

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 778 298**

51 Int. Cl.:

**F16C 32/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.10.2015 PCT/US2015/057453**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.05.2016 WO16069522**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.10.2015 E 15791447 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.03.2020 EP 3212948**

54 Título: **Sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético**

30 Prioridad:

**28.10.2014 US 201462069524 P**

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

**10.08.2020**

73 Titular/es:

**CARRIER CORPORATION (100.0%)  
One Carrier Place  
Farmington, Connecticut 06032, US**

72 Inventor/es:

**JIANG, DONG y  
KSHIRSAGAR, PARAG**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 778 298 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**

Sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético

5 **CAMPO TÉCNICO**

La presente invención se refiere en general a sistema electrónicos de protección contra fallos, y más particularmente, a un sistema de accionamiento de cojinete magnético que incluye arquitectura electrónica de protección contra fallos.

10 **ANTECEDENTES**

15 Las máquinas rotativas implementan cojinetes magnéticos activos sin contacto en aplicaciones generalizadas que van desde compresores sin aceite, bombas, volantes para almacenamiento de energía y árboles de rotación. El propio cojinete levita sin contacto en respuesta a la realización de un campo electromagnético generado por un circuito de control de cojinete magnético electrónico que incluye una pluralidad de dispositivos electrónicos de potencia. La avería de uno o más de los dispositivos electrónicos de potencia tales como un fallo de circuito abierto, por ejemplo, puede dar lugar a la pérdida de la levitación del cojinete magnético. Una pérdida en la levitación del cojinete en el momento en que un árbol giratorio (p. ej., un rotor) está girando a alta velocidad puede causar daño grave a los componentes mecánicos.

20 El documento US6297574 describe un aparato de cojinete magnético para montaje en cojinete de un rotor según las características del preámbulo de la reivindicación 1.

25 El cojinete comprende un estator con un devanado de control que tiene al menos tres bucles para la producción de un campo de control magnético.

**RESUMEN**

30 Vista desde un primer aspecto, la invención proporciona un módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético, que comprende: una primera pluralidad de elementos de conmutación y una segunda pluralidad de elementos de conmutación; un primer devanado y un segundo devanado interpuestos entre la primera pluralidad de elementos de conmutación y la segunda pluralidad de elementos de conmutación, la primera y la segunda pluralidad de elementos de conmutación configuradas para funcionar selectivamente en un primer modo y un segundo modo para generar un campo electromagnético; un diodo conectado a través de cada elemento de conmutación entre la primera y la segunda pluralidad de elementos de conmutación para formar una pluralidad de circuitos de tramo de fase bidireccionales; donde el primer modo es configurado para generar una primera corriente de devanado en una primera dirección a través del primer devanado en respuesta a la recepción de una primera señal de salida de PWM, y para generar una segunda corriente de devanado en una segunda dirección opuesta a la primera dirección a través del segundo devanado en respuesta a la recepción de una segunda señal de salida de PWM; y donde el primer devanado está interpuesto entre un primer circuito de tramo de fase bidireccional y un segundo circuito de tramo de fase bidireccional formando un primer circuito puente en H, y el segundo devanado está interpuesto entre el segundo circuito de tramo de fase bidireccional y un tercer circuito de tramo de fase bidireccional formando un segundo circuito puente en H.

45 Además de una o más de las características descritas anteriormente, o como una alternativa, realizaciones adicionales incluyen:

50 una característica, donde el primer circuito puente en H y el segundo circuito puente en H comparten un único tramo de fase común, y donde el primer circuito puente en H es configurado para controlar la primera corriente de devanado a través del primer devanado y el segundo circuito puente en H es configurado para controlar una segunda corriente de devanado a través del segundo devanado, la segunda corriente de devanado controlada para que tenga una dirección opuesta con respecto a la primera corriente de devanado; y

55 una característica, donde cada circuito de tramo de fase bidireccional incluye un primer elemento de conmutación configurado para conducir la corriente basándose en el primer modo e inhibir la corriente basándose en el segundo modo, y un segundo elemento de conmutación configurado para inhibir la corriente basándose en el primer modo y conducir la corriente basándose en el segundo modo.

60 Según una realización de ejemplo, un sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético incluye un módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético como se analizó anteriormente, y un módulo electrónico de detección de fallo en comunicación eléctrica con el módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético. El módulo electrónico de detección de fallo es configurado para producir como salida una señal de comando de fallo en respuesta a la detección de un fallo eléctrico del sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético, donde la señal de comando de fallo inicia la transición del primer modo al segundo modo.

65

Además de una o más de las características descritas anteriormente, o como una alternativa, realizaciones adicionales incluyen:

5 una característica, donde un módulo electrónico controlador de corriente tolerante a fallos configurado para producir como salida selectivamente una primera señal de salida de PWM y una segunda señal de salida de PWM;

10 una característica, donde, en respuesta a la recepción de la señal de comando de fallo, el módulo electrónico controlador de corriente tolerante a fallos desconecta la primera señal de salida de PWM y produce como salida la segunda señal de salida de PWM para conmutar el módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético del primer modo al segundo modo;

15 una característica, donde el módulo de detección de fallo detecta un fallo de circuito abierto del módulo de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético basándose en una comparación entre la al menos una corriente de devanado y un valor umbral; y

una característica, donde el al menos un fallo eléctrico incluye un fallo de circuito abierto inducido en respuesta a una avería del primer elemento de conmutación.

#### 20 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

El objeto que se considera como la invención, se señala particularmente y se reivindica claramente en las reivindicaciones al término de la memoria descriptiva. Lo anterior y otras características y ventajas de la invención resultan evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de una realización preferida tomada en conjunto con los dibujos que la acompañan, en los cuales:

25 La FIG. 1A es un diagrama eléctrico esquemático de un módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos según una realización ejemplar;

30 la FIG. 1B es un diagrama eléctrico esquemático del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos que funciona en un primer modo según una realización ejemplar;

la FIG. 1C es un diagrama eléctrico esquemático del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos que funciona en un segundo modo según una realización ejemplar;

35 la FIG. 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético según una realización ejemplar;

40 la FIG. 3 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento de identificación de fallos realizado por el sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético según una realización ejemplar; y

la FIG. 4 es un diagrama de señales que ilustra el funcionamiento de un sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético según una realización ejemplar.

#### 45 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

La siguiente descripción es de naturaleza meramente ejemplar y no pretende limitar la presente descripción, su aplicación o usos. Debería entenderse que, a lo largo de los dibujos, los números de referencia correspondientes indican partes y características similares o correspondientes. Tal como se usa en esta solicitud, el término módulo se refiere a circuitos de procesamiento que pueden incluir un circuito integrado de aplicación específica (ASIC), un circuito electrónico, un procesador (compartido, dedicado o de grupo) y una memoria que ejecuta uno o más programas de software o firmware, un circuito lógico combinatorio y/u otros componentes adecuados que proporcionan la funcionalidad descrita.

