

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 993 283**

51 Int. Cl.:

H02K 1/24

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.08.2019** **PCT/US2019/045456**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.02.2020** **WO20033512**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.08.2019** **E 19759138 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.10.2024** **EP 3834274**

54 Título: **Motores eléctricos**

30 Prioridad:

07.08.2018 US 201862715386 P

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

26.12.2024

73 Titular/es:

TAU MOTORS, INC. (100.00%)
615 Old Country Road
San Carlos, CA 94070, US

72 Inventor/es:

RUBIN, MATTHEW J.;
PENNINGTON, WALTER WESLEY, III;
STEVENSON, GREGORY GORDON;
AMBRECHT, ADAM DANIEL y
DOS SANTOS, EUZELI CIPRIANO, JR.

74 Agente/Representante:

IZQUIERDO BLANCO, María Alicia

ES 2 993 283 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

Motores eléctricos

5 **[0001]** Esta solicitud reivindica la prioridad de la solicitud de patente provisional en Estados Unidos n.º de serie 62/715.386, presentada el 7 de agosto de 2018.

CAMPO TÉCNICO

10 **[0002]** Esta invención se refiere a motores eléctricos y a la operación de tales motores.

ANTECEDENTES

15 **[0003]** Dos de las maneras de caracterizar el rendimiento de los motores eléctricos son su par/fuerza y su potencia de salida. La potencia de salida de un motor rotativo es el producto de un par que genera un motor y una velocidad angular de su árbol de salida. Para un motor lineal, la potencia de salida es un producto de la fuerza lineal y la velocidad. Convencionalmente, hay dos medios principales para aumentar directamente el rendimiento del motor: (1) aumentando el tamaño del motor y (2) creando un campo magnético más intenso dentro del propio motor. Aunque el tamaño final de un motor limita sus aplicaciones útiles específicas, aumentar el campo magnético para incrementar así la fuerza electromagnética puede considerarse clave para permitir un mayor rendimiento del motor y aplicaciones más amplias de la tecnología de motores. Se necesitan nuevos diseños de motores que ofrezcan un rendimiento aceptablemente alto para permitir aplicaciones de accionamiento directo en un paquete compacto, por ejemplo, altas densidades de par/fuerza y potencia.

25 **[0004]** El documento EP 0 736 952 A1 describe un motor eléctrico que comprende:
un estator que define múltiples polos del estator con devanados eléctricos asociados, en el que el estator comprende un componente magnético activo con múltiples polos activos asociados a los devanados eléctricos y un rotor que tiene una superficie móvil con respecto a una superficie del estator en una dirección de movimiento, comprendiendo el rotor
30 múltiples polos del rotor, siendo el rotor móvil con respecto al estator y definiendo, junto con el estator, un espacio nominal entre los polos del estator y los polos del rotor, comprendiendo los polos del rotor un material de polos magnéticamente permeable, en el que el rotor comprende barreras de flujo entre polos adyacentes del rotor, comprendiendo cada una de las barreras de flujo un segundo material que tiene una conductividad eléctrica diferente de la del material de los polos magnéticamente permeable, en el que la conductividad eléctrica de las barreras de flujo es mayor que la conductividad eléctrica del material de los polos magnéticamente permeable, en el que las barreras de flujo están aisladas eléctricamente
35 entre sí fuera de los polos del rotor, y el rotor comprende un componente magnético pasivo que define una serie de polos pasivos espaciados del material de los polos magnéticamente permeable que define ranuras entre los mismos, extendiéndose las ranuras en un ángulo distinto de cero con respecto a la dirección de movimiento, en el que cada ranura contiene una barrera de flujo respectiva que comprende el segundo material que se extiende a lo largo de la ranura y forma una trayectoria eléctricamente conductora a lo largo de la ranura, y en el que las barreras de flujo están fijadas al
40 material de los polos magnéticamente permeable dentro de las ranuras.

SUMARIO

45 **[0005]** La invención se define en las reivindicaciones. Varios ejemplos de la invención presentan un motor con barreras de flujo dispuestas entre polos pasivos para alterar la trayectoria del flujo magnético y proporcionar un mayor componente de fuerza motriz inducida magnéticamente alineada con la dirección de movimiento (para proporcionar par útil y/o fuerza lineal).

50 **[0006]** Un motor eléctrico según la invención se define por la reivindicación 1.

[0007] Por "separación nominal" se entiende una separación entre superficies relativamente móviles de los polos del estator (o componente magnético activo) y del rotor (o componente magnético pasivo), a través de la cual se extiende el flujo magnético durante el funcionamiento del motor para inducir una fuerza en el rotor (o componente magnético pasivo). Utilizamos el término "componente magnético activo" para referirnos a la parte de un motor que incluye devanados eléctricos asociados con estructuras magnéticamente permeables respectivas en las que el flujo magnético es generado por la corriente que fluye en los devanados. Los polos de un "componente magnético activo" se denominan "polos activos". Por lo general, los devanados eléctricos se mantendrán en relación fija con los polos activos correspondientes. Un estator bobinado es un ejemplo de componente magnético activo. Utilizamos el término "componente magnético pasivo" para referirnos a la porción del motor sobre la que el flujo magnético generado por el componente magnético activo induce una fuerza motriz que se extiende hacia el componente magnético pasivo a través de la separación nominal. Los polos de un "componente magnético pasivo" se denominan "polos pasivos". Un rotor no bobinado es un ejemplo de componente magnético pasivo. La separación nominal puede ser radial, como en un motor de separación radial, o axial, como en un motor de separación axial, por ejemplo, y puede llenarse con aire u otro gas, o incluso con un líquido, como un refrigerante.

65 **[0008]** Por "barrera de flujo" entendemos una estructura que define al menos una trayectoria eléctricamente conductora en la que un flujo de corriente es inducido por un campo magnético cambiante. Generalmente, se inducirán corrientes

parásitas en la barrera de flujo que causan interferencia destructiva de un campo magnético inminente, de tal manera que la barrera de flujo actúa efectivamente para inhibir un cambio en el flujo magnético durante la operación del motor, que en algunos casos resultará en una fuerza repulsiva que actuará para aumentar una fuerza motriz inducida en los polos pasivos.

[0009] Por "conductividad eléctrica" entendemos la propensión de un material a conducir la electricidad. Con respecto a las estructuras en las que la corriente se limita a fluir en una dirección principal, como un cable, nos referimos a la conductividad en esa dirección principal.

[0010] Por "aisladas eléctricamente entre sí" entendemos que la resistencia óhmica a un potencial eléctrico dentro de una barrera de flujo es al menos 10 veces menor que la resistencia óhmica entre barreras de flujo. Hay que decir que están aisladas entre sí fuera del material ferromagnético no excluye que estén en comunicación eléctrica a través del material ferromagnético de las capas. De hecho, en muchos casos las barreras de flujo están conectadas eléctricamente a través del material ferromagnético.

[0011] En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo comprenden, cada una, una barra eléctricamente conductora que atraviesa múltiples interfaces de la pila.

[0012] Por "conductor eléctrico" entendemos que un material o estructura es al menos tan conductor como el carbono amorfo a las tensiones típicas de funcionamiento de un motor, o tiene una conductividad superior a 1.000 Siemens por metro. Ejemplos de materiales eléctricamente conductores incluyen plata, cobre, aluminio, níquel, hierro y acero eléctrico (de grano orientado u otros). Ejemplos de materiales no conductores incluyen resinas sin relleno, aire, madera y algodón. Utilizamos el término "material aislante" para referirnos a materiales no conductores o no conductores de la electricidad.

[0013] En algunos ejemplos, la barra conductora de electricidad contiene al menos un 20 por ciento, en algunos casos un 40 por ciento, o en algunos casos un 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto. En algunos casos, cada una de las barreras de flujo que tiene una barra conductora de electricidad también tiene una capa conductora de electricidad de un material diferente al de la barra y que forma al menos parcialmente una superficie exterior del rotor.

[0014] En algunas configuraciones, la barra contiene al menos un uno por ciento, en algunos casos un cinco por ciento, o en algunos casos un 15 por ciento por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono.

[0015] La barra puede tener, o consistir en, capas discretas que se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de diferentes materiales. En algunos casos, uno de los materiales diferentes incluye o consiste esencialmente en cobre, y otro de los materiales diferentes incluye o consiste esencialmente en níquel.

[0016] En muchos casos, la barra tiene una superficie expuesta orientada hacia la separación nominal.

[0017] En algunos motores, cada una de las barreras de flujo que tiene una barra eléctricamente conductora incluye al menos dos barras eléctricamente conductoras conectadas eléctricamente entre sí en extremos opuestos de la pila para formar un bucle conductor.

[0018] En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una forma, en sección transversal tomada paralelamente a las capas de material ferromagnético de la pila, que incluye dos salientes separados que se extienden fuera de la separación nominal, y una capa superficial que conecta los dos salientes. Los dos salientes pueden estar dispuestos, por ejemplo, en lados opuestos de una porción de la pila de capas de material ferromagnético.

[0019] En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una capa eléctricamente conductora de anchura finita (en una dirección de movimiento relativo entre el rotor y el estator), y de espesor finito (perpendicular a la separación nominal), que atraviesa múltiples interfaces de la pila y tiene una superficie expuesta que forma una superficie del rotor en la separación.

[0020] Por "anchura finita" entendemos que la capa tiene bordes opuestos y no se extiende, por ejemplo, alrededor de toda la circunferencia del rotor (o a lo largo de toda la longitud de un componente magnético pasivo lineal).

[0021] Del mismo modo, por "espesor finito" entendemos que la capa se extiende hasta una profundidad limitada y no se extiende, por ejemplo, completamente a través del rotor.

[0022] En algunos casos, la anchura de la capa es más de dos veces, en algunos casos más de cinco veces y en algunos casos más de 10 veces el grosor de la capa.

[0023] En algunos motores, la capa está formada por un material que tiene una profundidad de piel de corriente eléctrica, en condiciones de funcionamiento del motor, mayor que el espesor de la capa.

[0024] Por "profundidad de la piel de la corriente eléctrica" se entiende la profundidad desde la superficie de un conductor a la que fluye principalmente la corriente eléctrica, en particular la corriente parásita inducida por un campo magnético que cambia a una frecuencia determinada. Para un material dado, la profundidad de la piel puede calcularse como:

$$\delta \approx 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

donde "f" es la frecuencia de conmutación magnética, μ es la permeabilidad magnética (en H/mm) del material, y σ es la conductividad eléctrica (en %AICS) del material.

[0025] Por "permeabilidad magnética" se entiende, en general, la capacidad de un material para soportar la formación de un campo magnético. La permeabilidad magnética de un material puede determinarse de acuerdo con la norma ASTM A772. Cuando decimos que un material es "magnéticamente permeable" queremos decir que tiene una permeabilidad magnética de al menos $1,3 \times 10^{-6}$ Henrios por metro.

[0026] En algunos ejemplos, la capa se dispone dentro de un canal definido por el material ferromagnético y puede estar en contacto eléctrico con el material ferromagnético de varias placas o de todas ellas.

[0027] En algunos casos, la separación nominal es más fina en la capa que adyacente a la capa.

[0028] En algunas realizaciones, cada barrera de flujo incluye un material conductor de la electricidad que forma un bucle alrededor de un núcleo de un material más permeable magnéticamente (es decir, que tiene una mayor permeabilidad magnética) que el material conductor de la electricidad. En algunos casos, el material del núcleo también es ferromagnético. Por ejemplo, el material del núcleo y el material ferromagnético de los polos del rotor pueden formar porciones contiguas de la pila laminada de placas.

