de cálculo de corriente (84) determina el primer valor de comando de corriente (i_1^*) y el segundo valor de comando nominal de corriente (i_2^*) sustituyendo estos valores de parámetros (i_d , i_b , x , g_0 , a) en las ecuaciones de cálculo mostradas en la Figura 6.

5 <<Unidad de control de corriente>>

La primera unidad de control de corriente (85) controla una primera tensión (V_1) aplicada a las bobinas (65) del primer electroimán (51) para que la primera corriente (i_1) fluya hacia las bobinas (65) del primer electroimán (51)) se convierte en el primer valor nominal de corriente (i_1^*) determinado por la unidad de cálculo de corriente (84). Específicamente, la primera unidad de control de corriente (85) controla el primer voltaje (V_1) de modo que la primera corriente (i_1) detectada por un detector de corriente (no mostrado) se convierte en el primer valor de comando de corriente (i_1^*).

10 La segunda unidad de control de corriente (86) controla una segunda tensión (V_2) aplicada a las bobinas (65) del segundo electroimán (52) para que la segunda corriente (i_2) fluya hacia las bobinas (65) del segundo electroimán (52) se convierte en el segundo valor nominal de corriente (i_2^*) determinado por la unidad de cálculo de corriente (84). Específicamente, la segunda unidad de control de corriente (86) controla el segundo voltaje (V_2) de modo que la segunda corriente (i_2) detectada por el detector de corriente (no mostrado) se convierte en el segundo valor de comando de corriente (i_2^*).

<Propiedad del control de levitación>

A continuación, se describirá la propiedad del control de levitación del objeto a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético (10) (es decir, el control para soportar el objeto a soportar de una manera sin contacto).

20 Téngase en cuenta que las definiciones de los símbolos en las siguientes ecuaciones son las siguientes.

i_1 : Primera corriente (i_1)

i_2 : Segunda corriente (i_2)

i_b : Corriente de polarización (i_b)

i_d : Corriente de control (i_d)

25 F_1 : Fuerza electromagnética (F_1) del primer electroimán (51)

F_2 : Fuerza electromagnética (F_2) del segundo electroimán (52)

F : Fuerza electromagnética compuesta (F)

m : Masa del objeto a soportar

x : Cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar

30 $\ddot{x}$ (dos puntos): Aceleración del objeto a soportar (diferencial de segundo orden de la cantidad de desplazamiento (x))

k : Coeficiente de atracción magnética (coeficiente de proporcionalidad)

g_0 : Longitud de la separación de referencia (g_0)

$P(s)$: Función de transferencia de planta ($P(s)$)

$X(s)$: Valor de la transformada de Laplace relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)

35 $I_d(s)$: Valor de la transformada de Laplace relacionado con la corriente de control (i_d)

Téngase en cuenta también que, en la siguiente descripción, se supone que la posición central (posición de referencia) del primer y segundo electroimanes (51, 52) es el origen de la cantidad de desplazamiento (x) del objeto que se va a soportar (es decir, el posición en la que la cantidad de desplazamiento (x) es cero) y se supone que la dirección desde el segundo electroimán (52) hacia el primer electroimán (51) es la dirección positiva.

40 <<Sistema de control de levitación magnética>>

La ecuación de movimiento relacionada con el control de levitación del objeto a soportar (en este ejemplo, la parte a soportar del eje giratorio (5)) (es decir, la ecuación de movimiento de un sistema de control de levitación magnética) se puede expresar como siguiente ecuación 11.

$$m\ddot{x} = F \quad \dots (11)$$

Además, la fuerza electromagnética compuesta F del primer y segundo electroimanes (51, 52) se puede expresar como la siguiente ecuación 12 utilizando la fuerza electromagnética (F_1) del primer electroimán (51) y la fuerza electromagnética (F_2) del segundo electroimán. (52).

$$F = F_1 - F_2 \quad \dots (12)$$

- 5 La fuerza electromagnética (F_1) del primer electroimán (51) tiende a ser directamente proporcional al cuadrado de la primera corriente (i_1) que fluye hacia el primer electroimán (51) e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la separación ($g_0 - x$) entre el primer electroimán (51) y el objeto a soportar. Asimismo, la fuerza electromagnética (F_2) del segundo electroimán (52) tiende a ser directamente proporcional al cuadrado de la segunda corriente (i_2) que fluye hacia el segundo electroimán (52) e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la separación ($g_0 + x$) entre el segundo electroimán (52) y el objeto a soportar. Por lo tanto, usando la primera corriente (i_1), la segunda corriente (i_2), la longitud en galones de referencia (g_0) y la cantidad de desplazamiento (x), la ecuación 12 se puede reescribir como la siguiente ecuación 13.

$$F = k \left(\frac{i_1}{g_0 - x} \right)^2 - k \left(\frac{i_2}{g_0 + x} \right)^2 \quad \dots (13)$$

<<Ejemplo comparativo de cojinete magnético>>

- 15 Se describirá un ejemplo comparativo del dispositivo de cojinete magnético (10). En un dispositivo de cojinete magnético general, para asegurar la linealidad entre la fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52) y la corriente de control (i_d), la primera y segunda corrientes (i_1 , i_2) son a menudo generadas en base a la corriente de polarización (i_b) y la corriente de control (i_d) de modo que se cumplen las ecuaciones 14 y 15 siguientes.

$$i_1 = i_b + i_d \quad \dots (14)$$

$$i_2 = i_b - i_d \quad \dots (15)$$

Sustituyendo las ecuaciones 14 y 15 en la ecuación 13, se puede obtener la siguiente ecuación 16.

$$F = k \left(\frac{i_b + i_d}{g_0 - x} \right)^2 - k \left(\frac{i_b - i_d}{g_0 + x} \right)^2 \quad \dots (16)$$

- 25 Desarrollando mediante Taylor la ecuación 16 y realizando una aproximación de primer orden, se puede obtener la ecuación 17 siguiente.

$$F \cong k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d + k \frac{4i_b^2}{g_0^3} x \quad \dots (17)$$

Sustituyendo la ecuación 17 en la ecuación 11 y ordenando el resultado, se puede obtener una ecuación de movimiento como la ecuación 18 siguiente.

$$m\ddot{x} - k \frac{4i_b^2}{g_0^3} x = k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d \quad \dots (18)$$

- 30 Además, mediante transformación de Laplace de la ecuación 18 y ordenando el resultado, se puede obtener una función de transferencia de planta ($P(s)$) como la ecuación 19 siguiente. Téngase en cuenta que la función de transferencia de planta ($P(s)$) corresponde a una función de transferencia que tiene la corriente de control (i_d) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida.

$$P(s) = \frac{X(s)}{I_d(s)} = \frac{k \frac{4i_b}{g_0^2}}{ms^2 - k \frac{4i_b^2}{g_0^3}} \quad \dots (19)$$

- 35 En la ecuación de movimiento mostrada como ecuación 18 (específicamente, la ecuación de movimiento donde el término de aceleración y el término de desplazamiento están en el lado izquierdo y el coeficiente del término de aceleración es un valor positivo), el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) (es decir, el coeficiente del término relacionado con la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar) es un valor negativo. Esto significa que el control de la levitación del objeto a soportar por el ejemplo comparativo del dispositivo de cojinete magnético (10) (el dispositivo de cojinete magnético en el que se cumplen las ecuaciones 14 y 15) tiene una propiedad de resorte negativa

(es decir, la propiedad que aumenta el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central). Es decir, en el ejemplo comparativo del dispositivo de cojinete magnético (10), dado que una fuerza de atracción no equilibrada actúa sobre el objeto a soportar, aumentando el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central, es difícil estabilizar el control de levitación del objeto a soportar. Téngase en cuenta que se puede decir que el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento representa la correlación entre la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar y la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar. Es decir, se puede afirmar que, cuando el coeficiente del término de desplazamiento es un valor negativo, existe una correlación negativa (correlación en la que, cuando uno aumenta, el otro disminuye) entre la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar y la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar, y, cuando el coeficiente del término de desplazamiento es un valor positivo, hay correlación positiva (correlación en la que, cuando uno aumenta, el otro también aumenta) entre la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar y la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar.