55 Un sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético incluye un módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos configurado para funcionar selectivamente en un primer modo, es decir, un modo normal, y un segundo modo, es decir, un modo auxiliar. El módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos puede incluir un convertidor trifásico y una pluralidad de elementos de conmutación tales como transistores, por ejemplo, para accionar el convertidor trifásico. Cuando funciona en el modo normal, una primera pluralidad de elementos de conmutación se activa para generar una corriente de devanado en una primera dirección, que a su vez acciona el convertidor trifásico y genera una fuerza electromagnética que hace levitar el cojinete del sistema rotatorio.

60 Cuando se selecciona el modo auxiliar (p. ej., en respuesta a la detección de un fallo eléctrico), la primera pluralidad de elementos de conmutación se desactiva y una segunda pluralidad de elementos de conmutación se activan para accionar el convertidor trifásico. De esta manera, la corriente de devanado se genera en una segunda dirección diferente de la primera dirección, mientras que aún acciona el convertidor trifásico. Dado que las fuerzas

electromagnéticas están determinadas por el valor absoluto de la corriente de devanado (es decir, es independiente de la dirección de la corriente de devanado), aun así, puede generarse una fuerza electromagnética similar usando el modo auxiliar y puede mantenerse la levitación del cojinete.

5 Volviendo ahora a la FIG. 1A, un diagrama eléctrico esquemático de un módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100). Según una realización no limitativa, el módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) se construye como un convertidor trifásico de puente completo. El módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) incluye un primer circuito de tramo de fase bidireccional (102a), un segundo circuito de tramo de fase bidireccional (102b) y un tercer circuito de tramo de fase bidireccional (102c). Las corrientes de los dos devanados ( $I_A$ ,  $I_C$ ) son accionadas por los tres circuitos de tramo de fase (102a-102c), que pueden verse como dos puentes en H (103a-103b), que comparten un único tramo de fase común. Cada circuito de puente en H (103a-103b) es configurado para generar una corriente devanado respectiva ( $I_A$ ,  $I_C$ ) capaz de circular en primera y segunda direcciones opuestas. Aunque se muestran tres circuitos de tramo de fase bidireccionales (102a-102c), se aprecia que pueden usarse circuitos bidireccionales con más de dos tramos de fase. Por ejemplo, el módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) puede construirse con dos circuitos de tramo de fase bidireccionales o cuatro circuitos de tramo de fase bidireccionales sin cambiar el alcance de la invención.

El primer circuito de tramo de fase bidireccional (102a) incluye un primer elemento de conmutación (104a) y un segundo elemento de conmutación (104b). El segundo circuito de tramo de fase bidireccional (102b) incluye un tercer elemento de conmutación (104c) y un cuarto elemento de conmutación (104d). El tercer circuito de tramo de fase bidireccional (102c) incluye un quinto elemento de conmutación (104e) y un sexto elemento de conmutación (104f). Según una realización no limitativa, los elementos de conmutación son transistores bipolares de puerta aislada (IGBT). Se aprecia, sin embargo, que pueden usarse otros elementos de conmutación semiconductores incluyendo, pero no limitados a transistores de efecto de campo de óxido metálico (MOSFET). El módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) también incluye diodos (106) conectados a través del colector y el emisor de cada elemento de conmutación (104a-104f). De esta manera, cada una de las corrientes de devanado  $I_A$ ,  $I_C$  puede generarse en primera y segunda direcciones opuestas basándose en la fase (es decir, positiva o negativa) de la señal que acciona los elementos de conmutación (104a-104f) como se analiza con mayor detalle a continuación.

Cada circuito de tramo de fase bidireccional (102a-102c) es de derivación central con un devanado respectivo. Por ejemplo, el primer devanado (108a) incluye un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo está conectado entre el emisor del primer elemento de conmutación (104a) y el colector del segundo elemento de conmutación (104b). El segundo extremo está conectado al emisor del tercer elemento de conmutación (104c) y el colector del cuarto elemento de conmutación (104d). Por consiguiente, se forma un primer circuito puente en H (103a) usando el primer devanado (108a). De manera similar, un segundo devanado (108b) incluye un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo está conectado al emisor del tercer elemento de conmutación (104c) y el colector del cuarto elemento de conmutación (104d). El segundo extremo está conectado al emisor del quinto elemento de conmutación (104e) y el colector del sexto elemento de conmutación (104f). Por consiguiente, se forma un segundo circuito puente en H (103b) usando el segundo devanado (108b). Según una realización, los dos circuitos puente en H (103a-103b) comparten un tramo de fase común, p. ej., el tramo de fase (102-b)

Volviendo ahora a la FIG. 1B, el módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) se ilustra funcionando en un primer modo, p. ej., un modo normal. Según una realización, cada circuito de tramo de fase bidireccional (102a-102c) incluye al menos un elemento de conmutación activado y al menos un elemento de conmutación desactivado. Las líneas oscuras indican los elementos de conmutación que están activados durante el modo normal. En este caso, por ejemplo, el primer elemento de conmutación (104a), el cuarto elemento de conmutación (104d) y el quinto elemento de conmutación (104e) están desactivados, mientras que el segundo elemento de conmutación (104b), el tercer elemento de conmutación (104c) y el sexto elemento de conmutación (104f) están activados. Los elementos de conmutación desactivados (104a), (104d), (104e) inhiben el flujo de corriente, mientras que los elementos de conmutación activados (104b), (104c) y (104f) conducen el flujo de corriente. Por consiguiente, el segundo elemento de conmutación (104b) y el tercer elemento de conmutación (104c) activados generan y controlan una primera corriente de devanado  $I_A$  que circula en una primera dirección a través del primer devanado (108a). El tercer elemento de conmutación (104c) y el sexto elemento de conmutación (104f) activados generan y controlan una segunda corriente de devanado  $I_C$  que circula en una segunda dirección a través del segundo devanado (108b). La segunda corriente de devanado  $I_C$  circula en una dirección opuesta a la primera dirección de la primera corriente de devanado  $I_A$ . La primera corriente de devanado  $I_A$  induce un primer campo electromagnético en respuesta al flujo a través del primer devanado (108a) y la segunda corriente de devanado  $I_C$  genera un segundo campo electromagnético en respuesta al flujo a través del segundo devanado (108b). El primer y el segundo campos electromagnéticos hacen levitar magnéticamente sin contacto uno o más cojinetes.

Volviendo ahora a la FIG. 1C, el módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) se ilustra funcionando en un segundo modo, p. ej., un modo auxiliar. Según al menos una realización, el módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) es conmutado del modo normal al modo auxiliar en respuesta a la detección de uno o más fallos de circuito que incluyen, pero no se limitan a un fallo de circuito abierto. El fallo de circuito abierto puede producirse, por ejemplo, cuando fallan uno o más elementos de conmutación

(104b), (104c), (104f) activados durante el modo de funcionamiento normal. Según una realización, cada circuito de tramo de fase bidireccional (102a-102c) incluye al menos un elemento de conmutación activado y al menos un elemento de conmutación desactivado. Las líneas oscuras indican los elementos de conmutación que están activados durante el modo auxiliar, mientras que las líneas no oscuras indicaban los elementos de conmutación que están desactivados.