[0029] En algunas disposiciones, el bucle forma una porción de una superficie exterior del rotor que limita la separación nominal. El núcleo puede formar una parte de la superficie exterior del rotor rodeada por el bucle.

[0030] En algunos casos, el bucle está dispuesto bajo una superficie del rotor que limita la separación nominal e incluye los bordes de las capas de material ferromagnético.

[0031] En algunos motores, el bucle define una capacitancia, que puede formarse en una ubicación discreta a lo largo del bucle, tal como, por ejemplo, mediante una rotura no conductora en el bucle.

[0032] El bucle tiene preferentemente una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del material ferromagnético.

[0033] Por "rango transmisible" se entiende el rango de frecuencias en la que la permeabilidad magnética se deprecia como máximo 10db con respecto a la permeabilidad a 60hz, medida en condiciones estáticas de frecuencia (por ejemplo, con mediciones de permeabilidad para una frecuencia dada tomadas a lo largo de al menos 5 ciclos del campo aplicado).

[0034] En muchos motores, las interfaces entre las capas de la pila consisten en superficies oxidadas del material ferromagnético. En algunos otros motores, las interfaces incluyen láminas de material aislante, como láminas de película de resina, intercaladas con las capas ferromagnéticas.

[0035] En muchas realizaciones, el rotor está dispuesto dentro del estator. En otras realizaciones, los polos del rotor están situados fuera de los polos del estator.

[0036] En algunos motores, la separación nominal es una separación radial delimitada al menos parcialmente por una superficie radialmente exterior del rotor. En algunos otros motores, la separación nominal es una separación axial perpendicular a un eje de rotación del rotor.

[0037] En algunos motores, cada polo del rotor (y/o cada polo de estator) tiene múltiples dientes que definen rebajes entre los mismos.

[0038] En algunas realizaciones, cada polo de estator tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de bordes opuestos del polo de estator y formados de un material que tiene una conductividad eléctrica mayor que el material del polo de estator dispuesto entre los escudos de flujo.

[0039] En algunas realizaciones, las ranuras se extienden perpendiculares a la primera dirección (es decir, el ángulo distinto de cero es de 90 grados).

[0040] En algunos casos, las barreras de flujo llenan las ranuras.

- [0041] En algunos motores, las barreras de flujo están en contacto (preferiblemente, contacto eléctrico) con el primer material en los lados opuestos de las ranuras.
- 5 [0042] En algunas configuraciones, las barreras de flujo tienen superficies expuestas que forman porciones de la segunda superficie.
- [0043] En algunos motores, los polos pasivos incluyen regiones de superficie de borde de una pila de placas apiladas de tal manera que las ranuras cruzan varias placas de la pila. Preferentemente, el segundo material de cada barrera de flujo atraviesa varias placas de la pila, y/o está en contacto directo con cada una de las placas de la pila.
- 10 [0044] El segundo material tiene una conductividad eléctrica mayor que el primer material.
- [0045] En algunos ejemplos, cada una de las barreras de flujo consiste esencialmente en el segundo material.
- 15 [0046] En algunos casos, el segundo material contiene al menos el 20 por ciento, en algunos casos el 40 por ciento, o en algunos casos el 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto.
- 20 [0047] En algunos ejemplos, cada una de las barreras de flujo incluye una capa eléctricamente conductora del segundo material, y una capa eléctricamente conductora de un tercer material que forma al menos parcialmente una superficie exterior del rotor.
- [0048] En algunas realizaciones, el segundo material contiene al menos uno por ciento, en algunos casos cinco por ciento, o en algunos casos 15 por ciento, por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono.
- 25 [0049] En algunas disposiciones, cada barrera de flujo incluye múltiples capas discretas que se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de materiales diferentes. En algunos ejemplos, uno de los materiales diferentes incluye o es cobre y otro de los materiales diferentes incluye o es níquel.
- 30 [0050] En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una forma de sección transversal que incluye dos salientes separados que se extienden fuera de la brecha nominal, y una capa superficial que conecta los dos salientes. En algunos casos, las barreras de flujo que tienen cada una la forma de sección transversal incluyen además material magnéticamente permeable dispuesto entre los dos salientes y bajo la capa superficial.
- 35 [0051] En algunos casos, el segundo material de cada barrera de flujo forma un bucle eléctricamente conductor alrededor de un núcleo respectivo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el segundo material. El material del núcleo puede ser ferromagnético. En algunas configuraciones, el material del núcleo y el primer material forman porciones contiguas de una única pila de placas.
- 40 [0052] En algunos ejemplos, el bucle forma una porción de una superficie exterior del rotor que limita la separación nominal. Por ejemplo, el núcleo puede formar una parte de la superficie exterior del rotor rodeada por el bucle.
- 45 [0053] En algunos motores, el bucle está dispuesto bajo una superficie del componente magnético pasivo que delimita la separación nominal y está formado del primer material.
- [0054] En algunos motores, el bucle define una capacitancia, que puede formarse en una ubicación discreta a lo largo del bucle, tal como, por ejemplo, mediante una rotura no conductora en el bucle.
- 50 [0055] El bucle tiene preferiblemente una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del primer material.
- [0056] En algunas realizaciones, según la invención, el componente magnético activo es un estator del motor, y el componente magnético pasivo es un rotor del motor. En algunos ejemplos, la separación nominal es una separación radial delimitada al menos parcialmente por una superficie radialmente exterior del rotor. En otros ejemplos, la separación nominal es una separación axial perpendicular a un eje de rotación del rotor.
- 55 [0057] En algunos casos, cada polo pasivo y/o cada polo activo tiene múltiples dientes que definen rebajes entre los mismos.
- 60 [0058] En algunos casos, cada polo activo tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de los bordes opuestos del polo y formado de un material que tiene una mayor conductividad eléctrica que el material del polo de estator dispuesto entre los escudos de flujo.
- 65 [0059] Preferiblemente, el material del núcleo es más permeable magnéticamente que el material conductor eléctrico.

- [0060]** En algunos casos, el material del núcleo y el de los polos tienen propiedades idénticas.
- [0061]** En algunos ejemplos, las barreras de flujo se extienden a pares de polos adyacentes.
- 5 **[0062]** En algunos motores, cada una de las barreras de flujo incluye al menos un bucle del material eléctricamente conductor que abarca una extensión magnéticamente activa del componente magnético pasivo. En algunos casos, cada barrera de flujo tiene múltiples bucles de material eléctricamente conductor, cada uno aislado del otro, externo al material del polo y al material del núcleo.
- 10 **[0063]** En algunas realizaciones, cada barrera de flujo contiene al menos el 20 por ciento, en algunos casos el 40 por ciento, o en algunos casos el 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto.
- 15 **[0064]** En algunos casos, cada barrera de flujo contiene al menos un uno por ciento, en algunos casos un cinco por ciento, o en algunos casos un 15 por ciento, por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono.
- 20 **[0065]** En algunos ejemplos, el material del núcleo es ferromagnético. En algunas disposiciones, el material del núcleo y el material del polo comprenden porciones contiguas de una única pila de placas.
- [0066]** El bucle, en algunos motores, forma una porción de una superficie exterior del componente magnético pasivo que delimita la separación nominal. El núcleo puede formar una parte de la superficie exterior del componente magnético pasivo rodeado por el bucle.
- 25 **[0067]** El bucle puede estar dispuesto debajo de una superficie del componente magnético pasivo que delimita la separación nominal y formado de un primer material.
- [0068]** En algunos casos, el bucle define una capacitancia, como una capacitancia formada en una ubicación discreta a lo largo del bucle.
- 30 **[0069]** Preferiblemente, el bucle tiene una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del primer material.
- [0070]** En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una capa eléctricamente conductora de anchura finita (en una dirección de movimiento relativo entre los componentes magnéticos pasivos y activos), y de espesor finito (perpendicular a la separación nominal), que atraviesa múltiples interfaces de la pila y tiene una superficie expuesta que forma una superficie del componente magnético pasivo en la separación.
- 35 **[0071]** En algunas aplicaciones, la anchura de la capa es más de dos veces, en algunos casos más de cinco veces, en algunos casos más de 10 veces el espesor de la capa.
- 40 **[0072]** En algunos casos, la capa está formada por un material que tiene una profundidad de piel de corriente eléctrica mayor que el espesor de la capa.
- [0073]** La capa puede estar dispuesta dentro de un canal definido por el primer material.
- 45 **[0074]** En algunos casos, la separación nominal es más fina en la capa que adyacente a la capa.
- [0075]** Según la invención, el componente magnético activo es un estator del motor, y el componente magnético pasivo es un rotor del motor. La separación nominal puede ser una separación radial delimitada al menos parcialmente por una superficie radialmente exterior del rotor, o una separación axial perpendicular a un eje de rotación del rotor.
- 50 **[0076]** En algunas realizaciones, cada polo del componente magnético pasivo y/o cada polo del componente magnético activo tiene múltiples dientes que definen rebajes entre los mismos.
- 55 **[0077]** En algunos ejemplos, cada polo de componente magnético activo tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de bordes opuestos del polo y formados de un material que tiene una conductividad eléctrica mayor que el material del polo de componente magnético activo dispuesto entre los escudos de flujo.
- 60 **[0078]** Por "producto de bajo valor energético" entendemos un material cuyo producto energético ($B \times H$) es inferior a 100 kilo-Julios por metro cúbico. También se entiende por producto energético el producto de la remanencia y la fuerza coercitiva. Generalmente, los materiales de imanes permanentes utilizados en los motores PM no tienen productos de baja energía.
- 65 **[0079]** En algunas realizaciones, el material magnéticamente permeable forma una pila de capas de material ferromagnético separadas entre sí, al menos en las regiones de superficie polar, por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético.