<<Cojinete magnético de la realización>>

Por el contrario, en el dispositivo de cojinete magnético (10) de esta realización, la primera y segunda corrientes (i1, i2) se generan en base a la corriente de polarización (ib), la corriente de control (id), la longitud de la separación de referencia (g0), la cantidad de desplazamiento (x) y el coeficiente de corrección (a) de modo que se cumplen las ecuaciones 20 y 21 siguientes.

$$i_1 = \frac{g_0 - ax}{g_0} (i_b + i_d) \quad \dots (20)$$

$$i_2 = \frac{g_0 + ax}{g_0} (i_b - i_d) \quad \dots (21)$$

Sustituyendo las ecuaciones 20 y 21 en la ecuación 13, se puede obtener la ecuación 22 siguiente.

$$F = k \left\{ \frac{(g_0 - ax)(i_b + i_d)}{g_0(g_0 - x)} \right\}^2 - k \left\{ \frac{(g_0 + ax)(i_b - i_d)}{g_0(g_0 + x)} \right\}^2 \quad \dots (22)$$

Desarrollando mediante Taylor la ecuación 22 y realizando una aproximación de primer orden, se puede obtener la ecuación 23 siguiente.

$$F \cong k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d - k \frac{4}{g_0^3} (i_b^2 + i_d^2)(a - 1)x \quad \dots (23)$$

Sustituyendo la ecuación 23 en la ecuación 11 y ordenando el resultado, se puede obtener una ecuación de movimiento como la ecuación 24 siguiente.

$$m\ddot{x} + k \frac{4}{g_0^3} (i_b^2 + i_d^2)(a - 1)x = k \frac{4i_b}{g_0^2} i_d \quad \dots (24)$$

Además, transformando mediante Laplace la ecuación 24 y ordenando el resultado, se puede obtener una función de transferencia de planta (P (s)) como la ecuación 25 siguiente.

$$P(s) = \frac{X(s)}{Id(s)} = \frac{k \frac{4i_b}{g_0^2}}{ms^2 + k \frac{4}{g_0^3} (i_b^2 + i_d^2)(a - 1)} \quad \dots (25)$$

En la ecuación de movimiento que se muestra como la ecuación 24 (específicamente, la ecuación de movimiento donde el término de aceleración y el término de desplazamiento están en el lado izquierdo y el coeficiente del término de aceleración es un valor positivo), el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) (es decir, el coeficiente del término relacionado con la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar según la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar) depende del coeficiente de corrección (a). Específicamente, el coeficiente del término de desplazamiento es un valor negativo cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1, cero cuando el coeficiente de corrección (a) es 1, y un valor positivo cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor mayor que 1.

Téngase en cuenta que, cuando el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética

es un valor negativo (es decir, cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1), una fuerza de atracción no equilibrada debe actuar sobre el objeto a soportar. Sin embargo, incluso si el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1, al aproximar el coeficiente de corrección (a) a 1, es posible reducir el valor absoluto del coeficiente del término de desplazamiento en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética y, como resultado, reducir la fuerza de atracción no equilibrada que actúa sobre el objeto a soportar.

Cuando el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética es cero (es decir, cuando el coeficiente de corrección (a) es 1), la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, la fuerza de atracción no equilibrada) no es actúa aparentemente sobre el objeto a soportar.

Cuando el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética es un valor mayor que 1 (es decir, cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor superior a 1), una vez que el objeto a soportar se desplaza de la posición central, una fuerza que actúa en una dirección que impide el desplazamiento debe actuar sobre el objeto a soportar. En este caso, el control de levitación del objeto a soportar por el dispositivo de cojinete magnético (10) tiene una propiedad de resorte positiva (es decir, una propiedad de impedir el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central).

<Rigidez dinámica>

A continuación, haciendo referencia a la Figura 7, se describirá la rigidez dinámica del control de levitación del objeto a ser suministrado por el dispositivo de cojinete magnético (10). La rigidez dinámica del control de levitación se refiere a un índice que indica el grado de dificultad para desplazar el objeto a soportar desde la posición central en el control de levitación. A medida que la ganancia de rigidez dinámica aumenta, el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central se vuelve más difícil. En la Figura 7, la línea discontinua representa las características de frecuencia de la rigidez dinámica en el momento en que el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1, la línea continua fina representa las características de frecuencia de la rigidez dinámica en el momento en que el coeficiente de corrección (a) es 1, y la línea continua gruesa representa las características de frecuencia de la rigidez dinámica en el momento en que el coeficiente de corrección (a) es un valor mayor que 1.

Como se muestra en la Figura 7, la ganancia de la rigidez dinámica del control de levitación aumenta a medida que el coeficiente de corrección (a) se acerca a 1 desde un valor menor que 1. Esto se debe a que el valor absoluto del coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética disminuye gradualmente y, como resultado, la fuerza de atracción no equilibrada disminuye gradualmente. La ganancia de la rigidez dinámica del control de levitación aumenta aún más a medida que el coeficiente de corrección (a) se acerca desde 1 a un valor mayor que 1. Esto se debe a que el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética se convierte en un valor positivo, el coeficiente del término de desplazamiento que indica el valor positivo aumenta gradualmente y, como resultado, una vez que el objeto a soportar se desplaza de la posición central, la fuerza que actúa en una dirección que impide este desplazamiento aumenta gradualmente.

<Función de transferencia de planta>

A continuación, haciendo referencia a la Figura 8, se describirá la función de transferencia de planta del control de levitación del objeto a soportar por el dispositivo de cojinete magnético (10). En la Figura 8, la línea discontinua representa las características de frecuencia de la función de transferencia de planta en el momento en que el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1, la línea continua fina representa las características de frecuencia de la función de transferencia de planta en el momento en que la corrección el coeficiente (a) es 1, y la línea continua gruesa representa las características de frecuencia de la función de transferencia de planta en el momento en que el coeficiente de corrección (a) es un valor mayor que 1.

Como se muestra en la Figura 8, cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor menor que 1 y cuando el coeficiente de corrección (a) es 1, la función de transferencia de planta (P (s)) no presenta un valor de pico de ganancia (es decir, un valor Q). Por el contrario, cuando el coeficiente de corrección (a) es un valor mayor que 1, la función de transferencia de planta (P (s)) presenta un valor pico de ganancia (es decir, un valor Q) en una banda de frecuencia dada. Esto se debe a que el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética se convierte en un valor positivo y, como resultado, el control de levitación del objeto a soportar por el dispositivo de cojinete magnético (10) tiene la propiedad de resorte positivo (es decir, la propiedad de impedir el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central).

[Efectos de la realización]

Como se describió anteriormente, ajustando el coeficiente de corrección (a), se puede ajustar el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de

control de levitación magnética. Así, dado que se puede ajustar la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar (específicamente, la fuerza de atracción no equilibrada), es posible evitar o reducir la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada.