Cuando funciona en el modo auxiliar, por ejemplo, el segundo elemento de conmutación (104b), el tercer elemento de conmutación (104c) y el sexto elemento de conmutación (104f) están desactivados, mientras que el primer elemento de conmutación (104a), el cuarto elemento de conmutación (104d) y el quinto elemento de conmutación (104e) están activados. En este caso, los elementos de conmutación activados (104a), (104d), (104e) conducen el flujo de corriente, mientras que los elementos de conmutación desactivados (104b), (104c) y (104f) inhiben el flujo de corriente. Por consiguiente, el primer elemento de conmutación (104a) y el cuarto elemento de conmutación (104d) activados generan y controlan una primera corriente de devanado  $I_A'$  que circula en una primera dirección a través del primer devanado (108a). El tercer elemento de conmutación (104d) y el quinto elemento de conmutación (104e) activados generan y controlan una segunda corriente de devanado  $I_C'$  que circula en una segunda dirección a través del segundo devanado (108b). La segunda corriente de devanado  $I_C'$  circula en una dirección opuesta a la primera dirección de la primera corriente de devanado  $I_A$ . Además, la primera corriente de devanado  $I_A'$  generada durante el modo auxiliar circula en una dirección opuesta (es decir, la fase negativa) con respecto a la primera corriente de devanado  $I_A$  generada durante el modo normal. De manera similar, la segunda corriente de devanado  $I_C'$  generada durante el modo auxiliar circula en una dirección opuesta (es decir, la fase negativa) con respecto a la segunda corriente de devanado  $I_C$  generada durante el modo normal.

La primera corriente de devanado  $I_A'$  induce un primer campo electromagnético en respuesta al flujo a través del primer devanado (108a) y la segunda corriente de devanado  $I_C'$  genera un segundo campo electromagnético en respuesta al flujo a través del segundo devanado (108b). Los campos electromagnéticos se determinan por el valor absoluto de la corriente de devanado  $I_A'$ ,  $I_C'$ . Dado que la fuerza del cojinete magnético es independiente de la dirección de las corrientes de devanado  $I_A$ ,  $I_A'$ ,  $I_C$  y  $I_C'$ , TANTO EL MODO NORMAL COMO EL MODO AUXILIAR PUEDEN GENERAR FUERZAS DE LEVITACIÓN SIMILARES. Por consiguiente, uno o más cojinetes pueden mantenerse en un estado de levitación sin contacto sin interrupción cuando se conmuta del modo normal al modo auxiliar.

Volviendo ahora a la FIG. 2, se ilustra un sistema electrónico de control de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) según una realización no limitativa. El sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) implementa un módulo electrónico de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) y es configurado para detectar diversos fallos eléctricos que incluyen, por ejemplo, un fallo de circuito abierto causado por uno o más elementos de conmutación fallidos (102a-102f). En respuesta a la detección del fallo, el sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) es configurado para controlar el funcionamiento del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100). Por ejemplo, el sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) es configurado para conmutar el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) del modo normal al modo auxiliar en respuesta a la detección de un fallo de circuito abierto.

El sistema de control de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) incluye el módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100), y el módulo electrónico de control de posición (202), un módulo electrónico controlador de corriente tolerante a fallos (204), y un módulo electrónico de detección de fallo (206). El módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) funciona según las descripciones analizadas en detalle anteriormente. El módulo de control de posición (202) determina un error de posición de un árbol acoplado a un cojinete en levitación. De esta manera, la posición del cojinete, y por lo tanto el árbol, dicta el error de posición. Basándose en el valor nominal de la fuerza magnética, se predetermina la corriente de polarización  $I_{bias}$ , y a su vez se genera una primera corriente de devanado de referencia ( $i_{a\_ref}$ ) y una segunda corriente de devanado de referencia ( $i_{c\_ref}$ ).

El módulo controlador de corriente tolerante a fallos (204) está en comunicación de señal con el módulo de control de posición (202) para recibir la primera señal de corriente de devanado de referencia ( $i_{a\_ref}$ ) y la segunda señal de corriente de devanado de referencia ( $i_{c\_ref}$ ). El módulo controlador de corriente tolerante a fallos (204) también recibe señales de corriente de devanado procedentes de uno o más sensores de corriente configurados para detectar las corrientes de devanado que circulan a través de los devanados incluidos en el módulo de accionamiento tolerante a fallos (100). Como se ilustra en la Fig. 2, por ejemplo, el módulo controlador de corriente tolerante a fallos (204) recibe una primera señal de corriente de devanado ( $i_a$ ) indicativa de la primera corriente de devanado ( $I_A$ ) y una segunda señal de corriente de devanado ( $i_c$ ) indicativa de la segunda corriente de devanado ( $I_C$ ).

El módulo controlador de corriente tolerante a fallos (204) incluye además una primera unidad reguladora de corriente (208a), una segunda unidad reguladora de corriente (208b), un primer accionador de canal de modulación por anchura de impulsos (del inglés "pulse width modulation", PWM) (210a), un segundo accionador de canal de PWM (210b) y un mezclador de canales de PWM (212). El primer accionador de canal de PWM de corriente (210a) genera una primera señal de salida de PWM (214a) que acciona los elementos de conmutación (104a), (104c) y (104f) activados durante el modo normal. El segundo accionador de canal de PWM (210b) genera una segunda señal de salida de PWM (214b)

que acciona los elementos de conmutación (104a), (104d) y (104e) activados durante el modo auxiliar. La primera unidad reguladora de corriente (208a) recibe primera y segunda señales de corriente de referencia ( $i_{a\_ref}$ ), ( $i_{c\_ref}$ ) en fase positiva, mientras que la segunda unidad reguladora de corriente (208b) recibe primera y segunda señales de corriente de referencia ( $-i_{a\_ref}$ ), ( $-i_{c\_ref}$ ) en fase negativa (es decir, señales inversas). Basándose en una comparación entre las señales de corriente de referencia ( $i_{a\_ref}$ ,  $-i_{a\_ref}$ ,  $i_{c\_ref}$ ,  $-i_{c\_ref}$ ) y la primera y la segunda señales de corriente de devanado ( $I_A$ ,  $I_C$ ), el primer y el segundo accionador de canal de PWM (210a), (210b) generan primera y segunda señales de salida de PWM respectivas (214a), (214b). Un primer canal de PWM (216a) está en comunicación de señal con terminales de puerta de los elementos de conmutación de modo normal (104b), (104c) y (104f) y un segundo canal de PWM (216b) está en comunicación de señal con terminales de puerta de los elementos de conmutación de modo auxiliar (104a), (104d) y (104e). De esta manera, la primera señal de salida de PWM (214a) acciona los elementos de conmutación de modo normal (104b), (104c) y (104f), y la segunda señal de salida de PWM (214b) acciona los elementos de conmutación de modo auxiliar (104a), (104d) y (104e).