- 5 **[0080]** En algunos ejemplos, el componente magnético pasivo incluye barras de un tercer material, cada barra subyacente a una región de superficie interpolar respectiva dentro del componente magnético pasivo y que se extiende a través de las interfaces inhibidoras de corriente. El tercer material puede ser o incluir, por ejemplo, hierro, níquel y cobalto. Preferiblemente, el tercer material tiene una permeabilidad magnética mayor que el segundo material.
- [0081]** En algunas configuraciones, el segundo material se extiende entre un lado de la barra y los bordes de las capas de material ferromagnético.
- 10 **[0082]** En algunos motores, el segundo material tiene una permeabilidad magnética inferior a la del primer material.
- [0083]** En algunas realizaciones, el segundo material de al menos una de las regiones superficiales interpolares se extiende dentro del componente magnético pasivo hasta una profundidad total, desde la segunda superficie, de entre 1 y 50 mm aproximadamente, en algunos casos entre 2 y 25 mm, o en algunos casos entre 5 y 15 mm.
- 15 **[0084]** En algunas disposiciones, el segundo material de al menos una de las regiones superficiales interpolares tiene una extensión en la primera dirección y se extiende dentro del componente magnético pasivo a una profundidad total, desde la segunda superficie, que está entre el 2 y el 2000 por ciento (o en algunos casos entre el 5 y el 500 por ciento, o en algunos casos entre el 10 y el 200 por ciento) de dicha extensión.
- 20 **[0085]** En algunos casos, la segunda superficie es móvil con respecto a la primera superficie a lo largo de una primera dirección, y las regiones de superficie entre polos son continuas en una segunda dirección, perpendicular a la primera dirección, a lo largo de toda una extensión magnéticamente activa de las regiones de superficie entre polos.
- 25 **[0086]** En algunos motores, el material magnéticamente permeable forma una pila de capas de material ferromagnético, extendiéndose cada capa en la primera dirección.
- [0087]** En algunos casos, el segundo material incluye, o consiste esencialmente, en cobre.
- 30 **[0088]** En algunos motores, el componente magnético pasivo es un rotor y el componente magnético activo es un estator. Las regiones de superficie entre polos y las regiones de superficie entre polos pueden formar juntas una superficie cilíndrica del rotor, por ejemplo, siendo la separación una separación radial entre el rotor y el estator. O las regiones de la superficie entre polos y las regiones de la superficie de los polos pueden formar juntas una superficie final del rotor, siendo la separación una separación axial entre el rotor y el estator. En algunos casos, la superficie del extremo es perpendicular a un eje de rotación del rotor.
- 35 **[0089]** En algunas realizaciones, cada una de las regiones superficiales interpolares incluye además material de núcleo magnéticamente permeable rodeado por el segundo material. En algunos casos, el material del núcleo es el mismo material que el primer material.
- 40 **[0090]** En algunos ejemplos, las regiones de la superficie de los polos de la segunda superficie definen ranuras entre ellas, y las regiones de la superficie entre los polos de la segunda superficie están formadas por el segundo material dispuesto dentro de las ranuras. Las ranuras se extienden en un ángulo distinto de cero (tal como 90 grados) con respecto a una dirección de movimiento relativo entre la primera y la segunda superficie.
- 45 **[0091]** Según la invención, el segundo material se fija al primer material dentro de las ranuras. En algunos ejemplos, las ranuras se rellenan con un segundo material, y/o el segundo material está en contacto con el primer material en lados opuestos de las ranuras.
- 50 **[0092]** En algunos ejemplos, las regiones de superficie de polo incluyen regiones de superficie de borde de una pila de placas apiladas de tal manera que las ranuras cruzan varias placas de la pila. Preferiblemente, el segundo material de cada ranura atraviesa varias placas de la pila, y/o está en contacto directo con cada una de las placas de la pila.
- [0093]** El segundo material tiene una conductividad eléctrica mayor que el primer material.
- 55 **[0094]** En algunos motores, cada una de las regiones superficiales interpolares está formada esencialmente por el segundo material.
- [0095]** El segundo material contiene, en algunos ejemplos, el 20 por ciento, en algunos casos el 40 por ciento, o en algunos casos el 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto.
- 60 **[0096]** En algunos ejemplos, el segundo material contiene al menos uno por ciento, en algunos casos cinco por ciento, o en algunos casos 15 por ciento, por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono.
- 65

[0097] En algunas realizaciones, las regiones de superficie entre polos incluyen superficies de barreras de flujo dispuestas entre las regiones de superficie entre polos.

[0098] En algunos casos, cada barrera de flujo tiene capas discretas que se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de materiales diferentes, como cobre y níquel.

[0099] En algunos ejemplos, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una forma de sección transversal que incluye dos salientes separados que se extienden alejándose de la separación nominal, y una capa superficial que conecta los dos salientes, tal como con material magnéticamente permeable dispuesto entre los dos salientes y bajo la capa superficial.

[0100] En algunas configuraciones, el segundo material de cada región de superficie interpolar forma un bucle eléctricamente conductor alrededor de un núcleo respectivo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el segundo material. En algunos casos, el material del núcleo es ferromagnético. En algunos casos, el material del núcleo y el primer material son porciones contiguas de una única pila de placas. En algunos ejemplos, el núcleo forma una porción de la segunda superficie rodeada por el bucle. El bucle puede estar espaciado de la segunda superficie, y/o puede definir una capacitancia, tal como una capacitancia se forma en una ubicación discreta a lo largo del bucle. Preferiblemente, el bucle tiene una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del primer material.

[0101] En algunos motores, cada región de superficie polar (y/o cada polo del componente magnético activo) tiene múltiples dientes que definen rebajes entre los mismos.

[0102] En algunos ejemplos, cada polo del componente magnético activo tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de bordes opuestos del polo y formados de un material que tiene una conductividad eléctrica mayor que el material del polo del componente magnético activo dispuesto entre los escudos de flujo.

[0103] En algunas realizaciones, el controlador del motor está configurado para pulsar corriente durante el ciclo de trabajo de energización de cada polo activo a una frecuencia de pulsos de entre 2 Hz y 1 MHz, en algunos casos entre 10 Hz y 20 kHz, y en algunos casos entre 100 Hz y 5 kHz.

[0104] En algunos ejemplos, el controlador del motor está configurado para mantener la frecuencia de pulsos durante los cambios de velocidad del motor, hasta al menos una velocidad del motor a la que una frecuencia de ciclo de trabajo de energización para cada polo activo es al menos la mitad de la frecuencia de pulsos.

[0105] Para algunas aplicaciones, el controlador del motor está configurado para pulsar corriente sólo por debajo de una velocidad del motor correspondiente a un pulso por ciclo de trabajo de energización.

[0106] En algunos casos, al menos uno de los devanados eléctricos tiene múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo y enrolladas alrededor de un núcleo común.

[0107] En algunos casos, al menos uno de los devanados eléctricos es un devanado de alambre trenzado.

[0108] El componente magnético activo es un estator y el componente magnético pasivo es un rotor móvil con respecto al estator mediante rotación alrededor de un eje del rotor. El rotor puede estar dispuesto dentro del estator. La separación nominal puede ser una separación radial delimitada al menos parcialmente por una superficie radialmente exterior del rotor, o una separación axial perpendicular al eje del rotor, por ejemplo.

[0109] En algunos ejemplos, el componente magnético pasivo incluye además barreras de flujo entre polos pasivos adyacentes, teniendo cada una de las barreras de flujo una conductividad eléctrica superior a la de los polos pasivos. Las barreras de flujo están aisladas eléctricamente entre sí fuera de los polos pasivos.

[0110] En algunos casos, los polos pasivos están formados por una pila de capas de material magnéticamente permeable. Al menos algunas de las barreras de flujo pueden incluir, cada una, una barra eléctricamente conductora que atraviesa múltiples capas de la pila. En algunos casos, la barra contiene al menos un 20 por ciento, en algunos casos un 40 por ciento, o en algunos casos un 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto. Cada una de las barreras de flujo con una barra conductora de electricidad puede incluir además una capa conductora de electricidad de un material diferente al de la barra y que forma, al menos parcialmente, una superficie exterior del componente magnético pasivo. En algunos ejemplos, la barra contiene al menos un uno por ciento, en algunos casos un cinco por ciento, o en algunos casos un 15 por ciento por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono. En algunas configuraciones, la barra tiene capas discretas que se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de materiales diferentes, como cobre y níquel.

[0111] La barra puede tener una superficie expuesta orientada hacia la separación nominal.

[0112] En algunos casos, cada una de las barreras de flujo con una barra eléctricamente conductora incluye al menos dos barras eléctricamente conductoras conectadas eléctricamente entre sí en extremos opuestos de la pila para formar un bucle conductor.

[0113] En algunas realizaciones, al menos algunas de las barreras de flujo tienen, cada una, una forma, en sección transversal tomada paralelamente a las capas de la pila, que incluye dos salientes separados que se extienden fuera de la separación nominal, y una capa superficial que conecta los dos salientes. Los dos salientes pueden estar dispuestos en lados opuestos de una parte de la pila.

[0114] En algunas configuraciones, al menos algunas de las barreras de flujo incluyen, cada una, una capa eléctricamente conductora de anchura finita en una dirección de movimiento relativo entre el componente magnético pasivo y el componente magnético activo, y de espesor finito perpendicular a la separación nominal, que atraviesa múltiples capas de la pila y tiene una superficie expuesta que forma una superficie del componente magnético pasivo en la separación. En algunas aplicaciones, la anchura de la capa es más de dos veces, en algunos casos más de cinco veces, y en algunos casos más de 10 veces el grosor de la capa.

[0115] La capa puede estar formada por un material que tenga una profundidad de piel de corriente eléctrica mayor que el espesor de la capa, y/o puede estar dispuesta dentro de un canal definido por el material magnéticamente permeable. En algunos casos, la separación nominal es más fina en la capa que adyacente a la capa.

[0116] En algunas realizaciones, cada barrera de flujo incluye un material eléctricamente conductor que forma un bucle alrededor de un núcleo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el material eléctricamente conductor. El material del núcleo puede ser ferromagnético, y/o el material del núcleo y el material magnéticamente permeable de los polos pasivos pueden ser porciones contiguas de la pila laminada de placas.

[0117] En algunos casos, el bucle forma una parte de una superficie exterior del componente magnético pasivo que delimita la separación nominal.

[0118] En algunos casos, el núcleo forma una parte de la superficie exterior del componente magnético pasivo rodeado por el bucle.

[0119] El bucle puede estar dispuesto bajo una superficie del componente magnético pasivo que delimita la separación nominal e incluye los bordes de las capas de la pila.

[0120] En algunos ejemplos, el bucle define una capacitancia, tal como una capacitancia formada en una ubicación discreta a lo largo del bucle. Preferiblemente, el bucle tiene una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del material magnéticamente permeable de los polos pasivos

[0121] En algunas realizaciones, el componente magnético pasivo incluye además barreras de flujo que conectan polos pasivos adyacentes de material de polo magnéticamente permeable, teniendo cada una de las barreras de flujo un material eléctricamente conductor distinto del material de polo y definiendo al menos una trayectoria eléctricamente conductora sobre el material de núcleo magnéticamente permeable.

[0122] Las barreras de flujo están aisladas eléctricamente entre sí en el exterior del material del polo, y las barreras de flujo adyacentes pueden disponerse de modo que cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de una barrera de flujo no rodee ninguna porción de cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera de flujo.

[0123] En algunos casos, cada polo pasivo y/o cada polo activo tiene múltiples dientes que definen rebajes entre los mismos.

[0124] En algunos ejemplos, cada polo activo tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de los bordes opuestos del polo activo y formado de un material que tiene una mayor conductividad eléctrica que el material del polo activo dispuesto entre los escudos de flujo.

[0125] En algunas aplicaciones, la relación entre la corriente máxima y la mínima es de al menos 7:1. En algunos casos, la relación entre la corriente máxima y mínima es de al menos 10:1

[0126] Otro aspecto de la invención presenta un método de accionamiento de un motor eléctrico según la reivindicación 11.

[0127] En algunos ejemplos, energizar el primer polo activo incluye pulsar corriente a una frecuencia de pulso de entre 2 Hz y 1 MHz, en algunos casos entre 10 Hz y 20 kHz, y en algunos casos entre 100 Hz y 5 kHz.