- 5 Además, al establecer el coeficiente de corrección (a) en un valor mayor que 1, el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética puede ser un valor positivo. Por lo tanto, dado que el control de levitación del objeto a soportar por el dispositivo de cojinete magnético (10) puede tener la propiedad de resorte positivo (es decir, la propiedad de impedir el desplazamiento del objeto a soportar desde la posición central), es posible evitar o reducir la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada.

- 10 Además, al hacer que el coeficiente de corrección (a) sea variable (es decir, al configurar el controlador (40) de manera que el coeficiente de corrección (a) se pueda cambiar), el coeficiente del término de desplazamiento relacionado con la cantidad de desplazamiento (x) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética se puede ajustar arbitrariamente. Por lo tanto, dado que la fuerza que actúa sobre el objeto a soportar de acuerdo con la cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar se puede ajustar arbitrariamente, es posible evitar o reducir adecuadamente la desestabilización del control de levitación causada por la fuerza de atracción no equilibrada. Téngase en cuenta que el coeficiente de corrección (a) también puede ser un valor fijo.

Como se ha descrito anteriormente, dado que se puede evitar o reducir la desestabilización del control de levitación provocada por la fuerza de atracción no equilibrada, se puede mejorar la eficiencia operativa del compresor (1).

- 20 (Modificación del controlador)

- El controlador (40) también se puede configurar para realizar la operación de establecimiento del coeficiente de corrección además de la operación de control de levitación. En la operación de establecimiento del coeficiente de corrección, el controlador (40) establece un coeficiente de corrección en la operación de control de levitación (es decir, el coeficiente de corrección (a) usado en la operación de control de levitación) de modo que la función de transferencia de planta ($P(s)$) que tiene la corriente de control (id) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida presente un valor de pico de ganancia (es decir, un valor Q) en una banda de frecuencia objetivo predeterminada. En este ejemplo, el controlador (40) realiza cinco operaciones de establecimiento de coeficientes de corrección correspondientes a cinco operaciones de control de levitación. Específicamente, cada una de las cuatro secciones de control radial (41) y una sección de control de impulsión (42) realiza la operación de control de levitación y la operación de establecimiento del coeficiente de corrección.

[Operación de establecimiento del coeficiente de corrección]

Haciendo referencia a la Figura 9, se describirá la operación de establecimiento del coeficiente de corrección por parte del controlador (40). Específicamente, la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) realiza el procesamiento como sigue.

- 35 <Paso (ST11)>

Primero, la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) establece una banda de frecuencia objetivo. La banda de frecuencia objetivo se ha establecido en un rango dado de banda de frecuencia (por ejemplo, de 10 Hz a 100 Hz) que incluye una frecuencia objetivo predeterminada (por ejemplo, 50 Hz).

<Paso (ST12)>

- 40 La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) establece entonces el coeficiente de corrección (a) en un valor inicial. Téngase en cuenta que el valor inicial del coeficiente de corrección (a) se ha establecido en un valor de límite inferior de búsqueda predeterminado (valor mínimo).

<Paso (ST13)>

- 45 La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) establece entonces la frecuencia de modulación en un valor inicial. Téngase en cuenta que el valor inicial de la frecuencia de modulación se ha establecido en un valor de límite inferior de búsqueda predeterminado (valor mínimo).

<Paso (ST14)>

- 50 La unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) adquiere entonces una forma de onda modulada del valor de comando de posición (x^*) basada en la frecuencia de modulación de corriente (es decir, la frecuencia de modulación establecida en el paso (ST12) o paso (ST17)) y el valor de comando de posición predeterminado (x^*). Específicamente, la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) adquiere una forma de onda modulada del valor de comando de posición (x^*) modulando el valor de comando de posición (x^*) utilizando una onda sinusoidal que tiene la misma frecuencia que la frecuencia de modulación (por ejemplo, superponiendo la onda sinusoidal en el valor de comando de posición (x^*)).

<Paso (ST15)>

La unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) adquiere entonces una forma de onda fluctuante de la cantidad de desplazamiento (x). Específicamente, la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) suministra la forma de onda modulada del valor de comando de posición (x*) adquirido en el paso (ST14), en lugar del valor de comando de posición (x*), a la unidad de cálculo de desviación de posición (82), y también suministra el coeficiente de corrección de corriente (es decir, el coeficiente de corrección (a) establecido en el paso (ST12) o paso (ST20)) a la unidad de cálculo de corriente 84. Con esto, el control de la primera y segunda corrientes (i1, i2) (es decir, la operación de control de levitación) se realiza en base a la forma de onda modulada del valor de comando de posición (x*) y el coeficiente de corrección de corriente (a), y la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) adquiere una forma de onda fluctuante de la cantidad de desplazamiento (x) (es decir, una forma de onda que muestra una fluctuación de la cantidad de desplazamiento (x)) basada en la cantidad de desplazamiento (x) detectada por el sensor de separación (30).

<Paso (ST16)>

La unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) adquiere entonces una función de transferencia de planta (P (s)) que tiene la corriente de control (id) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida. La unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) almacena entonces el valor de ganancia de la función de transferencia de planta (P (s)) estableciendo una correspondencia con la frecuencia de modulación de corriente. Específicamente, la unidad 81 de establecimiento de coeficiente de corrección realiza el siguiente procesamiento.

Primero, la unidad de ajuste del coeficiente de corrección (81) transforma mediante Fourier la forma de onda modulada del valor de comando de posición (x*) adquirido en el paso (ST14) usando la frecuencia de modulación de corriente, para adquirir un valor de transformada de Fourier de la forma de onda modulada del valor de comando de posición (x*). Además, la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) transforma mediante Fourier la forma de onda fluctuante de la cantidad de desplazamiento (x) adquirida en el paso (ST15) usando la frecuencia de modulación de corriente, para adquirir un valor de transformada de Fourier de la forma de onda fluctuante de la cantidad de desplazamiento (x).

A continuación, la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) divide el valor de la transformada de Fourier de la forma de onda fluctuante de la cantidad de desplazamiento (x) por el valor de la transformada de Fourier de la forma de onda modulada del valor de comando de posición (x*), para adquirir una función de transferencia de bucle cerrado que tenga el valor de comando de posición (x*) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida, y transforma la función de transferencia de bucle cerrado en una función de transferencia de bucle abierto que tiene el valor de desviación de posición (e) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida. La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) adquiere entonces la función de transferencia de planta (P (s)) que tiene la corriente de control (id) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida al excluir la función de transferencia de la unidad de control de posición (83) de la función de transferencia de bucle abierto. La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) almacena entonces el valor de ganancia de la función de transferencia de planta (P (s)) y la frecuencia de modulación de corriente estableciendo una correspondencia entre ellos.

<Paso (ST17, ST18)>

La unidad de establecimiento de coeficiente de corrección 81 aumenta entonces la frecuencia de modulación de corriente en una cantidad predeterminada (paso (ST17)), y determina si la frecuencia de modulación de corriente (es decir, la frecuencia de modulación aumentada en el paso (ST17)) excede un valor de límite superior de búsqueda predeterminado (valor máximo) (paso (ST18)). El proceso pasa al paso (ST19) si la frecuencia de modulación de corriente excede el valor de límite superior de búsqueda, o de lo contrario pasa al paso (ST14).