El mezclador de canales de PWM (212) procesa la primera y la segunda señales de salida de PWM (214a, 214b) junto con una señal de comando de fallo (218) generada por el módulo de detección de fallo (206). La señal de detección de fallo (218) ordena al mezclador de canales de PWM (212) que produzca como salida selectivamente la primera señal de salida de PWM (214a) o la segunda señal de salida de PWM (216b). De esta manera, puede iniciarse el modo normal o el modo auxiliar del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100), como se analiza en mayor detalle más adelante.

Para iniciar el modo normal del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100), las señales de corriente de referencia de fase positiva ( $i_{a\_ref}$ ,  $i_{c\_ref}$ ) se envían a los reguladores de corriente respectivos (208a), (208b). Los ciclos de trabajo correspondientes también se generan y envían a los accionadores de canal de PWM respectivos (210a), (210b). Se genera la primera señal de salida de PWM (214a) para accionar los elementos de conmutación de modo normal (104b), (104c), (104f) y se impide (es decir, se bloquea) que la segunda señal de salida de PWM (214b) para accionar los elementos de conmutación de modo auxiliar (104a), (104d), (104e) alcance el segundo canal de PWM (216b). Por consiguiente, se inicia el modo normal del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100). Cuando se genera la señal de comando de fallo (218), las corrientes de referencia de fase negativa ( $-i_{a\_ref}$ ,  $-i_{c\_ref}$ ) se producen como salida al segundo regulador de corriente (208b). También se generan los ciclos de trabajo correspondientes y se envían al segundo accionador de canal de PWM (210b). La segunda señal de salida de PWM (214b) para accionar los elementos de conmutación de modo auxiliar (104a), (104d), (104e) se produce como salida al segundo canal de PWM (216), mientras que se impide que la primera señal de PWM (214a) para accionar los elementos de conmutación de modo normal (104b), (104c), (104f) alcance el primer canal de PWM (216a). Por consiguiente, se inicia el modo auxiliar del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100).

El módulo de detección de fallo (206) es configurado para detectar uno o más fallos eléctricos del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) cuando funciona en el modo normal. Según una realización, el módulo de detección de fallo (206) ejecuta un procedimiento de identificación de fallos sistemático que comprende una pluralidad de operaciones de identificación que determinan diferentes en cada ciclo de control. Ahora se describirá el procedimiento de identificación con referencia a la Fig. 4. Una primera operación de identificación es configurada para detectar un escenario de protección de sobreintensidad. Por ejemplo, si alguna de las corrientes de devanado  $I_A$ ,  $I_C$  excede del límite de sobreintensidad ( $I\_limit1$ ) en la operación (300), se detecta un fallo de cortocircuito, por ejemplo, y todas las señales de salida de PWM (es decir, (214a) y (214b)) son bloqueadas en la operación (302) de modo que todo el sistema de accionamiento de motor y el accionamiento de cojinete magnético (100) son desactivados.

Si las corrientes de devanado  $I_A$ ,  $I_C$  no exceden el límite de sobreintensidad ( $I\_limit1$ ) en la operación (300), en la operación (304) se realiza una segunda operación de identificación para detectar un fallo externo. La detección de un fallo externo está basada en una señal de fallo generada por el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100). Si el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) detecta un fallo en la operación (304), tal como un fallo de desaturación detectado por un dispositivo electrónico de potencia, se activa el control tolerante a fallos y la señal de comando tolerante a fallos ordena al mezclador de canales de PWM (212) que desconecte la primera señal de salida de PWM (214a) y produzca como salida la segunda señal de salida de PWM (214b). Por ejemplo, un accionador de protección contra fallos de desaturación (DESAT) configurado con protección DESAT de sobreintensidad puede producir como salida puede ser aprovechada con el controlador de modo que el controlador puede, por lo tanto, detectar el fallo sin detectar corriente y desconectar el conmutador antes de la avería. De esta manera, los elementos de conmutación de modo normal (104b), (104c), (104f) son desactivados y los elementos de conmutación de modo auxiliar (104a), (104d), (104e) son activados de modo que el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) es conmutado del modo normal al modo auxiliar en la operación (306).

Si no se detecta ningún fallo en la operación (304), una tercera operación de identificación es configurada para detectar un fallo eléctrico basándose en un total de corriente de devanado (es decir,  $I_A+I_C$ ) y un valor umbral ( $I\_limit2$ ) en la operación (308). Al funcionar en el modo normal, un total (es decir, la suma) de la primera y la segunda corrientes de devanado ( $I_A+I_C$ ) será aproximadamente el doble que la corriente de polarización (es decir,  $2 \times I\_bias$ ). Como se

mencionó anteriormente, la corriente de polarización ( $I_{\text{bias}}$ ) ha sido predeterminada. Así, el valor umbral ( $I_{\text{limit2}}$ ) puede estar basado en una posición del cojinete. Es decir, ( $I_{\text{limit2}}$ ) puede establecerse, por ejemplo, igual a aproximadamente  $1,5 \times I_{\text{bias}}$ . Si  $I_A + I_C$  es inferior al ( $I_{\text{limit2}}$ ) en la operación (308), se detecta un fallo de circuito abierto y el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) es conmutado al modo auxiliar en la operación (310). Si las tres etapas de identificación determinan que no existe ningún fallo, el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) continúa funcionando en modo normal en la operación (312).

Con referencia a la Fig. 4, un diagrama de señales ilustra el funcionamiento de un sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético según una realización no limitativa. En este ejemplo, el módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100) está funcionando inicialmente en el modo normal. La señal de Canal 1 (Ch1) indica que una posición de un árbol giratorio acoplado a un cojinete levitante existe en una posición centrada. La señal de Canal 2 (Ch2) indica el funcionamiento de una señal de puerta de elemento de conmutación central. La señal de Canal 3 (Ch3) y la señal de Canal 4 (Ch4) indican la primera y la segunda corrientes de devanado ( $I_A$ ,  $I_C$ ), respectivamente, que están inicialmente en fase positiva. En el tiempo ( $t_1$ ), Ch2 se corta debido, por ejemplo, a un fallo de circuito abierto, y la primera y la segunda corrientes de devanado ( $I_A$ ,  $I_C$ ) comienzan a descender como se indica por Ch3 y Ch4.

Aproximadamente en  $t_2$ , el módulo de detección de fallo (206) detecta el fallo y genera la señal de comando tolerante a fallos. La señal de comando tolerante a fallos ordena al mezclador de canales de PWM (212) que inhiba la primera señal de salida de PWM (214a) y produzca como salida la segunda señal de salida de PWM (214b), iniciando así el modo auxiliar del módulo de accionamiento de cojinete magnético tolerante a fallos (100). Por consiguiente, la primera y la segunda corrientes de devanado  $I_A'$ ,  $I_C'$  se generan en fase negativa en aproximadamente 1 milisegundo (ms) desde el tiempo  $t_1$ . Se aprecia que el tiempo de detección también podría ser inferior a 1 ms. De esta manera, puede mantenerse la levitación del cojinete de modo que el eje de posición del árbol giratorio se mantenga centrado entre dos límites de posición con poca oscilación momentánea como se indica por Ch1. Por lo tanto, el sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) puede detectar eficazmente uno o más fallos tales como un fallo de circuito abierto, por ejemplo, y mantener satisfactoriamente la levitación del cojinete y la posición axial de un árbol de rotación correspondiente. Además, el sistema de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) permite reiniciar el sistema con el modo de trabajo de respaldo. Es mucho más fácil que reemplazar el hardware y el coste de mantenimiento se reduce.