- [0128] En algunos casos, energizar el primer polo activo y luego energizar el segundo polo activo genera una primera fuerza entre el primer polo activo y un polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo, y una segunda fuerza entre el segundo polo activo y un polo pasivo a través del entrehierro desde el segundo polo activo.
- 5 [0129] En algunos casos, las fuerzas primera y segunda inducen un movimiento relativo entre los polos activos y los polos pasivos. El movimiento relativo incluye un movimiento del componente magnético pasivo con respecto a los polos activos.
- 10 [0130] El componente magnético pasivo es un rotor del motor, y el movimiento relativo incluye la rotación del rotor.
- [0131] Algunos ejemplos del método también incluyen la detección de la velocidad del rotor y el control de una frecuencia de la corriente pulsada en función de la velocidad del rotor detectada.
- 15 [0132] Algunos ejemplos también incluyen el mantenimiento de la frecuencia de pulsos de corriente durante los cambios de velocidad del rotor, hasta al menos una velocidad del rotor a la que una frecuencia a la que se energiza cada polo activo es al menos la mitad de la frecuencia de pulsos.
- [0133] En algunos casos, la corriente es pulsada a través de los devanados eléctricos asociados con el primer y segundo polos sólo por debajo de una velocidad del rotor correspondiente a un pulso por energización del polo.
- 20 [0134] En algunos ejemplos, el método incluye, después de energizar el segundo polo activo, energizar un tercer polo activo de la serie de polos activos, dispuesto en un lado opuesto del segundo polo activo que el primer polo activo, pulsando corriente a través de un devanado eléctrico asociado con el tercer polo activo, incluyendo una secuencia de al menos tres pulsos durante cuya secuencia los devanados del primer y segundo polos activos no están energizados.
- 25 [0135] En algunas realizaciones el método incluye además, después de energizar el tercer polo activo, energizar nuevamente el primer polo activo pulsando corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo, y luego energizar nuevamente el segundo polo activo pulsando corriente a través del devanado eléctrico asociado con el segundo polo activo, y luego energizar nuevamente el tercer polo activo.
- 30 [0136] Según la invención, la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado al primer polo activo hace que la corriente pase a través del devanado eléctrico asociado al primer polo activo según una forma de onda de corriente en la que una relación entre una corriente máxima y una corriente mínima durante la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado al primer polo activo es de al menos 4:1, o en algunos casos, de al menos 7:1.
- 35 [0137] En algunos ejemplos, la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo incluye la pulsación de corriente a través de múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo y enrolladas alrededor de un núcleo común.
- 40 [0138] En algunos casos, la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo incluye la operación de un primer conmutador para abrir y cerrar en múltiples ciclos entre una fuente de tensión y el devanado eléctrico asociado con el primer polo activo.
- 45 [0139] La corriente pulsante a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo genera corrientes parásitas en una primera barrera de flujo adyacente a un polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo, teniendo la barrera de flujo una conductividad eléctrica mayor que el polo pasivo a través del entrehierro.
- [0140] En algunos ejemplos, el componente magnético pasivo incluye además una segunda barrera de flujo, con el polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo dispuesto entre la primera y segunda barreras de flujo, y con la primera y segunda barreras de flujo eléctricamente aisladas entre sí externas a los polos pasivos.
- 50 [0141] En algunos casos, los polos pasivos están formados por una pila de capas de material magnéticamente permeable.
- 55 [0142] En algunos casos, la corriente parásita en la primera barrera de flujo actúa para repeler el flujo magnético del primer polo activo.
- [0143] En algunas configuraciones, la primera barrera de flujo está dispuesta entre el polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo y un polo pasivo adyacente, con la barrera de flujo formando un bucle conductor de un material eléctricamente conductor alrededor de un núcleo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el material eléctricamente conductor.
- 60 [0144] En algunas realizaciones, el componente magnético pasivo incluye además barreras de flujo entre pares adyacentes de polos pasivos de la serie de polos pasivos, comprendiendo cada una de las barreras de flujo un material eléctricamente conductor distinto del material que forma los polos pasivos y definiendo al menos una trayectoria eléctricamente conductora sobre el material del núcleo magnéticamente permeable.
- 65

[0145] Las barreras de flujo están aisladas eléctricamente entre sí fuera de la serie de polos pasivos.

[0146] Las barreras adyacentes del flujo se arreglan preferiblemente tales que cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de una barrera del flujo no rodea ninguna porción de cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera del flujo.

[0147] En algunos ejemplos, el motor tiene escudos de flujo que se extienden a lo largo de los bordes opuestos de cada polo activo y formado de un material que tiene una mayor conductividad eléctrica que el material del polo activo dispuesto entre los escudos de flujo. En algunos casos, los escudos de flujo se extienden hasta las separaciones entre devanados eléctricos adyacentes. Los escudos de flujo pueden extenderse desde el entrehierro hasta un yugo magnéticamente permeable que conecte polos activos adyacentes, por ejemplo.

[0148] En algunos casos, la relación entre la corriente máxima y la mínima es de al menos 7:1, o de al menos 10:1

[0149] La invención presenta barreras de flujo para aumentar el rendimiento de un motor eléctrico, por ejemplo, en altas densidades de par y potencia. Las barreras de flujo tienen propiedades diamagnéticas dinámicas (o transitorias). Utilizando las barreras de flujo en el motor, pueden lograrse ganancias significativas en el par motor dirigiendo el flujo magnético sustancialmente más tangencial, donde el campo magnético se altera redirigiendo una fuerza radial (o fuerza normal) a lo largo de la dirección tangencial. Es decir, el vector de fuerza medio durante el funcionamiento es sustancialmente más tangencial, mientras que el vector de fuerza predominante en los diseños de motor tradicionales es de naturaleza radial.

[0150] La permeabilidad magnética de las barreras de flujo puede controlarse ajustando una frecuencia magnética de corrientes parásitas en las barreras de flujo, por ejemplo, pulsando corriente a través de bobinados eléctricos de polos activos. De este modo, los motores eléctricos pueden tener propiedades magnéticas significativamente diferentes a distintas frecuencias magnéticas: a bajas frecuencias, las propiedades de las barreras de flujo son ferromagnéticas; a frecuencias operativas medias y altas, la permeabilidad magnética de la barrera de flujo puede ser inferior a la del aire, y las propiedades de las barreras de flujo son diamagnéticas.

[0151] La invención también puede crear un circuito de alta reactancia en el que el campo magnético no penetra a través del ciclo electromagnético, sino que se refleja sustancialmente. Esto puede reducir o eliminar el solapamiento de flujo. A diferencia de un motor tradicional de imanes permanentes (PM), en los motores diseñados de acuerdo con la invención permea un flujo sustancialmente nulo en las barreras de flujo, lo que puede evitar la desmagnetización (fuerza coercitiva) y el calor excesivo durante el funcionamiento. Además, las barreras de flujo diamagnético no producen ningún campo durante el funcionamiento, por lo que se comportan a diferencia de los motores PM porque hay una ausencia total de campo, no un campo que existe en sentido inverso que luego se cierra.

[0152] La invención puede aplicarse a varios tipos de motores para mejorar sus prestaciones. Los motores pueden ser radiales o axiales. Los motores pueden ser de reluctancia conmutada (SRM), de inducción (IM) o de imanes permanentes (PM), por ejemplo.

[0153] Varios ejemplos de la invención aquí divulgada pueden proporcionar un rendimiento particularmente alto del motor con densidades significativas de par/fuerza y potencia, y pueden utilizarse para proporcionar una potencia de árbol de salida esencialmente suave y eficiente para propulsar vehículos, así como en sistemas estacionarios. Los conceptos de diseño pueden aumentar más eficazmente el par y la potencia incrementando la relación de saliencia del propio motor, evitando algunas de las compensaciones tradicionales de aprovechar una a expensas de la otra. Este motor también puede obtener una mayor eficiencia del sistema durante el funcionamiento cíclico debido a que evita la rotura magnética que puede producirse con los motores de imanes permanentes en condiciones pasivas.

[0154] Los detalles de una o más realizaciones de la invención se exponen en los dibujos adjuntos y en la siguiente descripción. Otras características, objetos y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la descripción y de los dibujos, y a partir de las reivindicaciones.

DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

[0155]

La figura 1 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un sistema de accionamiento eléctrico.

La figura 2 es una ilustración esquemática de un controlador de motor que incluye conmutación de potencia.

La figura 2A es una ilustración esquemática de un ejemplo de conmutador de potencia para un devanado eléctrico.

La figura 3 ilustra un perfil de corriente de ciclos de trabajo de energización de polos incluyendo corrientes pulsadas en cada ciclo de trabajo.

La figura 4 ilustra un motor de separación radial que incluye un rotor y un estator.

La figura 5 es una vista ampliada de una porción de la figura 4.

La figura 6 es una vista en perspectiva de un rotor hecho de una pila de placas laminadas.

La figura 7 ilustra un rotor con barreras de flujo rellenas en ranuras entre polos adyacentes.

Las figuras 8A-C ilustran el flujo magnético con aire entre los polos en posición desalineada (figura 8A), posición semialineada (figura 8B), y posición alineada (figura 8C).

Las figuras 9A-C ilustran el flujo magnético con barreras de flujo entre polos en posición desalineada (figura 9A), posición semialineada (figura 9B), y posición alineada (figura 9C).

La figura 10 ilustra las fuerzas con o sin barreras de flujo entre polos adyacentes.

La figura 11 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo que incluyen una capa eléctricamente conductora sobre material magnéticamente permeable en ranuras entre polos adyacentes.

La figura 12 ilustra el flujo magnético entre el estator y el rotor de la figura 11 durante la operación.

La figura 13 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo hechas de capa conductora de electricidad y capa magnéticamente permeable alternadas en ranuras entre polos adyacentes.

La figura 13A ilustra una trayectoria de flujo magnético en el rotor de la figura 13.

La figura 14 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo hechas de capa eléctricamente conductora que rodea material magnéticamente permeable en ranuras entre polos adyacentes.

La figura 15 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo formadas por un bucle conductor de electricidad alrededor de un núcleo magnéticamente permeable entre polos adyacentes ("polo blindado").

La figura 15A es una vista lateral del rotor de la figura 15.

La figura 16 es una vista esquemática de otro rotor con barreras de flujo formadas cada una por un polo blindado con un condensador discreto.

La figura 17 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo hechas cada una de una capa eléctricamente conductora fundida en una superficie exterior de material magnéticamente permeable entre polos adyacentes.

La figura 18 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo hechas cada una de una capa eléctricamente conductora formada en una superficie exterior de material magnéticamente permeable entre polos adyacentes.

La figura 19 ilustra un motor que incluye un estator y el rotor de la figura 18.

La figura 20 ilustra los efectos de la frecuencia magnética en la fuerza generada para diferentes materiales de barrera de flujo.

La figura 21 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo que incluyen barras eléctricamente conductoras que se extienden longitudinalmente a lo largo del rotor y están conectadas conductivamente por capas conductoras superiores.

La figura 22 ilustra el rotor de la figura 21 sin barreras de flujo.

La figura 23 ilustra una barrera de flujo en el rotor de la figura 21.

La figura 24 es una vista en perspectiva de otro rotor con barreras de flujo distribuidas dentro del rotor.

La figura 25 es una vista en perspectiva del rotor de la figura 24 sin las barreras de flujo.

La figura 26 es una vista en perspectiva de una barrera de flujo con múltiples porciones distribuidas dentro del rotor de la figura 24.

La figura 26A ilustra una porción distribuida de la barrera de flujo de la figura 26.

La figura 27 ilustra dientes múltiples y discretos en cada polo de un motor con barreras de flujo en ranuras de polos adyacentes del rotor.

La figura 28 es una vista en perspectiva de un motor de espacio axial con barreras de flujo en las ranuras de los polos del rotor.