Por tanto, el procesamiento en los pasos (ST14) a (ST17) se repite hasta que la frecuencia de modulación de corriente excede el valor de límite superior de búsqueda. Como resultado, una pluralidad de frecuencias de modulación y una pluralidad de valores de ganancia (valores de ganancia de la función de transferencia de planta (P (s))) son almacenadas en la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) en una correspondencia de uno con el otro.

<Paso (ST19)>

La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección 81 detecta entonces la frecuencia de modulación correspondiente al valor pico de ganancia (es decir, el valor Q) de la función de transferencia de planta (P (s)) (en lo sucesivo denominada "frecuencia de pico de ganancia") entre una pluralidad de frecuencias de modulación. La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) almacena entonces la frecuencia de pico de ganancia y el coeficiente de corrección de corriente (a) estableciendo una correspondencia entre ellos. Téngase en cuenta que, cuando no se incluye una frecuencia de modulación correspondiente al valor de pico de ganancia en la pluralidad de modulación frecuencias (es decir, cuando la función de transferencia de planta (P (s)) no presenta ningún valor Q), la unidad de establecimiento de coeficiente de corrección (81) no almacena el coeficiente de corrección de corriente (a).

<Pasos (ST20, ST21)>

La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección 81 aumenta entonces el coeficiente de corrección de corriente (a) en una cantidad dada (paso (ST20)). La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) determina entonces si el coeficiente de corrección de corriente (es decir, el coeficiente de corrección (a) aumentado en el paso (ST20)) excede un valor de límite superior de búsqueda predeterminado (valor máximo) (paso (ST21)). El proceso pasa al paso (ST22) si el coeficiente de corrección de corriente (a) excede el valor del límite superior de búsqueda, o de lo contrario pasa al paso (ST13).

Por tanto, el procesamiento en los pasos (ST13) a (ST20) se repite hasta que el coeficiente de corrección de corriente (a) excede el valor de límite superior de búsqueda. Como resultado, una pluralidad de coeficientes de corrección (a) y una pluralidad de frecuencias de pico de ganancia se almacenan en la unidad de establecimiento de coeficientes de corrección (81) en una correspondencia de uno a uno.

<Paso (ST22)>

La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) detecta entonces el coeficiente de corrección (a) correspondiente a la frecuencia de pico de ganancia incluida en la banda de frecuencia objetivo establecida en el paso (ST11) entre una pluralidad de coeficientes objetivo a. Específicamente, cuando solo se incluye una frecuencia de pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo, la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) detecta el coeficiente de corrección (a) correspondiente a esta frecuencia de pico de ganancia, o cuando se incluyen dos o más frecuencias de pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo, detecta un coeficiente de corrección (a) correspondiente a una frecuencia pico de ganancia más cercana a la frecuencia objetivo incluida en la banda de frecuencia objetivo entre las dos o más frecuencias de pico de ganancia.

<Paso (ST23)>

La unidad de establecimiento del coeficiente de corrección 81 decide entonces el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación (en este ejemplo, el cálculo en la unidad de cálculo de corriente (84)) en base al resultado de detección del coeficiente de corrección (a) en el paso (ST22). Específicamente, la unidad de establecimiento del coeficiente de corrección (81) decide el coeficiente de corrección detectado en el paso (ST22) (es decir, el coeficiente de corrección (a) correspondiente a la frecuencia de pico de ganancia incluida en la banda de frecuencia objetivo) como el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación.

[Efecto por modificación del controlador]

Como se describió anteriormente, al realizar el procesamiento en los pasos (ST11) a (ST23), el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación se puede establecer de modo que la función de transferencia de planta (P (s)) presente un valor de pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo. Nótese que, cuando el control de levitación del objeto a ser soportado por el dispositivo de cojinete magnético (10) tiene la propiedad de resorte positivo (es decir, la propiedad de impedir un desplazamiento del objeto a ser soportado desde la posición central), la función de transferencia de planta (P (s)) tiende a presentar un valor de pico de ganancia (es decir, un valor Q) en una banda de frecuencia dada (ver Figura 8). Por lo tanto, al establecer el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación de modo que la función de transferencia de planta (P (s)) presente un valor pico de ganancia en la banda de frecuencia objetivo, el control de levitación del objeto a soportar por el dispositivo de cojinete (10) puede tener la propiedad de resorte positivo. De esta manera, es posible evitar la desestabilización del control de levitación causada por una fuerza de atracción no equilibrada.

(Otras realizaciones)

La cantidad de desplazamiento (x) y el coeficiente de corrección (a) usados en las ecuaciones anteriores (específicamente, las ecuaciones 1 a 5 y 20 a 25) corresponden al valor real de la cantidad de desplazamiento del objeto a soportar con respecto a la posición central. Por lo tanto, si la cantidad de desplazamiento del objeto a soportar detectada por el sensor de separación (30) incluye un error, el coeficiente del término de desplazamiento (el coeficiente del término relacionado con la cantidad de desplazamiento (x)) en la ecuación de movimiento del sistema de control de levitación magnética puede ser un valor positivo en algunos casos incluso cuando el coeficiente de corrección (a) usado en la unidad de cálculo de corriente (84) del controlador (40) sea un valor de 1 o menor que 1.

El controlador (40) también se puede configurar usando un circuito aritmético como una CPU y una memoria. Los componentes del controlador (40) pueden estar integrados en un circuito aritmético o estar dispersos en una pluralidad de circuitos aritméticos.

Aunque se ha descrito como ejemplo el caso en el que el cojinete magnético radial (21) constituye un cojinete magnético radial de tipo heteropolar, el cojinete magnético radial (21) también puede constituir un cojinete magnético radial de tipo homopolar.

Debe entenderse que la realización descrita anteriormente representa una forma esencialmente preferida de la divulgación y no se debe interpretar que restringe los alcances de la divulgación, las aplicaciones de la misma o los usos de la misma.

Aplicabilidad industrial

- 5 Como se describió anteriormente, el dispositivo de cojinete magnético descrito anteriormente es útil como un dispositivo que soporta un objeto que va a ser soportado, como un eje giratorio, sin contacto.

Descripción de los caracteres de referencia

- | | | |
|----|----|---|
| | 1 | Compresor |
| | 2 | Carcasa |
| 10 | 3 | Mecanismo de compresión |
| | 3a | Impulsor |
| | 4 | Motor eléctrico |
| | 5 | Eje giratorio |
| | 10 | Dispositivo de cojinete magnético |
| 15 | 20 | Cojinete magnético |
| | 21 | Rodamiento magnético radial |
| | 22 | Cojinete magnético de impulsión |
| | 30 | Sensor de separación |
| | 31 | Sensor de separación radial |
| 20 | 32 | Sensor de gas de impulsión |
| | 40 | Controlador |
| | 41 | Sección de control radial |
| | 42 | Sección de control de impulsión |
| | 51 | Primer imán |
| 25 | 52 | Segundo imán |
| | 81 | Unidad de establecimiento del coeficiente de corrección |
| | 82 | Unidad de cálculo de desviación de posición |
| | 83 | Unidad de control de posición |
| | 84 | Unidad de cálculo de corriente |
| 30 | 85 | Primera unidad de control de corriente |
| | 86 | Segunda unidad de control de corriente |
| | i1 | Primera corriente |
| | i2 | Segunda corriente |