Aunque la invención se ha descrito en detalle en relación con solo un número limitado de realizaciones, debería entenderse fácilmente que la invención no está limitada a tales realizaciones descritas. En cambio, la invención puede modificarse para incorporar cualquier número de variaciones, alteraciones, sustituciones o disposiciones equivalentes no descritas hasta este momento, pero que son acordes al alcance de la invención como se define por las reivindicaciones. Además, aunque se han descrito diversas realizaciones de la invención, ha de entenderse que los aspectos de la invención pueden incluir solo algunas de las realizaciones descritas. Por consiguiente, la invención no debe verse como limitada por la descripción anterior, sino que solo está limitada por el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

## REIVINDICACIONES

1. Un módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100), que comprende:  
 5 una primera pluralidad de elementos de conmutación (104a, 104c, 104e) y una segunda pluralidad de elementos de conmutación (104b, 104d, 104f);  
 un primer devanado (108a) y un segundo devanado (108b)  
 10 interpuestos entre la primera pluralidad de elementos de conmutación y la segunda pluralidad de elementos de conmutación, la primera y la segunda pluralidad de elementos de conmutación configuradas para funcionar selectivamente en un primer modo y un segundo modo para generar un campo electromagnético;  
 un diodo (106a-f)  
 15 conectado a través de cada elemento de conmutación entre la primera y la segunda pluralidad de elementos de conmutación para formar una pluralidad de circuitos de tramo de fase bidireccionales;
- caracterizado porque**
- 20 el primer modo es configurado para generar una primera corriente de devanado en una primera dirección a través del primer devanado (108a) en respuesta a la recepción de una primera señal de salida de PWM, y para generar una segunda corriente de devanado en una segunda dirección opuesta a la primera dirección a través del segundo devanado (108b) en respuesta a la recepción de una segunda señal de salida de PWM; y  
 25 donde el  
 primer devanado (108a) está interpuesto entre un primer circuito de tramo de fase bidireccional (108a) y un segundo circuito de tramo de fase bidireccional (102b) formando un primer circuito puente en H (103a), y el  
 30 segundo devanado (108b) está interpuesto entre el segundo circuito de tramo de fase bidireccional y un tercer circuito de tramo de fase bidireccional (102c) formando un segundo circuito puente en H (103b).
2. El módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100) según la reivindicación 1, donde el primer circuito puente en H (103a) y el segundo circuito puente en H (103b) comparten un  
 35 único tramo de fase común, y donde el primer circuito puente en H es configurado para controlar la primera corriente de devanado a través del primer devanado y el segundo circuito puente en H es configurado para controlar la  
 segunda corriente de devanado a través del segundo devanado, la segunda corriente de devanado controlada para  
 40 que tenga una dirección opuesta con respecto a la primera corriente de devanado.
3. El módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100) según la reivindicación 2, donde cada circuito de tramo de fase bidireccional (102a, 102b, 102c) incluye un primer elemento de  
 45 conmutación (104a, 104c, 104e) configurado para conducir la corriente basándose en el primer modo e inhibir la corriente basándose en el segundo modo, y un segundo elemento de conmutación (104b, 104d, 104f) configurado para inhibir la corriente basándose en el primer modo y conducir la corriente basándose en el segundo modo.
4. Un sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) que comprende:  
 50 un módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético según la reivindicación 1, 2 o 3; y  
 un módulo electrónico de detección de fallo (206) configurado para producir como salida una señal de comando de fallo en respuesta a la detección de un fallo eléctrico del sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético, iniciando la señal de comando de fallo la transición del primer modo al segundo modo.
5. El sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) según la reivindicación 4, que comprende además un módulo electrónico controlador de corriente tolerante a fallos (204) configurado para producir como salida selectivamente una primera señal de salida de PWM y una segunda señal de salida de PWM.
6. El sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) según la  
 60 reivindicación 5, donde, en respuesta a la recepción de la señal de comando de fallo, el módulo electrónico controlador de corriente tolerante a fallos (204) desconecta la primera señal de salida de PWM y produce como salida la segunda señal de salida de PWM para conmutar el módulo electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100) del primer modo al segundo modo.
7. El sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) según la  
 65 reivindicación 4, donde el módulo electrónico de detección de fallo (206) detecta un fallo de circuito abierto del módulo



de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (100) basándose en una comparación entre la al menos una corriente de devanado y un valor umbral.

- 5 8. El sistema electrónico de accionamiento tolerante a fallos de cojinete magnético (200) según la reivindicación 7, donde el al menos un fallo eléctrico incluye el fallo de circuito abierto inducido en respuesta a una avería del primer elemento de conmutación (104a, 104c, 104e).