La figura 29 ilustra un rotor en un motor de espacio axial con polos blindados como barreras de flujo entre polos adyacentes.

La figura 30 es una vista abierta del rotor con los polos blindados de la figura 29.

Las figuras 31-32 son vistas abiertas del rotor con los polos blindados de la figura 29.

La figura 33 es una vista en perspectiva de un estator con barreras de flujo que incluyen material eléctricamente conductor que se extiende en los bordes de los polos del estator y se rellena en ranuras entre polos adyacentes del estator.

La figura 34 es un diagrama esquemático del estator de la figura 33 con respecto a un rotor.

La figura 35 es una vista en perspectiva de otro estator con barreras de flujo que incluyen material eléctricamente conductor formado en los bordes de los polos del estator y relleno en ranuras entre polos adyacentes del estator.

La figura 36 es un diagrama esquemático del estator de la figura 35 con respecto a un rotor.

La figura 37 es una vista en perspectiva de otro estator con barreras de flujo que incluyen material eléctricamente conductor ajustado en ranuras entre polos adyacentes del estator y emparejado con los bordes de los polos del estator.

La figura 38 es un diagrama esquemático del estator de la figura 37.

La figura 39 es una vista en perspectiva de un motor lineal -no perteneciente a la presente invención- que incluye un rotor con barreras de flujo entre los polos del rotor.

La figura 40 es un diagrama esquemático del motor lineal de la figura 39.

La figura 41 es una vista en perspectiva de otro motor lineal -no perteneciente a la presente invención- que incluye barreras de flujo rellenas en polos de estator y polos de rotor con múltiples dientes.

La figura 42 es un diagrama esquemático del motor lineal de la figura 41.

[0156] Los símbolos de referencia en los diversos dibujos indican elementos similares.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0157] Implementaciones de la presente divulgación proporcionan sistemas, dispositivos y métodos de uso de barreras de flujo para aumentar el rendimiento de los motores eléctricos. Se presentan y discuten varios diseños/configuraciones de barreras de flujo para los motores. Las barreras de flujo están configuradas para exhibir propiedades diamagnéticas en frecuencias operativas, de tal manera que el flujo magnético a través de un espacio magnético entre el componente magnético activo (por ejemplo, el estator) y el componente magnético pasivo (por ejemplo, el rotor) puede concentrarse y redirigirse para ser sustancialmente más tangencial y aumentar así el par.

Ejemplo de sistema de accionamiento eléctrico

[0158] La figura 1 ilustra un sistema de accionamiento eléctrico 100 que incluye un motor eléctrico 102 y un controlador de motor 104 acoplado al motor eléctrico 102. El controlador del motor 104 está configurado para operar el motor eléctrico 102 para accionar una carga 110. La carga 110 puede ser un tren de engranajes adicional, como un conjunto de engranajes planetarios, u otro motor en el que varios motores pueden conectarse y funcionar en paralelo.

[0159] El motor eléctrico 102 tiene un árbol de salida 107 giratorio con respecto a una carcasa de motor 105, que se considera un punto de referencia con respecto a las rotaciones y otros movimientos de los componentes del motor. En uso, el árbol de salida 107 puede acoplarse a la carga 110 a la que el motor 102 puede impartir potencia rotativa cuando se activa eléctricamente mediante la potencia eléctrica adecuada y las señales del controlador del motor 104. El árbol de salida 107 puede extenderse a través del motor y estar expuesto en ambos extremos, lo que significa que la potencia rotativa puede transmitirse en ambos extremos del motor. La carcasa 105 puede ser rotacionalmente simétrica con respecto al eje de rotación del árbol de salida, pero puede tener cualquier forma externa y generalmente puede incluir medios para asegurar la carcasa a otra estructura para evitar la rotación de la carcasa durante el funcionamiento del motor.

[0160] El motor eléctrico 102 incluye un componente magnético activo 106 tal como un estator y un componente magnético pasivo 108 tal como un rotor. A efectos ilustrativos, en lo que sigue se utiliza el estator como ejemplo representativo del componente magnético activo y el rotor como ejemplo representativo del componente magnético pasivo.

[0161] El rotor 108 está asociado con el estator 106 y puede estar dispuesto dentro del estator 106, por ejemplo, en un motor de rotor interno de separación radial, o paralelo al estator, por ejemplo, en un motor de separación axial, o en un motor lineal. Como se describe con más detalle a continuación, la actividad eléctrica en el estator 106, adecuadamente controlada, impulsa el movimiento del rotor 108. El rotor 108 está acoplado rotacionalmente al árbol de salida 107, de manera que cualquier componente rotacional del movimiento resultante del rotor se transmite al árbol de salida 107, haciendo que el árbol de salida 107 gire. El estator 106 está fijado al motor 102 de forma que durante el funcionamiento el rotor 108 se mueve alrededor del estator 106 o en paralelo al estator 106.

[0162] El estator 106 define múltiples polos de estator con devanados eléctricos asociados y el rotor 108 incluye múltiples polos de rotor, como se ilustra con más detalles en la figura 4. El rotor 108 define, junto con el estator 106, un entrehierro nominal entre los polos del estator y los polos del rotor, como se ilustra con más detalles en la figura 5 abajo. El rotor 108 es móvil con respecto al estator 106 a lo largo de una dirección de movimiento. Como se ilustra en la figura 2, el estator 106 tiene múltiples devanados activables independientemente 132 espaciados circunferencialmente alrededor del rotor 108. Los múltiples devanados adyacentes 132 del estator 106 son activables simultáneamente como un conjunto de devanados, y el estator 106 puede incluir múltiples de tales conjuntos de devanados múltiples espaciados alrededor del estator 106. El motor 102 también puede incluir un controlador de bobinado 130 con un conjunto de conmutadores 134 operables para activar los bobinados 132 del estator 106. Los conmutadores 134 pueden ser conmutadores semiconductores, por ejemplo, transistores tales como transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET). El controlador de bobinado 130 está acoplado a las puertas de los conmutadores 134 y es operable para enviar un voltaje de control respectivo a cada conmutador 134. La tensión de control puede ser una tensión de corriente continua (CC). El controlador de bobinado 130 puede estar en el controlador del motor 104.

[0163] Aunque se muestran solamente tres conmutadores en la figura 2, se entenderá que el controlador del motor 104 puede tener un conmutador para cada polo de estator, o múltiples conmutadores para energizar múltiples bobinas. Los pares de polos adyacentes pueden conectarse en serie a través de un conmutador común, pero en tales casos el más rápido de los dos rotores en movimiento puede generar una fuerza contraelectromotriz (EMF) o retro-EMF ligeramente mayor y consumir instantáneamente más energía eléctrica relativa en comparación con el polo más lento, proporcionando así una aceleración adicional y separación de velocidades relativas. Una excitación de mayor frecuencia puede reducir los efectos de las ondulaciones armónicas de baja frecuencia durante el funcionamiento. Los conmutadores 134 pueden conectarse en paralelo para equilibrar la velocidad relativa entre varios rotores en una configuración anidada mediante el uso de reactores de carga inductiva en paralelo. En ciertas realizaciones con configuraciones de rotores anidados, los rotores individuales del sistema pueden accionarse individualmente y cualquier frecuencia armónica puede derivarse de un rotor a otro disminuyendo la carga en un rotor determinado. En otras realizaciones, los rotores pueden anidarse por pares para equilibrar localmente la fuerza entre un anillo interior y otro exterior.

[0164] La figura 2B muestra otro ejemplo de conmutador de potencia 200 para un devanado eléctrico individual 132. El conmutador de potencia 200 puede tener un circuito de puente en H que incluya cuatro elementos de conmutación 202a, 202b, 202c, 202d, con el devanado eléctrico 132 en el centro, en una configuración en forma de H. Los elementos de conmutación 202a, 202b, 202c, 202d pueden ser transistores bipolares o FET. Cada elemento de conmutación 202a, 202b, 202c, 202d puede acoplarse con un diodo respectivo D1, D2, D3, D4. Los diodos se denominan diodos captadores y pueden ser de tipo Schottky. El extremo superior del puente está conectado a una fuente de alimentación, por ejemplo, una batería Vbat, y el extremo inferior está conectado a tierra. Las puertas de los elementos de conmutación pueden acoplarse al controlador de bobinado 130, que es operable para enviar una señal de tensión de control respectiva a cada elemento de conmutación. La señal de tensión de control puede ser una señal de tensión continua o una señal de tensión alterna.

[0165] Los elementos de conmutación pueden ser controlados individualmente por el controlador 130 y pueden encenderse y apagarse de forma independiente. En algunos casos, si los elementos de conmutación 202a y 202d están encendidos, el cable izquierdo del estator está conectado a la fuente de alimentación, mientras que el cable derecho está conectado a tierra. La corriente comienza a fluir a través del estator, energizando el devanado eléctrico 132 en dirección de avance. En algunos casos, si los elementos de conmutación 202b y 202c están encendidos, el cable derecho del estator está conectado a la fuente de alimentación, mientras que el cable izquierdo está conectado a tierra. La corriente comienza a fluir a través del estator, energizando el devanado eléctrico 132 en sentido inverso, hacia atrás. Es decir, mediante el control de los elementos de conmutación, el devanado eléctrico 132 puede activarse en cualquiera de las dos direcciones.

[0166] El controlador del motor 104, por ejemplo, el controlador del devanado 130, puede ser configurado para operar secuencialmente los conmutadores 134 o 200 para los respectivos ciclos de energización de los polos para generar flujo magnético a través del entrehierro entre los polos del estator y los polos del rotor, como se describe con más detalles en las figuras 8A-8C. Los conmutadores pueden controlarse para energizar secuencialmente los polos del estator y crear una fuerza de atracción local que tire del rotor. Tal energización secuencial (o activación) puede causar una rotación del rotor 108, el árbol de salida 107 y la carga 110.

[0167] Como se discute con más detalle a continuación, varios tipos y configuraciones de barreras de flujo pueden ser implementadas en el rotor 108 y/o el estator 106. Las barreras de flujo suelen tener mayores propiedades diamagnéticas que el aire durante el funcionamiento.

[0168] En algunos ejemplos, una barrera de flujo está hecha de un solo material, como aluminio, cobre, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno o nanotubos de carbono. En algunos ejemplos, pueden utilizarse como barrera de flujo combinaciones ferromagnéticas de materiales, como cobre-hierro, níquel-hierro, plomo-hierro, latón-hierro, plata-hierro, zinc-hierro, oro-hierro, bismuto-hierro, aluminio-hierro, grafito-hierro pirolítico, grafeno-hierro, nanotubos de carbono-hierro o aleaciones Alinco (aluminio-níquel-cobalto), en muchos casos con una conductividad eléctrica superior a la del material ferromagnético (por ejemplo, hierro) que constituye los polos del rotor. En algunos casos, la barrera de flujo, por ejemplo, de cobre-hierro, tiene una permeabilidad magnética efectiva inferior a la del material ferromagnético. En algunos casos, la barrera de flujo, por ejemplo, de níquel-hierro, tiene una permeabilidad magnética efectiva superior a la del material ferromagnético. En algunos ejemplos, la barrera de flujo se construye como un polo blindado de un material eléctricamente conductor que forma un bucle alrededor de un núcleo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el material eléctricamente conductor. Debido al material conductor de la electricidad del bucle, el polo blindado también puede tener una conductividad eléctrica efectiva superior a la del material del núcleo (que puede ser, por ejemplo, hierro).