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de cojinete magnético, que comprende:

un cojinete magnético (20) que tiene un primer y un segundo electroimanes (51, 52) opuestos entre sí con un objeto a soportar interpuesto entre ellos y soporta el objeto a soportar de una manera sin contacto por medio de una fuerza electromagnética compuesta (F) del primer y segundo electroimanes (51, 52); y

un controlador (40) que controla una primera corriente (i_1) y una segunda corriente (i_2) de modo que se cumplen las ecuaciones 1 y 2

$$i_1 = \frac{g_0 - ax}{g_0} (i_b + i_d) \quad \dots (1)$$

$$i_2 = \frac{g_0 + ax}{g_0} (i_b - i_d) \quad \dots (2)$$

en donde i_1 es la primera corriente (i_1) que fluye hacia el primer electroimán (51), i_2 es la segunda corriente (i_2) que fluye hacia el segundo electroimán (52), i_d es una corriente de control (i_d) correspondiente a un componente de corriente que varía según el desplazamiento del objeto a soportar en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), i_b es una corriente de polarización (i_b) correspondiente a un componente de corriente que indica un valor de corriente predeterminado, g_0 es una longitud de separación de referencia correspondiente a una longitud de separación entre el objeto a soportar y el primer y segundo electroimanes (51, 52) en el momento en que el objeto a soportar se encuentra en una posición central entre el primer y segundo electroimanes (51, 52), x es una cantidad de desplazamiento (x) del objeto a soportar con respecto a la posición central en la dirección opuesta del primer y segundo electroimanes (51, 52), y a es un coeficiente de corrección predeterminado (a), en donde el coeficiente de corrección (a) se establece en un valor distinto de cero.

2. El dispositivo de cojinete magnético de la reivindicación 1, en el que

el coeficiente de corrección (a) se establece en un valor superior a 1.

3. El dispositivo de cojinete magnético de la reivindicación 1 o 2, en el que

el coeficiente de corrección (a) es un valor variable.

4. El dispositivo de cojinete magnético de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que

el controlador (40) realiza

la operación de control de levitación para determinar la corriente de control (i_d) de acuerdo con un valor de desviación de posición (e) correspondiente a un valor diferencial entre la cantidad de desplazamiento (x) y un valor de comando de posición predeterminado (x^*) y, utilizando la corriente de control (i_d), controlar la primera y segunda corrientes (i_1 , i_2) de modo que se cumplan las ecuaciones 1 y 2 anteriores, y

la operación de establecimiento del coeficiente de corrección consistente en establecer el coeficiente de corrección (a) en la operación de control de levitación de modo que una función de transferencia ($P(s)$) que tiene la corriente de control (i_d) como entrada y la cantidad de desplazamiento (x) como salida presente una ganancia de valor de pico en una banda de frecuencia objetivo predeterminada.

5. Un compresor que comprende:

el dispositivo de cojinete magnético de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4;

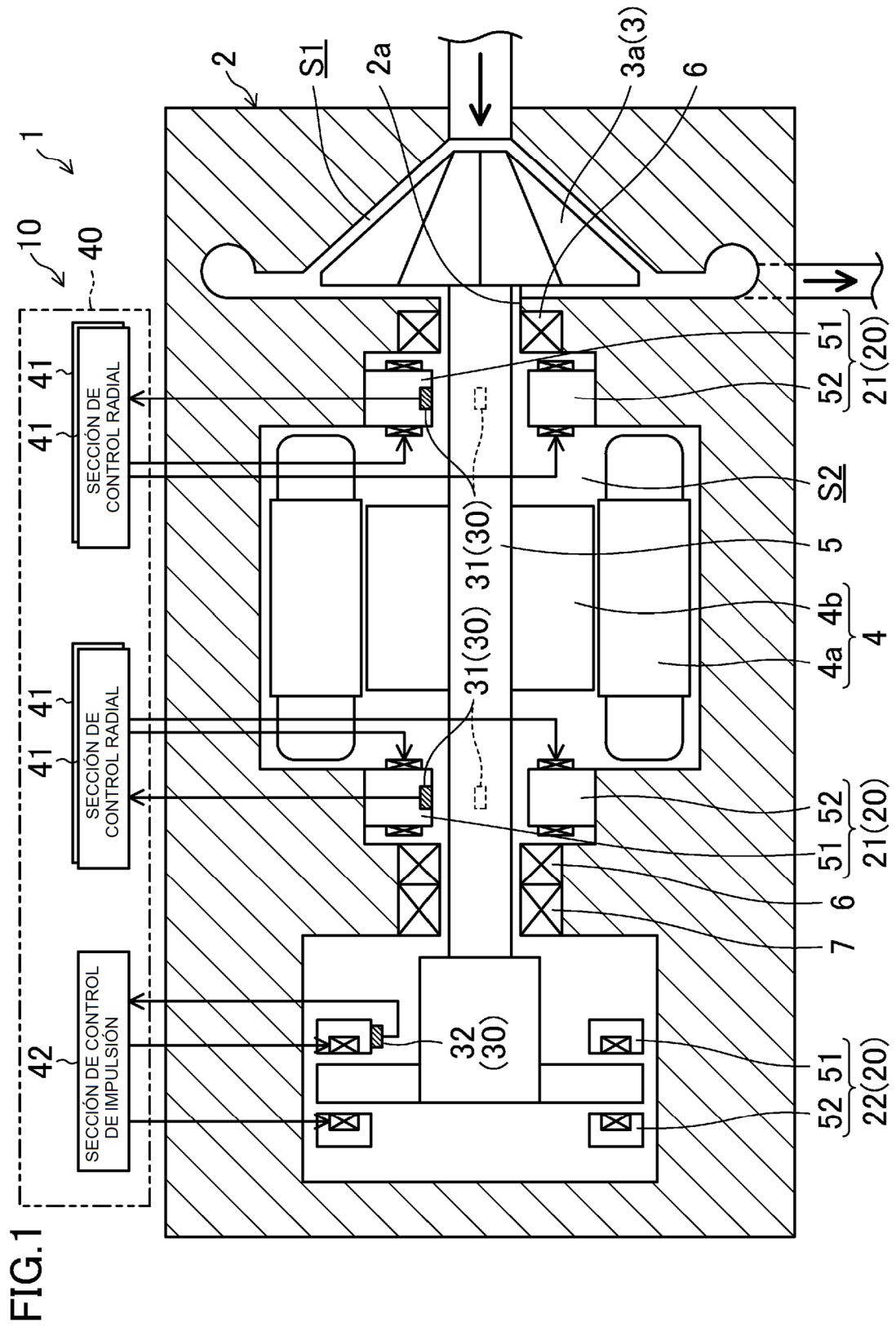
un mecanismo de compresión (3);

un motor eléctrico (4); y

un eje giratorio (5) que conecta el mecanismo de compresión (3) y el motor eléctrico (4),

en donde

el dispositivo de cojinete magnético está configurado de modo que el primer y segundo electroimanes (51, 52) del cojinete magnético (20) están opuestos entre sí con una parte a soportar del eje giratorio (5) interpuesta entre ellos.