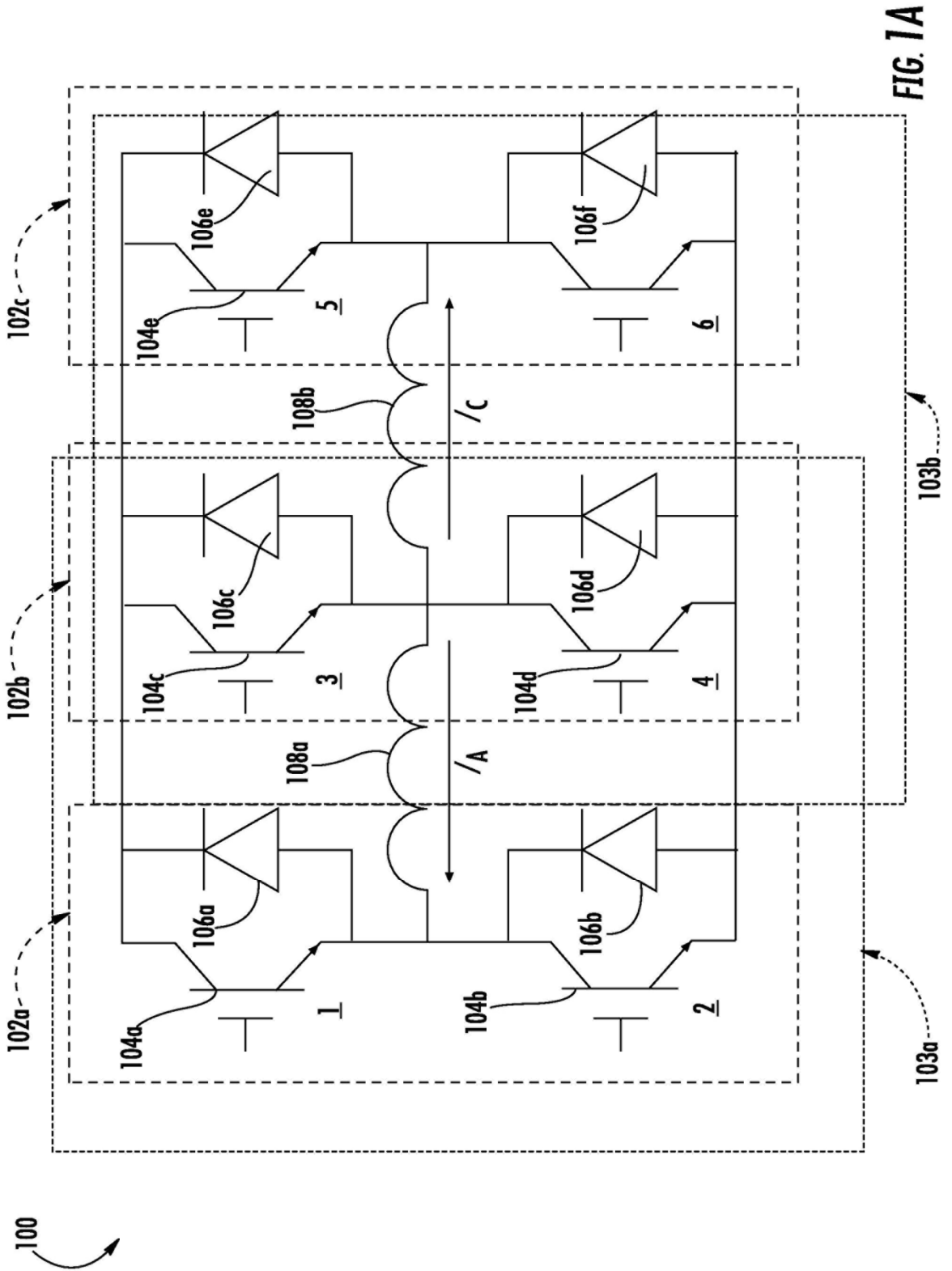


FIG. 1A

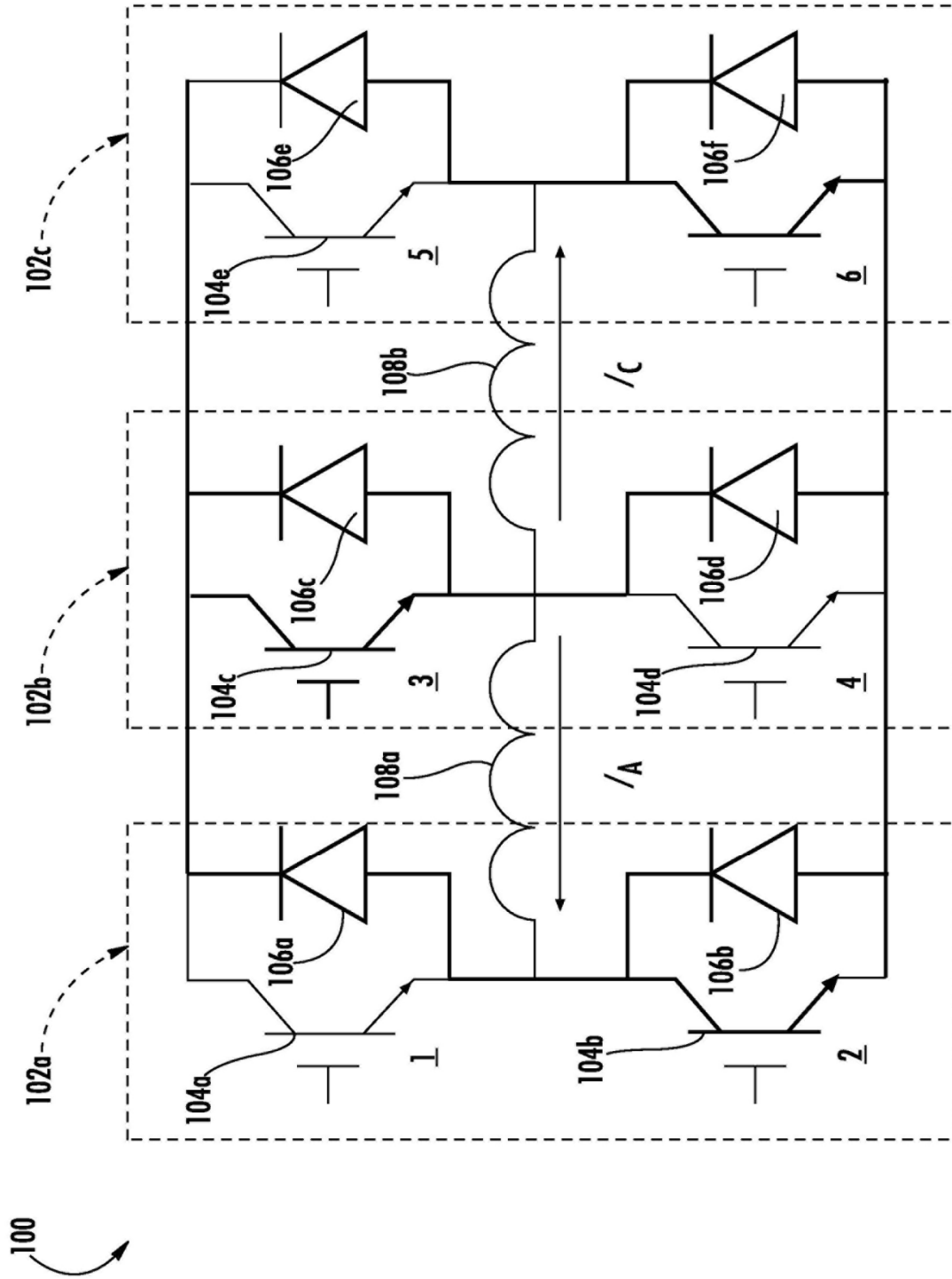


FIG. 1B