[0169] Otra propiedad material de interés, que denominamos factor de apantallamiento CEM, es el cociente entre la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética (por ejemplo, Siemens por Henry). Los factores de apantallamiento CEM de dos materiales pueden determinarse simultáneamente colocando muestras de igual tamaño de los materiales sobre un soporte no conductor y desplazándolas entre dos bobinas de Helmholtz paralelas con un diámetro superior al de las muestras, de modo que su plano primario de conducción (por ejemplo, la orientación del plano tal como se experimenta durante el funcionamiento en un sistema magnético) sea perpendicular a los campos magnéticos producidos durante la excitación de las bobinas de Helmholtz. Para una forma de onda de excitación dada (por ejemplo, tensión, forma y frecuencia), la corriente de las bobinas de Helmholtz será proporcional al factor de apantallamiento CEM del material entre las bobinas, de modo que un aumento del factor de apantallamiento CEM se observará como un aumento de la corriente durante una excitación constante.

[0170] Como se señaló anteriormente y se discute con más detalles a continuación, la barrera de flujo está configurada para ser diamagnética. La permeabilidad magnética de la barrera de flujo puede controlarse ajustando una frecuencia magnética a través de la barrera de flujo. De este modo, el motor puede tener propiedades magnéticas significativamente diferentes a distintas frecuencias magnéticas: a bajas frecuencias, la barrera de flujo puede tener una permeabilidad magnética igual o cercana a la ferromagnética; a frecuencias operativas medias y altas, la permeabilidad magnética de la barrera de flujo es preferiblemente inferior a la del aire, y las propiedades de la barrera de flujo son diamagnéticas.

[0171] Como se ilustra con más detalle en las figuras 9A-9C, la implementación del material o estructura diamagnética en el rotor y/o el estator puede ofrecer un medio para concentrar mejor el flujo magnético durante el funcionamiento del

motor. Específicamente, cuando los polos del estator y del rotor se colocan en un estado perfectamente desalineado, la reflexión electromagnética interna significativa (debido a las propiedades diamagnéticas de la barrera de flujo) inhibe significativamente la comunicación magnética a través de la barrera de flujo. El apantallamiento del flujo puede ser significativamente mayor que si la barrera de flujo se sustituyera por una ranura de aire entre polos adyacentes, como en algunos motores convencionales. Este apantallamiento diamagnético hace que las barreras de flujo empujen eficazmente el rotor mientras que la reluctancia de los polos electromagnéticos tira del mismo. Este efecto permite producir más energía por ciclo del sistema motor.

[0172] Para operar la barrera de flujo diamagnético bajo frecuencias operacionales, como se ilustra en la figura 3, durante un ciclo de trabajo de energización de cada polo activo, el controlador del motor 104 está configurado para impulsar una corriente a través del devanado del polo a una frecuencia de pulsos. A diferencia de los motores de inducción que pulsan cada polo una vez en sucesión a bajas velocidades, el controlador del motor 104 pulsa la corriente varias veces para un solo polo a bajas velocidades. Tales pulsos múltiples al mismo polo, antes de pulsar un polo subsiguiente, constituyen un ciclo de trabajo de energización. En algunos ejemplos, el controlador del motor pulsa corriente a través del devanado de un polo activo durante un ciclo de trabajo de energización del polo, incluyendo una secuencia de al menos 3 pulsos, durante cuya secuencia los devanados de los polos activos adyacentes no son energizados. El circuito eléctrico que incluye los devanados eléctricos de cada polo está configurado de manera que una relación de corriente máxima y mínima a través del devanado de un polo energizado durante la pulsación de corriente es de al menos 4:1, en algunos casos de al menos 7:1, o en algunos casos incluso de al menos 10:1. La corriente mínima que pasa por el devanado entre pulsos puede ser tan baja como cero.

[0173] La corriente pulsada provoca intensidades magnéticas alternas, por ejemplo, campos magnéticos, que inducen corrientes parásitas en la barrera de flujo diamagnético. Para un material de barrera de flujo determinado, cuanto mayor sea la frecuencia de pulsos, mayor será la corriente parásita. La corriente inducida genera un campo magnético secundario opuesto al campo magnético alterno aplicado, produciendo así una fuerza de repulsión. Como se ilustra con más detalle en las figuras 9A-9C y 10, la fuerza de repulsión puede concentrar y redirigir el flujo magnético sustancialmente más tangencialmente a lo largo de una dirección de movimiento relativo entre el rotor y el estator, para aumentar así la fuerza disponible para realizar trabajo. Además, las barreras de flujo que tienen diferentes materiales o diseños pueden tener diferentes propiedades diamagnéticas. Cuanto mayor sea la propiedad diamagnética de la barrera de flujo, mayor será la corriente inducida de Foucault a una frecuencia magnética (de pulso) determinada. Así, la fuerza horizontal generada está en función de la frecuencia magnética y de la estructura de la barrera de flujo, como se explica con más detalle a continuación con respecto a la figura 20.

[0174] La frecuencia magnética para la barrera de flujo diamagnético (y la fuerza horizontal generada) está determinada por la frecuencia de pulsos de la corriente a través del bobinado del polo durante el ciclo de trabajo de energización para cada polo activo. La frecuencia del pulso puede estar, por ejemplo, en algunos casos entre 2 Hz y 1 MHz, en algunos casos entre 10 Hz y 20 kHz, y en algunos casos entre 100 Hz y 5 kHz. En algunos casos, el controlador del motor está configurado para mantener la frecuencia de pulsos durante los cambios de velocidad del motor, hasta al menos una velocidad del motor a la que una frecuencia de ciclo de trabajo de energización para cada polo activo es al menos la mitad de la frecuencia de pulsos. En algunos casos, el controlador del motor está configurado para pulsar corriente sólo por debajo de una velocidad del motor correspondiente a un pulso por ciclo de trabajo de energización. En algunas realizaciones, al menos uno de los devanados eléctricos incluye múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo y enrolladas alrededor de un núcleo común. Un devanado eléctrico de este tipo puede tener una reactancia baja, lo que permite un decaimiento más rápido de la corriente entre pulsos.

Motores de ejemplo

[0175] La figura 4 ilustra un ejemplo de motor 400 que incluye un estator 410 y un rotor 420. El motor 400, el estator 410 y el rotor 420 pueden ser el motor eléctrico 102, el estator 106 y el rotor 108 de la figura 1, respectivamente. El motor 400 es un motor de separación radial, como un motor de reluctancia conmutada (SRM), y el rotor 420 está dispuesto dentro del estator 410. La figura 5 es una vista ampliada de una porción de la figura 4.

[0176] El estator 410 presenta una serie de polos de estator 412 circunferencialmente espaciados, cada uno de los cuales incluye un núcleo de estator 414 y devanados eléctricos asociados 416 que rodean el núcleo de estator 414. El estator 410 puede tener, por ejemplo, una pluralidad de salientes de estator que pueden sobresalir de una placa trasera de estator 402 (por ejemplo, un yugo o chapa trasera), creando así ranuras de estator 418 y núcleos de estator 414. Entre los polos adyacentes del estator 412, existe una ranura 418. Los núcleos del estator 414 pueden ser de un material continuo o una combinación de componentes discretos ensamblados en el motor. Mientras que un material continuo puede proporcionar una mayor consistencia dimensional sin permitir la entrada de aire en el conjunto del estator, una serie de polos discretos del estator mantenidos en alineación mecánica por una carcasa del estator puede permitir una fabricación y montaje eficientes. Los extremos terminales de los salientes del estator pueden ser difusos, rectos o inferiores con respecto a los salientes del estator y a la chapa trasera o yugo. En este ejemplo, los salientes del estator son rectos y de sección transversal constante desde el yugo hasta su extremo distal en un entrehierro 430 definido entre el estator 410 y el rotor 420, como se ilustra en la figura 5.

[0177] Los polos del estator 412 permiten la comunicación electromagnética entre la electrónica de potencia y el núcleo del estator 414, con aislamiento eléctrico entre los devanados de los polos. El devanado eléctrico 416 puede incluir una bobina de alambre conductor de electricidad, como un alambre magnético aislado o esmaltado, o una pluralidad de barras conductoras de electricidad soldadas, como barras de cobre aisladas. Los devanados eléctricos 416 pueden incluir un devanado de alambre trenzado tal como un alambre de Litz. El alambre de Litz puede utilizarse para el funcionamiento a frecuencias más altas, mientras que otras configuraciones, como el alambre cuadrado o plano, pueden utilizarse para aumentar la densidad del bobinado y aumentar el efecto piel. Cada devanado eléctrico 416 puede incluir múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo y enrolladas alrededor de un núcleo de estator común 414.

[0178] El rotor 420 también tiene una serie de polos de rotor separados circunferencialmente 422 que definen ranuras 423 entre ellos. El rotor 420 tiene una superficie 402 móvil con respecto a una superficie 401 del estator 410 en una dirección de movimiento. Las ranuras 423 se extienden en un ángulo distinto de cero, por ejemplo, a 90 grados, con respecto a la dirección de movimiento. La superficie 402 del rotor 420 está separada de la superficie 401 del estator 410 para definir el entrehierro 430 entre los polos 412 del estator y los polos 422 del rotor. Cabe señalar que el entrehierro 430 puede llenarse con otro fluido que no sea aire.

[0179] El entrehierro 430 puede mantenerse constante durante todo el funcionamiento. En los motores descritos a continuación, los polos del estator 412 y los polos del rotor 422 deben mantener un entrehierro distinto de cero para evitar daños catastróficos resultantes del contacto de los polos del rotor 422 con respecto a los polos del estator 412. Como se ilustra en la figura 5, el entrehierro 430 tiene una profundidad D_g perpendicular a la dirección de movimiento. La profundidad D_g puede estar en un rango de 0,05 a 2,0 milímetros, por ejemplo, para motores con una potencia inferior a 250 kilovatios (kW). El polo del rotor 422 puede tener una anchura W_1 a lo largo de la dirección de movimiento, y la ranura del rotor 423 puede tener una anchura W_2 a lo largo de la dirección de movimiento y una profundidad D_s perpendicular a la dirección de movimiento. Como se explica con más detalle a continuación, el tamaño del entrehierro 430 puede afectar a la fuerza horizontal generada. En algunos ejemplos, las ranuras 423 tienen una profundidad preferida D_s de 50 a 500 veces la del entrehierro 430 (D_g) y un ancho preferido W_2 en la superficie 402 de 25 a 100 veces la profundidad D_g del entrehierro 430. Como se discute con más detalle a continuación, pueden disponerse barreras de flujo dentro de las ranuras 423 entre los polos 422 del rotor y/o las ranuras 418 entre los polos 412 del estator, que pueden alterar el flujo de flujo magnético entre el estator 410 y el estator 420 y cambiar el rendimiento del motor 400. En este ejemplo, las barreras de flujo llenan las ranuras. Los tamaños del entrehierro 430 y de las ranuras 423 pueden afectar al rendimiento del motor 400.