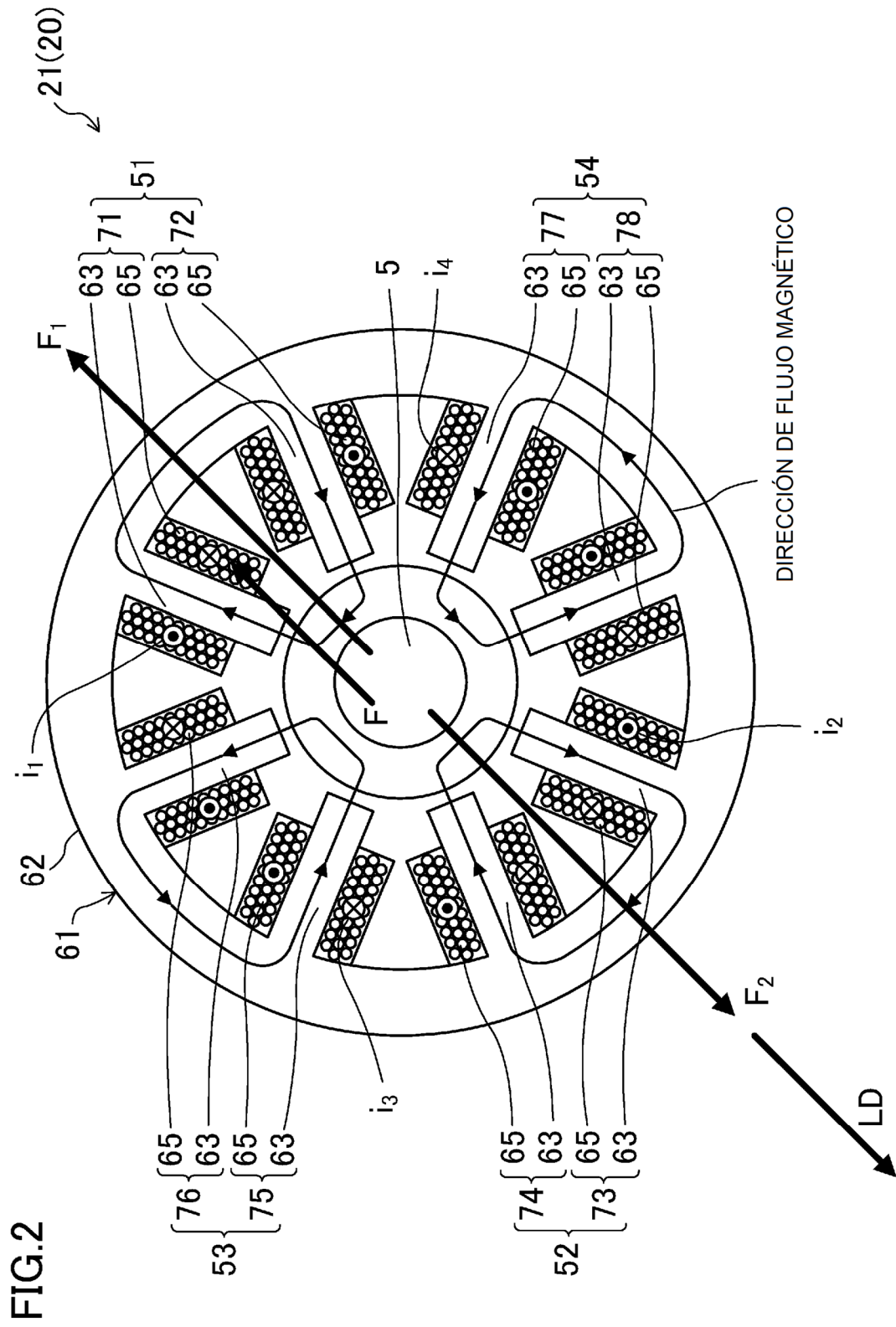


FIG.3

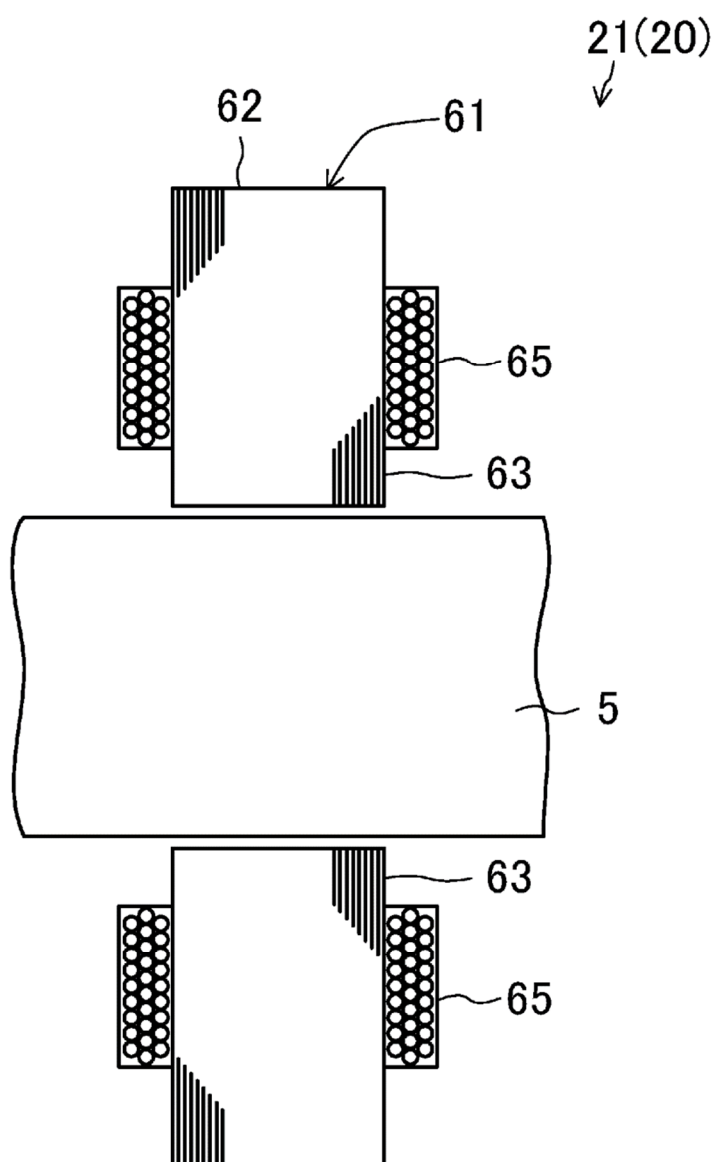


FIG.4