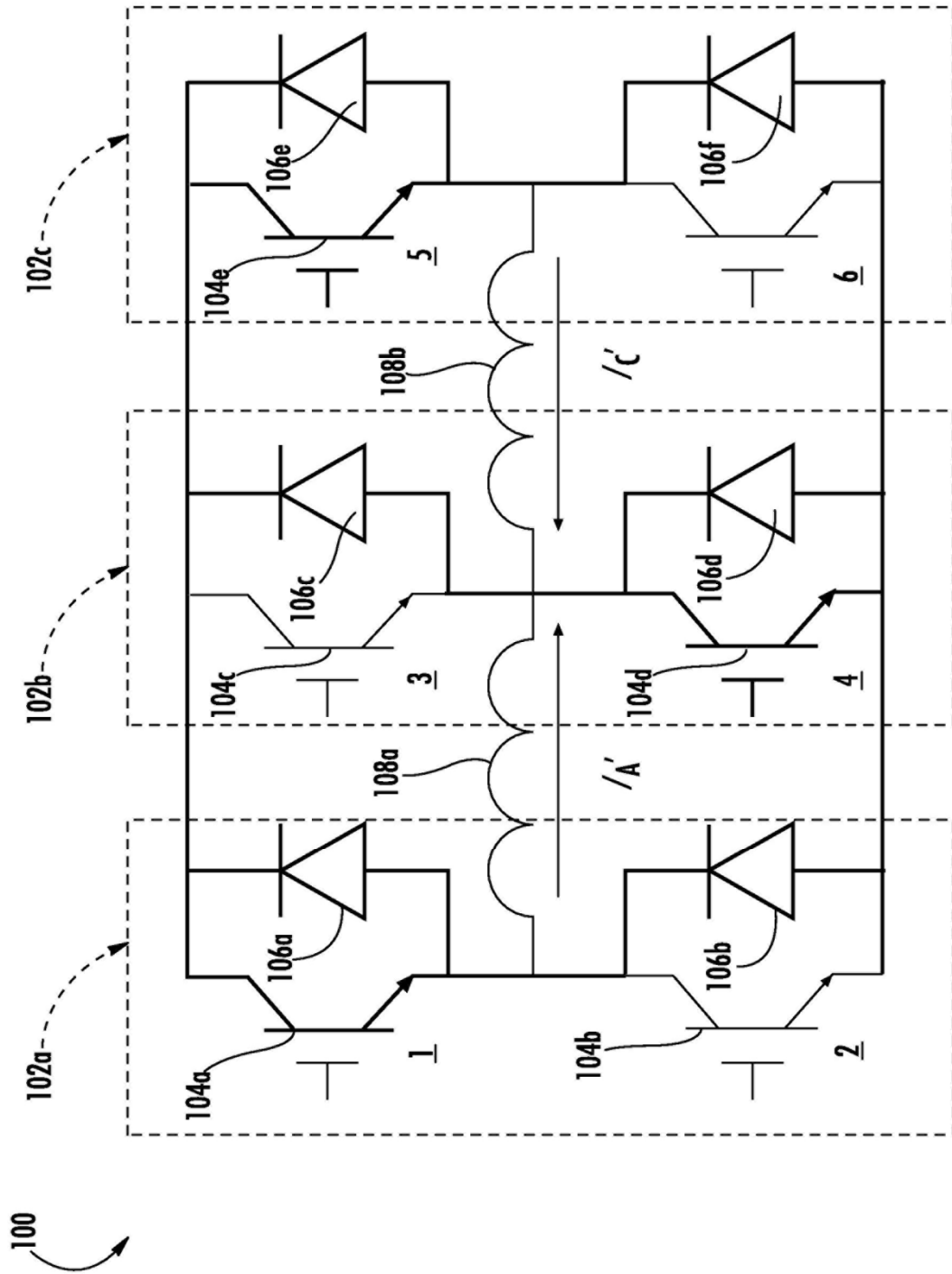


FIG. 1C

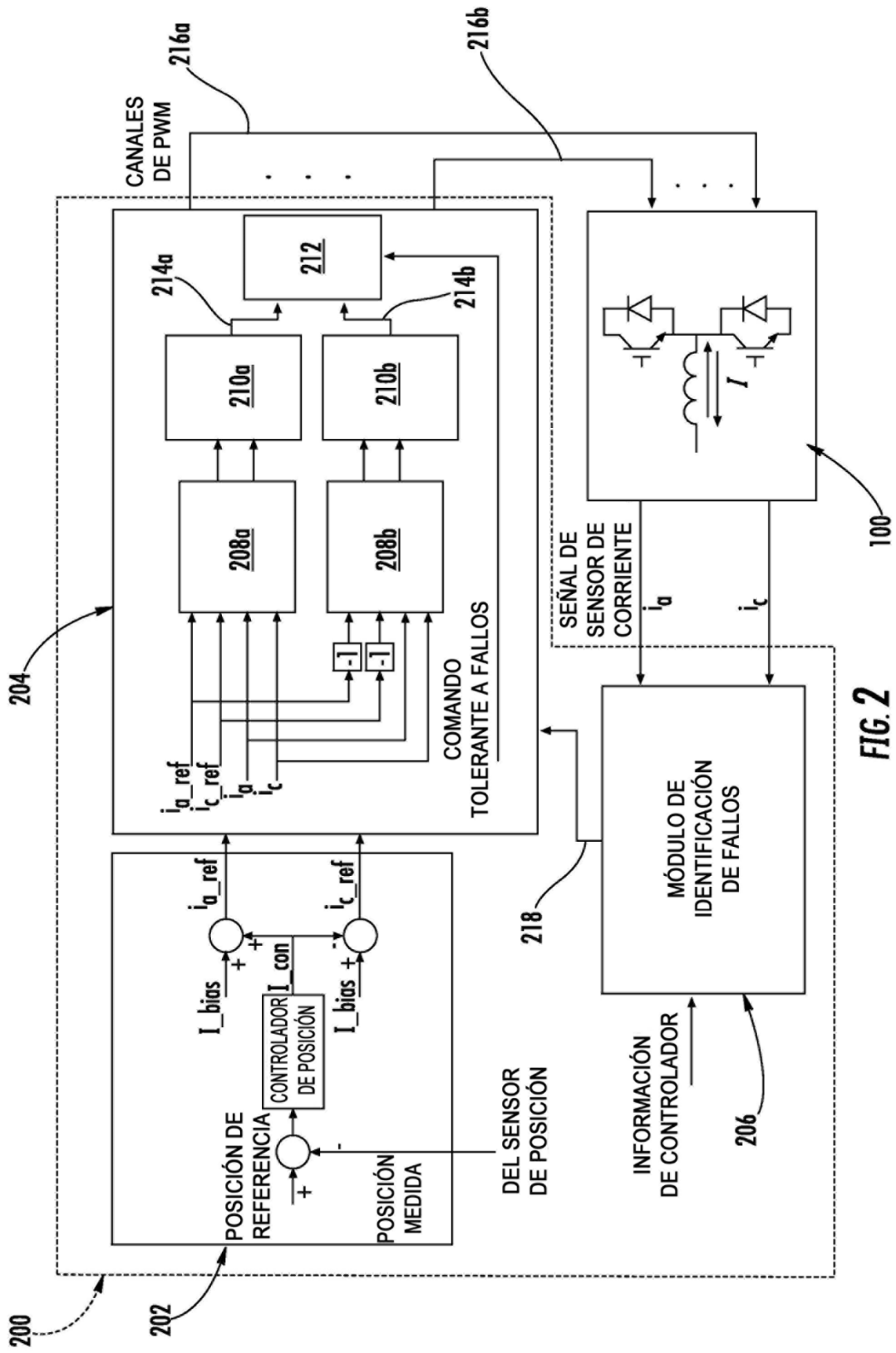


FIG. 2