[0180] La figura 6 es una vista en perspectiva de un ejemplo de núcleo de rotor 600 hecho de una pila de capas laminadas 601 de material ferromagnético. El núcleo del rotor 600 puede ser utilizado para el rotor 420 de la figura 4. Las capas laminadas 601 están separadas entre sí, al menos en una superficie del rotor 600, por interfaces 603 menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Así, las interfaces inhiben la corriente, en comparación con el material ferromagnético de las capas. En algunos casos, las interfaces 603 consisten en superficies oxidadas del material ferromagnético. Por ejemplo, el material ferromagnético puede ser hierro (Fe), y las interfaces pueden ser de óxido de hierro (FeOx). En algunos casos, las interfaces 603 incluyen láminas de material aislante intercaladas con las capas ferromagnéticas 601. Por ejemplo, las láminas de material aislante pueden incluir láminas de película de resina.

[0181] Las capas laminadas 601 definen un cuerpo de rotor 606 que tiene un orificio axial 605 donde un árbol de salida, por ejemplo, el árbol de salida 107 de la figura 1, puede insertarse y desplazarse junto con el núcleo del rotor 600. Las capas laminadas 601 también definen una serie de polos de rotor 602 separados que sobresalen radialmente del cuerpo de rotor 606 y se extienden axialmente en paralelo al orificio axial 605. Los polos salientes 602 del rotor definen ranuras 604 que se extienden axialmente paralelas al orificio axial 605.

Ejemplo de barreras de flujo

[0182] A continuación, se presentan y discuten varios diseños/configuraciones de barreras de flujo para motores eléctricos, incluidos los SRM, los motores de separación axial y los motores lineales.

Ejemplo de barrera de flujo con una barra conductora

[0183] La figura 7 ilustra un ejemplo de rotor 700 con barreras de flujo que rellenan las ranuras entre los polos adyacentes del rotor. El rotor 700 puede incluir el núcleo del rotor 600 de la figura 6, y los polos del rotor 702 pueden ser los polos del rotor 602 de la figura 6. Los polos del rotor 702 pueden ser de una pila de capas de material ferromagnético separadas entre sí por una interfaz menos conductora eléctricamente que el material ferromagnético.

[0184] Polos adyacentes del rotor 702 definen ranuras, por ejemplo, las ranuras 604 de la figura 6. El rotor 700 incluye barreras de flujo 704 entre los polos adyacentes del rotor 702 y en las ranuras de los polos adyacentes del rotor 702. Cada una de las barreras de flujo 704 tiene una conductividad eléctrica superior a la del material ferromagnético. Las barreras de flujo 704 están aisladas eléctricamente entre sí fuera del material ferromagnético del rotor 700, aunque pueden estar conectadas eléctricamente entre sí a través del material del rotor.

[0185] Como se ilustra en la figura 7, una barrera de flujo 704 puede tener la forma de una barra conductora de electricidad que se extiende a lo largo de una dirección axial del rotor 700, por ejemplo, paralela a un orificio axial 605 de la figura 6, y cruzando múltiples interfaces de la pila de capas. En algunos ejemplos, la barra está formada por un único material, como aluminio, cobre, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno o nanotubos de carbono. En algunos ejemplos, la barra contiene combinaciones de materiales, como cobre-hierro, níquel-hierro, plomo-hierro, latón-hierro, plata-hierro, zinc-hierro, oro-hierro, bismuto-hierro, aluminio-hierro, grafito-hierro pirolítico, grafeno-hierro, nanotubos de carbono-hierro, o aleaciones Alinco (aluminio-níquel-cobalto), de manera que la barra (por ejemplo, cobre-hierro) puede tener una conductividad eléctrica superior a la del material ferromagnético del núcleo del rotor. En algunos casos, la barra contiene al menos uno por ciento, en algunos casos cinco por ciento, en algunos casos 15 por ciento, por fracción de masa, de un elemento seleccionado del grupo que consiste en cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno y nanotubos de carbono. En algunos casos, la barra contiene al menos un 20 por ciento, en algunos casos un 40 por ciento, en algunos casos un 60 por ciento, por fracción de masa, de un elemento, o combinación de elementos, seleccionados del grupo que consiste en hierro, níquel y cobalto. El rotor 700 puede fabricarse fundiendo uno o más materiales de las barreras de flujo 704 directamente en las ranuras entre los polos del rotor 702, de forma que las ranuras se rellenen con las barreras de flujo.

[0186] El rotor 700 con las barreras de flujo 704 en las ranuras entre los polos del rotor 702 puede ser utilizado como el rotor 420 de la figura 4 en un motor, por ejemplo, el motor 400 de la figura 4. El rotor 700, junto con un estator, por ejemplo, el estator 410 de la figura 4, define una separación nominal, por ejemplo, la separación 630 de la figura 6, entre los polos del estator y los polos del rotor. La barra tiene una superficie expuesta orientada hacia la separación nominal. En muchos casos, las superficies expuestas de las barras forman una superficie cilíndrica con las superficies de los polos del rotor.

Efecto de las barreras de flujo

[0187] Las figuras 8A-C y 9A-C ilustran el efecto de las barreras de flujo sobre el flujo magnético entre los polos del estator y los polos del rotor y a través de la separación nominal. Las figuras 8A-C ilustran el flujo magnético sin barreras de flujo (por ejemplo, con aire relleno de las ranuras) entre los polos del rotor en una posición totalmente desalineada (figura 8A), una posición semialineada (figura 8B), y posición totalmente alineada (figura 8C).

[0188] Cuando un polo 802 del estator, por ejemplo, el polo 412 del estator de la figura 4, se energiza, se genera un campo magnético y el flujo magnético fluye entre el polo 802 del estator y un polo 804 del rotor, por ejemplo, el polo 422 del rotor de la figura 4 o el polo del rotor 602 de la figura 6. El polo 804 del rotor es móvil con respecto al polo 802 del estator en una dirección de movimiento paralela a la separación nominal 805 definida entre el polo 804 del rotor y el polo 802 del estator.

[0189] En la posición totalmente desalineada, como se ilustra en la figura 8A, el flujo magnético 810 fluye con un ángulo con respecto a la dirección de movimiento. Una parte del flujo magnético 810 fluye hacia el polo 804 del rotor a través de una ranura 803 adyacente al polo 802 del estator y llena de aire; otra parte del flujo magnético 810 fluye hacia el polo 804 del rotor a través de una ranura 806 adyacente al polo 804 del rotor y llena de aire. En la posición semialineada, como se ilustra en la figura 8B, el flujo magnético 820 tiene más porciones que fluyen a través de la separación nominal 805 y menos porciones que fluyen a través de la ranura del estator 803 y la ranura del rotor 806. El ángulo entre el flujo magnético 820 y la dirección de movimiento aumenta. En la posición alineada, como se ilustra en la figura 8C, el flujo magnético 830 fluye hacia el polo del rotor 804 sustancial y radialmente a través de la separación nominal 805. El ángulo entre el flujo magnético 830 y la dirección de movimiento llega a ser de casi 90 grados.

[0190] Las figuras 9A-C ilustran las mismas tres posiciones relativas rotor-estator, pero con barreras de flujo llenando las ranuras entre polos adyacentes del rotor 904: con los polos en una posición totalmente desalineada (figura 9A), una posición semialineada (figura 9B), y posición totalmente alineada (figura 9C). Cuando se energiza un polo 902 del estator, se genera un campo magnético y el flujo magnético fluye desde el polo 902 del estator a un polo 904 del rotor, y el polo 904 del rotor y el polo 902 del estator definen una separación nominal 905.

[0191] En la posición no alineada, como se ilustra en la figura 9A, el flujo magnético 910 fluye con un ángulo con respecto a la dirección de movimiento. Alguna porción del flujo magnético 910 fluye hacia el polo 904 del rotor a través de una ranura 903 adyacente al polo 902 del estator; alguna porción del flujo magnético 910 fluye hacia el polo 904 del rotor a través de una barrera de flujo 906 rellena en una ranura adyacente al polo 904 del rotor. No obstante, en comparación con el flujo magnético 810 de la figura 8A, la porción de flujo magnético a través de la barrera de flujo 906 se suprime en gran medida y se desvía para extenderse más a lo largo de la brecha nominal 905, de tal manera que el flujo magnético 810 se concentra y redirige más tangencialmente a lo largo de la dirección de movimiento. Del mismo modo, en la posición semialineada, como se ilustra en la figura 9B, el flujo magnético 920 está más concentrado en comparación con el flujo magnético 820 de la figura 8B, particularmente la porción de flujo magnético a través de la barrera de flujo 906 siendo suprimida y repelida en gran medida. En la posición alineada, como se ilustra en la figura 9C, el flujo magnético 930 es similar al flujo magnético 830 y fluye sustancialmente a través de la separación nominal 905 hacia el polo 904 del rotor.

[0192] Bajo una frecuencia magnética operativa, la barrera de flujo presenta propiedades diamagnéticas para repeler el flujo magnético y generar así una fuerza de repulsión contra el polo del rotor. Cuando los polos del estator y del rotor se colocan en un estado no alineado, la reflexión electromagnética interna significativa en la barrera de flujo altera la dirección

neta del flujo magnético entre los polos. El apantallamiento diamagnético en la ranura llena de barrera de flujo empuja eficazmente el rotor en una dirección de movimiento deseada, mientras que la atracción magnética entre los polos del estator y del rotor tira del rotor en la misma dirección. De este modo, utilizando dicha barrera diamagnética, el vector de la línea de campo magnético puede modificarse durante el funcionamiento del motor, de modo que la fuerza radial se dirija sustancialmente más a lo largo de la dirección de movimiento. Esto aumenta la proporción de fuerza inducida magnéticamente que actúa para propulsar el rotor con respecto al estator. Este efecto genera más energía cinética útil por ciclo, a partir de una energía de entrada dada de un sistema de accionamiento eléctrico, por ejemplo, el sistema de accionamiento eléctrico 100 de la figura 1. Por ejemplo, cuando el polo del rotor se desplaza desde la posición totalmente desalineada hasta la posición totalmente alineada con respecto al polo de estator, la diferencia de coenergía para las ranuras con barreras de flujo es mucho mayor que la diferencia de coenergía para las ranuras sin barreras de flujo, como el aire, lo que también puede evitar mejor los campos de franja. En otras palabras, se ha aumentado la proporción de saliencia efectiva.

[0193] La figura 10 ilustra las fuerzas netas inducidas magnéticamente con y sin barreras de flujo entre polos adyacentes. Cuando un polo de estator 1012 de un estator 1010, por ejemplo, el polo de estator 412 de la figura 4, se energiza, se genera un campo magnético y el flujo magnético fluye desde el polo 1012 del estator a un polo 1022 del rotor 1020, por ejemplo, el polo 422 del rotor de la figura 4 o el polo del rotor 602 de la figura 6. El rotor 1020 es móvil con respecto al estator 1010 en una dirección de movimiento y define, junto con el estator 1010, una separación nominal 1015.

[0194] Cuando sólo hay aire en las ranuras 1024 entre polos adyacentes del rotor 1022, la atracción entre el polo 1012 del estator y el polo 1022 del rotor causa una fuerza de tracción instantánea neta F_0 en un ángulo θ^1_0 con respecto a la dirección del movimiento. Cuando hay una barrera de flujo 906 en la ranura 1024 entre polos de rotor adyacentes 1022 y/o en la ranura 1014 entre polos de estator adyacentes 1012, la atracción entre el polo de estator 1012 y el polo de rotor 1022 causa una fuerza de tracción neta F_1 en un ángulo θ^1_1 con respecto a la dirección de movimiento. Como se ha expuesto antes en las figuras 9A y 9B, la barrera de flujo puede presentar propiedades diamagnéticas para repeler el flujo magnético, generando eficazmente una fuerza de repulsión contra el polo de estator. Como resultado, la fuerza de tracción neta F_1 se redirige para tener un componente mayor a lo largo de la dirección de movimiento. Es decir, $F_1 \cos \theta^1_1 > F_0 \cos \theta^1_2$, donde F_1 puede ser sustancialmente idéntica a F_0 . Cuando el polo del rotor 1022 está en la posición totalmente desalineada, tal como se ilustra en la figura 9A, el ángulo es menor y la fuerza horizontal mayor. Cuando el polo del rotor 1022 está en la posición semialineada, como se ilustra en la figura 9B, se produce el mayor cambio de reluctancia y se puede obtener un par máximo.