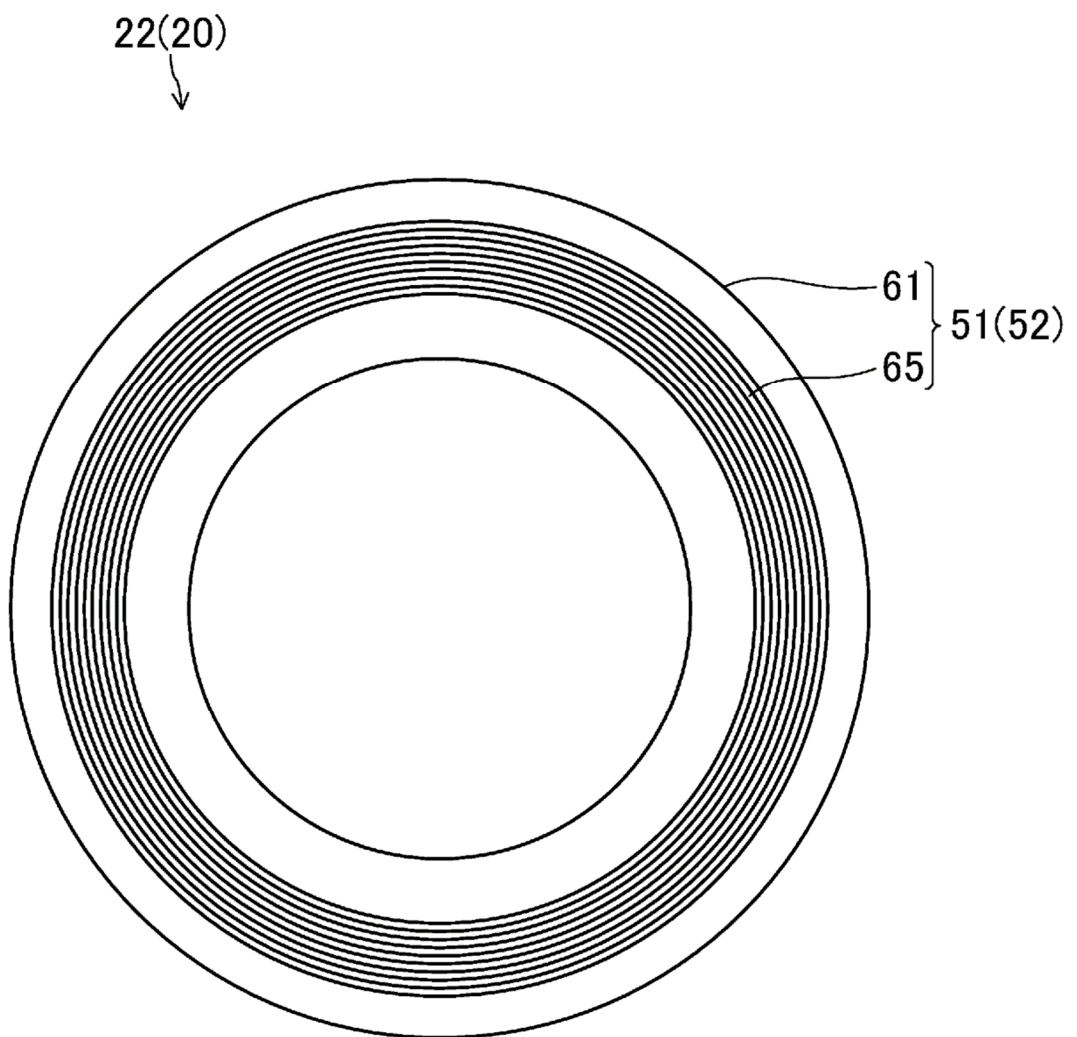


FIG.5

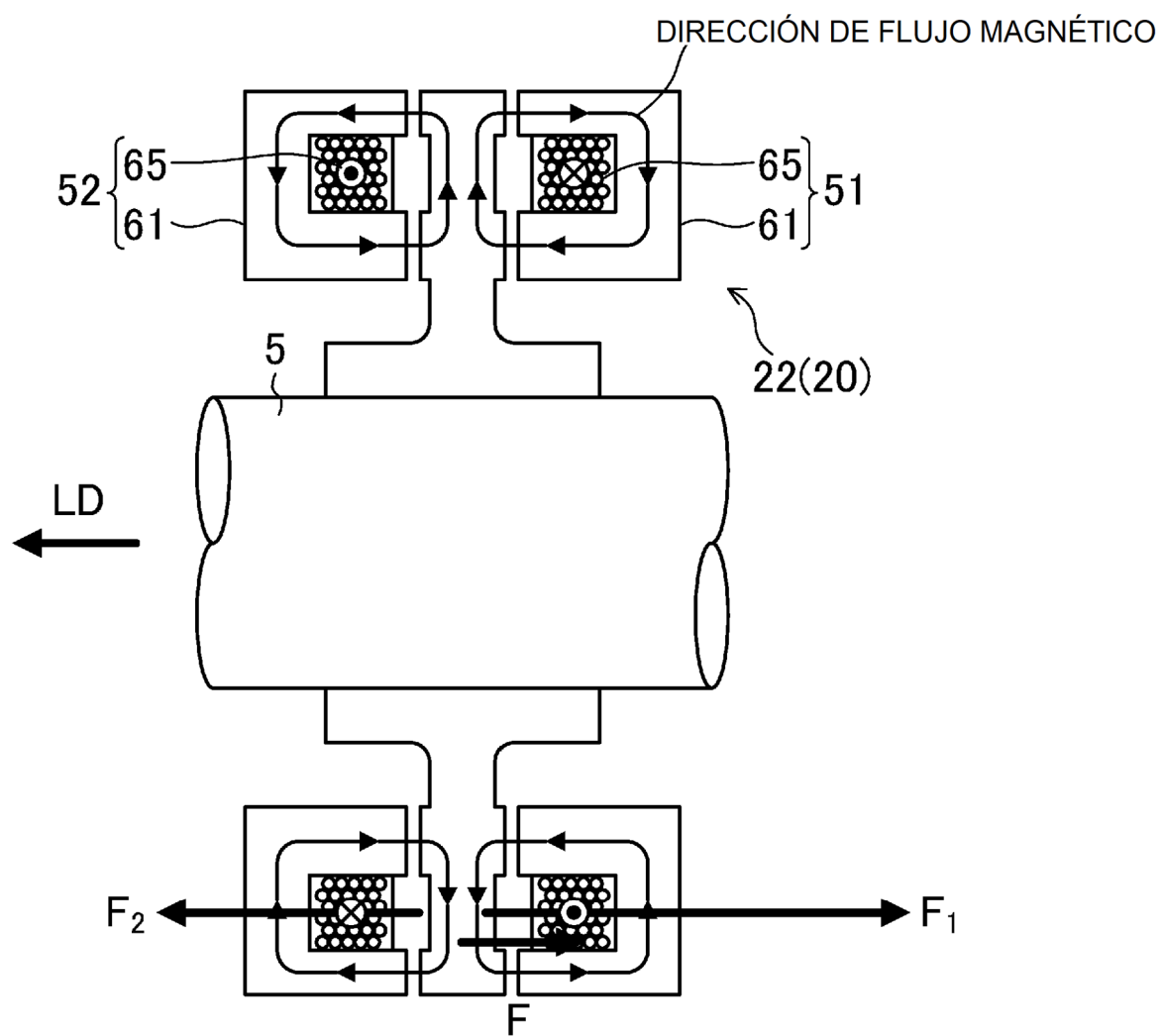


FIG.6

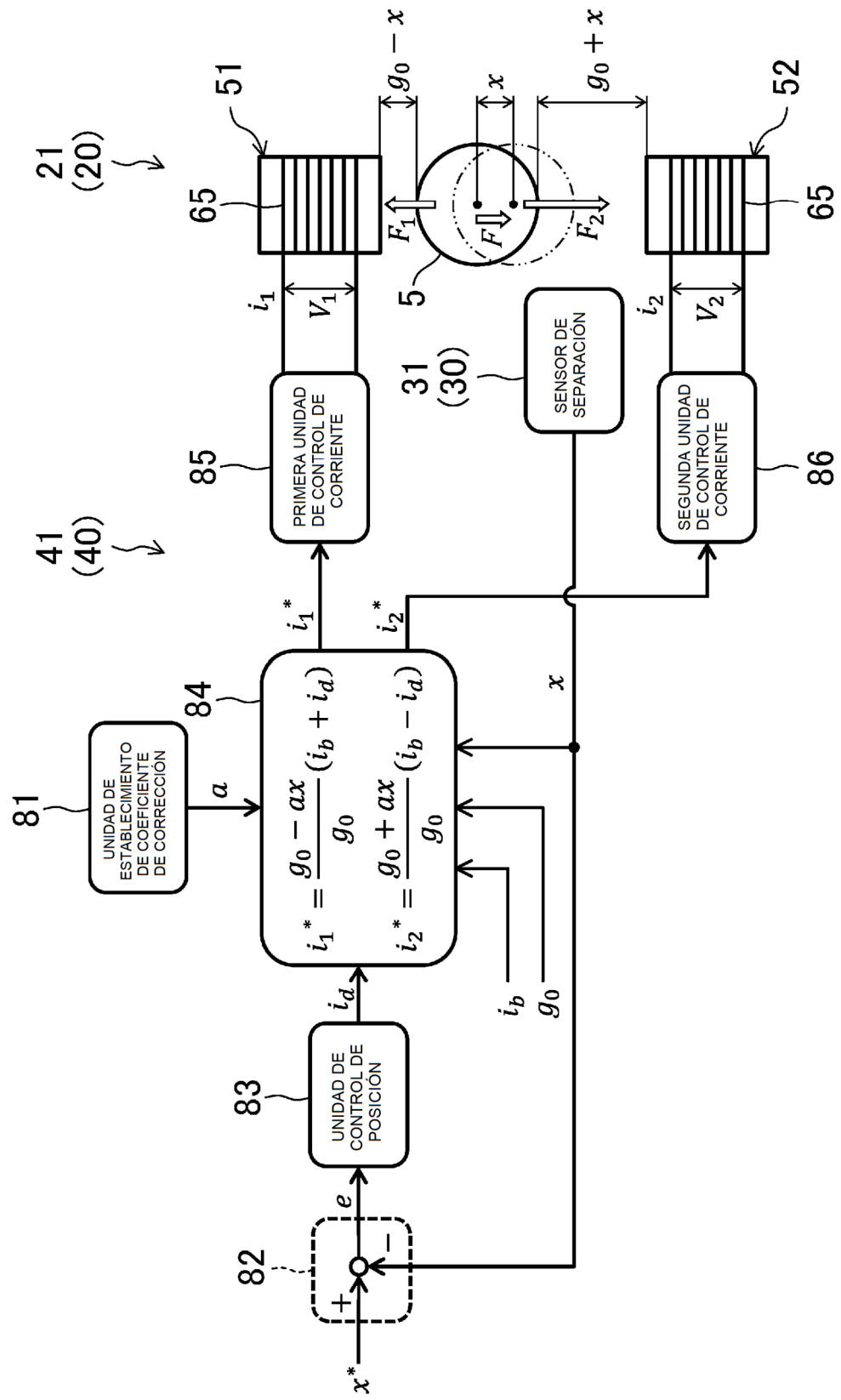