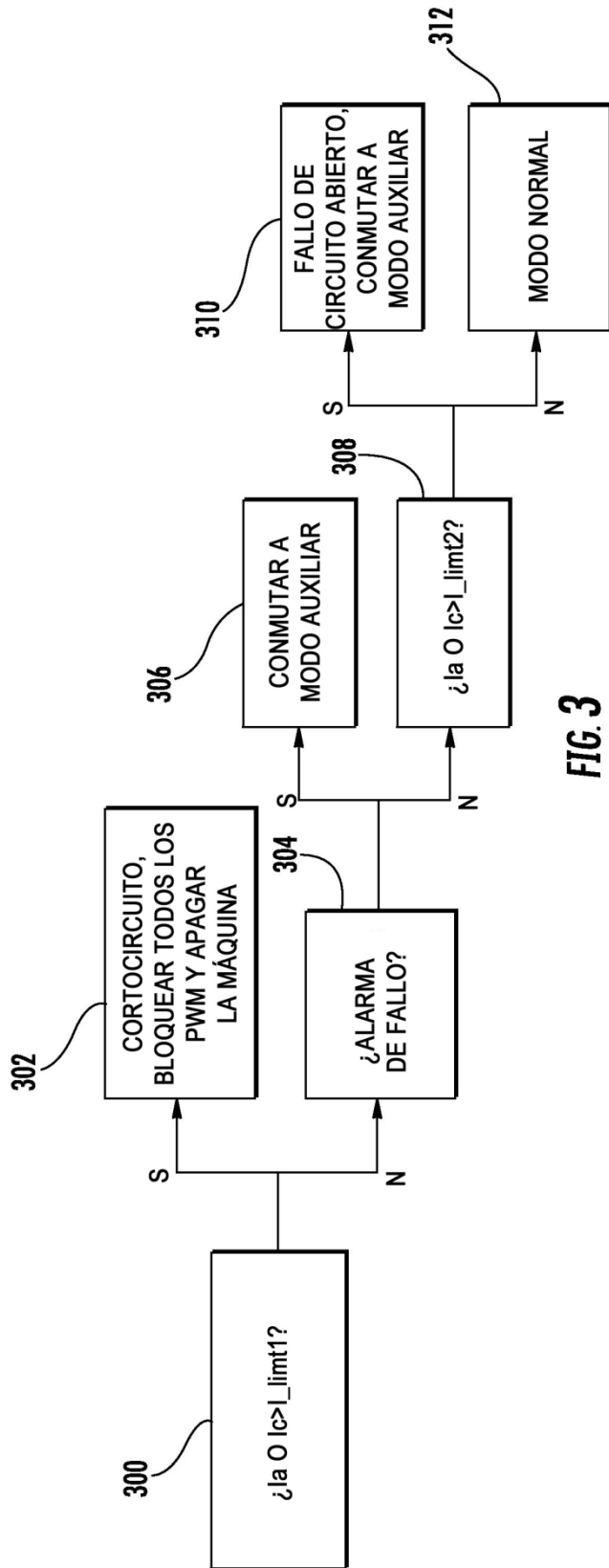


FIG. 3

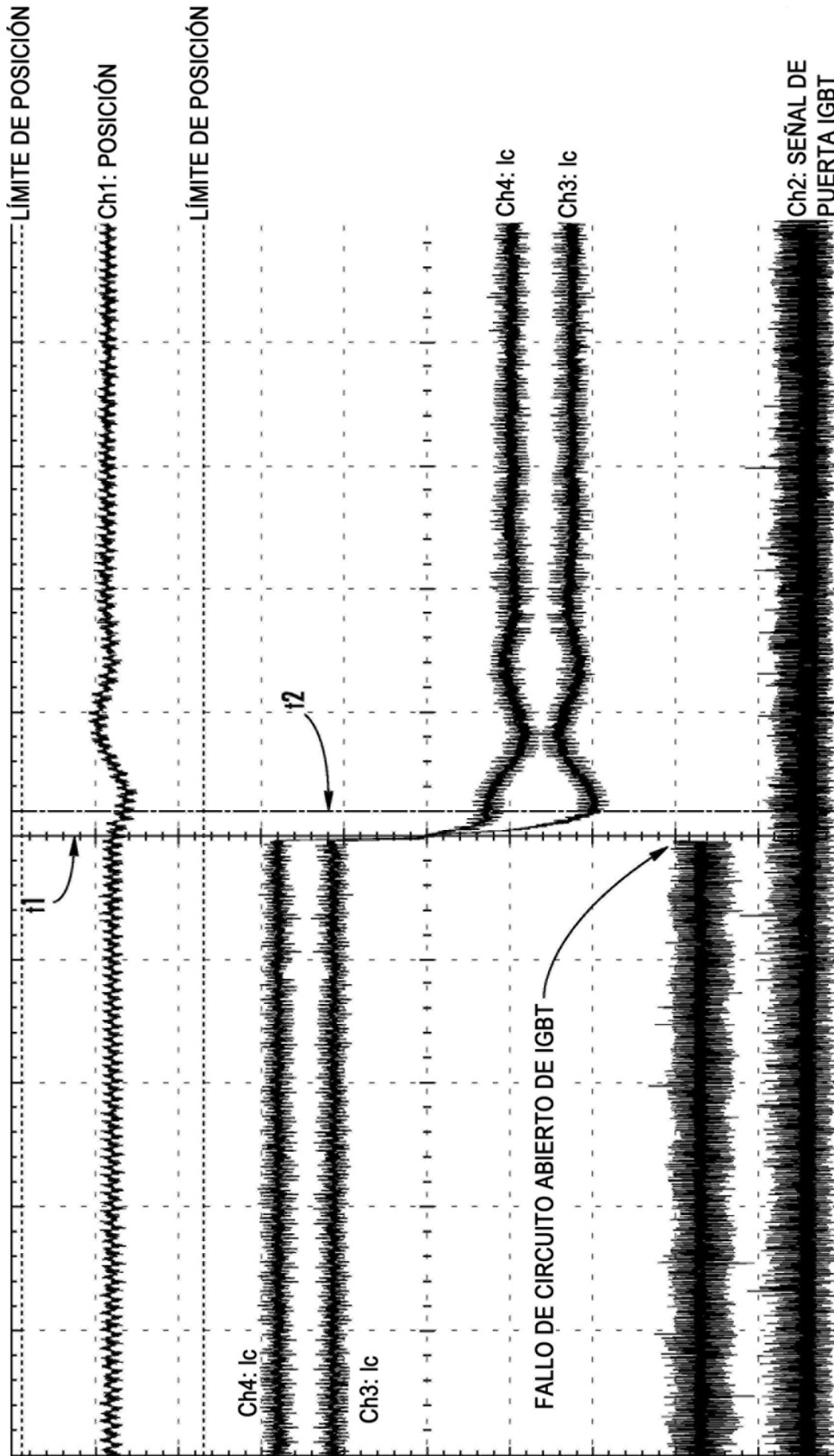


FIG. 4