FIG.7

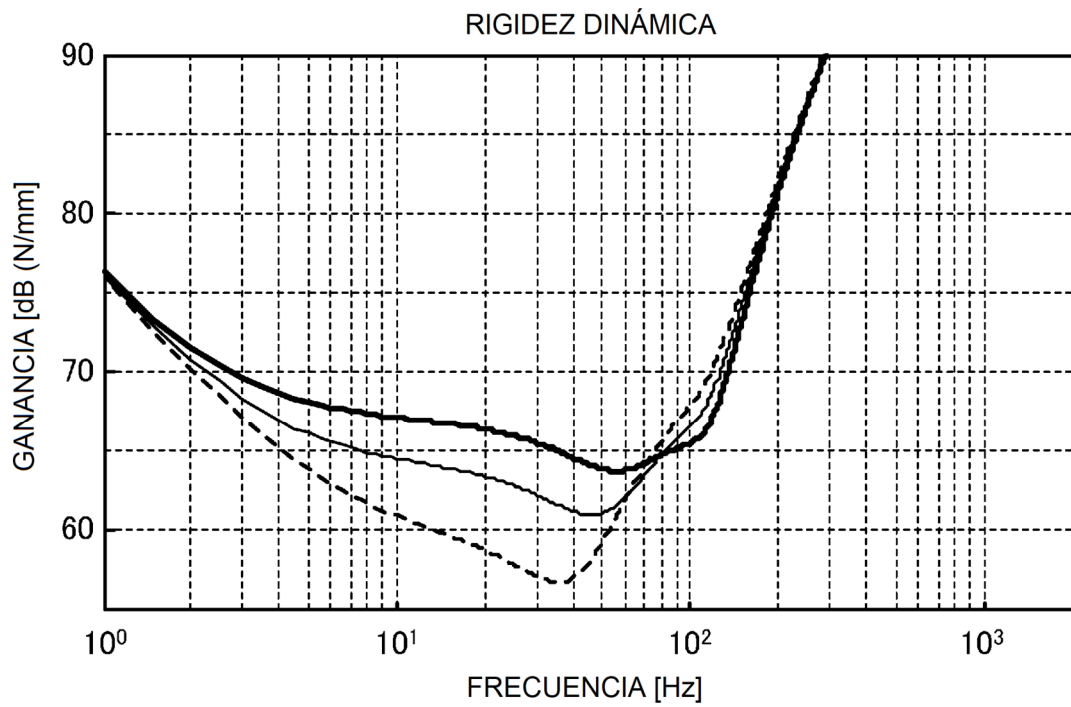


FIG.8

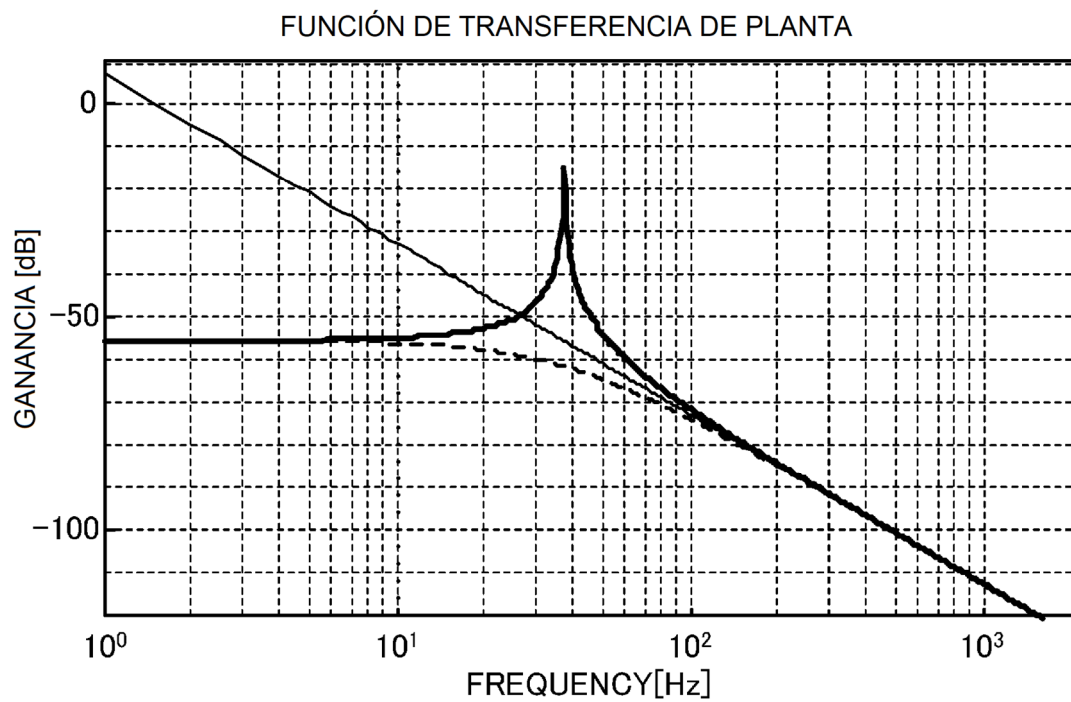


FIG.9