Ejemplo de barrera de flujo con una capa conductora sobre una barra

[0195] La figura 11 es una vista en perspectiva de otro rotor 1100 con barreras de flujo 1104 en ranuras entre polos adyacentes del rotor 1102. Similar al rotor 700 de la figura 7, los polos del rotor 1102 están formados por una pila de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las interfaces pueden ser inhibidoras de corriente. Las barreras de flujo 1104 incluyen, cada una, una barra eléctricamente conductora 1108 que cruza múltiples interfaces y están eléctricamente aisladas entre sí externas al material ferromagnético. Diferente de la barrera de flujo 704 del rotor 700 de la figura 7, la barrera de flujo 1104 del rotor 1100 incluye adicionalmente una capa eléctricamente conductora 1106 que cubre una barra 1108. La capa eléctricamente conductora 1106 está hecha de un material diferente a la barra 1108 y puede tener una conductividad eléctrica más alta que la barra 1108. En algún ejemplo, la barra 1108 está hecha de hierro, níquel o cobalto, y la capa eléctricamente conductora 1106 está hecha de cobre, aluminio, latón, plata, zinc, oro, grafito pirolítico, bismuto, grafeno o nanotubos de carbono. El rotor 1100 se puede fabricar fundiendo un material de la barra 1108 en las ranuras de los polos del rotor 1102 y depositando la capa eléctricamente conductora 1106 sobre la barra 1108, tal como por galvanoplastia o pulverización catódica.

[0196] Una superficie exterior del rotor 1100 y una superficie exterior de un estator 1120 definen una separación nominal 1130, como se ilustra en la figura 12. El rotor 1100 es móvil con respecto al estator 1120 en una dirección de movimiento. La capa eléctricamente conductora 1106 forma, al menos parcialmente, la superficie exterior del rotor 1100. Durante la operación, cuando un polo de estator 1122 del estator 1120 es energizado, por ejemplo, por corriente pulsada en un ciclo de trabajo como se ilustra en la figura 3, se genera un campo magnético alterno y un flujo magnético correspondiente 1202 fluye desde el polo de estator 1122 al polo del rotor 1102 a través de la separación nominal 1130. El campo magnético pulsante induce una corriente parásita 1204 en la capa eléctricamente conductora 1106 de la barrera de flujo 1104. La corriente parásita 1204 puede generar un campo magnético secundario opuesto al campo magnético alterno aplicado, produciendo así una fuerza de repulsión para alterar la dirección neta del flujo magnético 1202, como se ha comentado anteriormente.

[0197] La capa eléctricamente conductora 1106 tiene una anchura finita W en la dirección de movimiento y un espesor finito T desde la superficie exterior del rotor 1100 a lo largo de una dirección perpendicular a la dirección de movimiento (o la separación nominal 1130), cruzando múltiples interfaces de la pila de capas. La anchura W de la capa 1106 es preferiblemente más de dos veces, en algunos casos más de cinco veces, y en algunos casos más de 10 veces el espesor T de la capa 1106. La barra 1108 puede ser de mayor grosor que la capa 1106.

[0198] En algunos ejemplos, el espesor T de la capa 1106 es mayor que una profundidad de piel de corriente eléctrica del material de la capa 1106 a una frecuencia operativa particular, de tal manera que la corriente parásita 1204 fluye principalmente en la piel de la capa 1106 entre la superficie exterior y la profundidad de piel y se propaga a lo largo de una larga distancia en la capa 1106 a lo largo de la dirección de movimiento, hacia el polo adyacente del rotor 1102. De este modo, el flujo magnético 1202 puede concentrarse más en la capa 1106 y redirigirse más tangencialmente para causar una fuerza horizontal mayor a lo largo de la dirección de movimiento.

Ejemplo de barrera de flujo con pares de capas alternas

[0199] La figura 13 es una vista en perspectiva de otro rotor 1300 con barreras de flujo 1304 en ranuras entre polos adyacentes del rotor 1302. Similar al rotor 1100 de la figura 11, los polos del rotor 1302 pueden estar formados por una pila de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las barreras de flujo 1304 están aisladas eléctricamente entre sí fuera del material ferromagnético del rotor 1300. Diferente de la barrera de flujo 1104 del rotor 1100 de la figura 11, cada barrera de flujo 1304 del rotor 1300 está formada por múltiples pares de capas alternas 1306 y 1308 dispuestas en ranuras entre polos adyacentes del rotor 1302. Las capas discretas 1306 y 1308 se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de materiales diferentes. En un ejemplo particular, la capa 1306 está hecha de cobre y la capa 1308 está hecha de níquel. La capa 1306 puede ser más conductora eléctricamente que la capa 1308, mientras que la capa 1308 puede ser más permeable magnéticamente que la capa 1306. El rotor 1300 puede fabricarse depositando alternativamente las capas 1306 y 1308 en las ranuras entre los polos del rotor 1302.

[0200] Como se ilustra en la figura 13A, cada capa 1306 tiene un espesor finito T1 en una dirección perpendicular a la separación nominal y cada capa 1308 tiene un espesor finito T2 en la dirección perpendicular a la separación nominal. En algunos ejemplos, el espesor T1 de la capa 1306 está configurado para ser menor que una profundidad de piel de corriente eléctrica de un material de la capa 1306 a una frecuencia operativa particular, y el espesor T2 de la capa 1308 está configurado para ser menor que una profundidad de piel de corriente eléctrica de un material de la capa 1308 a la frecuencia operativa particular. De esta manera, como se ilustra en la figura 13A, un flujo magnético 1310 que fluye desde un estator al rotor 1300 puede propagarse a través de las múltiples capas 1306 y 1308, causando corrientes parásitas 1312 y, en consecuencia, un campo magnético secundario que se genera en las múltiples capas 1306 y 1308.

Ejemplo de barreras de flujo con polos blindados

[0201] La figura 14 es una vista en perspectiva de otro rotor 1400 con barreras de flujo 1404 en ranuras entre polos adyacentes del rotor 1402. Similar al rotor 1100 de la figura 11, los polos del rotor 1402 están formados por una pila laminada de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las interfaces pueden ser inhibidoras de corriente. Las barreras de flujo 1404 están aisladas eléctricamente unas de otras externamente al material ferromagnético. Diferente de la barrera de flujo 1104 del rotor 1100 de la figura 11 que tiene una capa eléctricamente conductora en la parte superior de una barra, la barrera de flujo 1404 del rotor 1400 tiene una capa 1406 de material eléctricamente conductor que rodea un núcleo 1408 de un material de núcleo en las ranuras entre polos adyacentes del rotor 1402. El material del núcleo 1408 puede ser más permeable magnéticamente que el material conductor eléctrico de la capa 1406. El núcleo 1408 puede ser del mismo material que los polos del rotor.

[0202] La capa 1406 incluye tres porciones de capa 1406a, 1406b, 1406c. La porción de capa 1406a cubre una región de superficie interpolar entre polos adyacentes del rotor 1402 y formando una porción de una superficie exterior del rotor 1400. Cada núcleo 1408 subyace a una respectiva región de superficie entre los polos. La región de la superficie entre polos puede ser continua en una dirección perpendicular a la dirección de movimiento a través de una extensión completamente magnéticamente activa de las regiones de la superficie de los polos del rotor 1400. Las porciones de capa 1406b, 1406c se extienden desde las porciones de capa 1406a a través de las interfaces de la pila de capas y entre los polos adyacentes 1402 del rotor y el núcleo 1408 de la barrera de flujo.

[0203] Similar a la capa 1106 de la figura 11, cada porción de capa 1406a, 1406b, 1406c puede tener un espesor mayor que una profundidad de piel de corriente eléctrica del material eléctricamente conductor de la capa 1406, de tal manera que el flujo magnético a través de la porción de capa 1406a se redirige más tangencialmente hacia los polos adyacentes 1402 del rotor, y las porciones de capa 1406b y 1406c actúan para inhibir o apantallar el flujo magnético entre los polos y el núcleo 1408. La porción de capa 1406a tiene una anchura finita que se extiende en la dirección de movimiento. Las porciones de capa 1406b y 1406c se extienden en el material ferromagnético a una profundidad total desde la superficie exterior del rotor 1400. La profundidad total puede estar comprendida entre aproximadamente 1 y 50 mm, en algunos casos entre aproximadamente 2 y 25 mm, y en algunos casos entre aproximadamente 5 y 15 mm, por ejemplo, y entre un 2 y un 2000 por ciento, en algunos casos entre un 5 y un 500 por ciento, y en algunos casos entre un 10 y un 200 por ciento de la anchura de la porción de capa 1406a.

[0204] El material eléctricamente conductor de la capa 1406 puede incluir cobre. En algunas implementaciones, el material del núcleo 1408 y el material ferromagnético de los polos del rotor 1402 tienen propiedades de material idénticas, por ejemplo, de hierro. Los núcleos 1408 y los polos del rotor 1402 pueden ser porciones contiguas de la pila laminada de capas.

[0205] En algunos casos, el rotor 1400 puede fabricarse depositando el material del núcleo en ranuras entre polos adyacentes de un rotor, por ejemplo, el rotor 600 de la figura 6, para formar los núcleos 1408 con separaciones entre los polos 1402 y los núcleos adyacentes 1408 y, a continuación, depositar el material eléctricamente conductor en las separaciones y en la parte superior de los núcleos 1408 para formar la capa 1406. En algunos casos, las capas de material ferromagnético conformado se apilan alineadas para formar ranuras que reciban el material conductor; y a continuación, el material conductor de la electricidad se vierte o deposita de otro modo en las ranuras y sobre la región de la superficie superior para formar la capa conductora de la electricidad 1406.

[0206] La barrera de flujo 1404 puede considerarse como un polo blindado. Cada polo blindado puede tener el mismo tamaño que un polo del rotor. Mientras que a baja frecuencia o en condiciones estáticas de corriente continua hay poca diferenciación entre un polo del rotor y un polo blindado, en funcionamiento a frecuencia moderada y alta, la reluctancia magnética del polo blindado supera la reluctancia magnética del aire, lo que se traduce en una mayor densidad de par. De este modo, al formar un polo apantallado entre los polos adyacentes del rotor, el vector de la línea de campo magnético durante el funcionamiento de los polos de reluctancia (polos del estator y polos del rotor) puede modificarse de forma única, de modo que el campo magnético sea sustancialmente más tangencial. Esto permite a un motor utilizar la fuerza radial (o la fuerza normal o una presión radial) como fuerza tangencial, que puede ser un orden de magnitud mayor que la fuerza tangencial. Los polos protegidos también pueden extenderse a los conjuntos de polos del estator vecinos para disminuir aún más las propiedades de dispersión del flujo del motor.

[0207] La figura 15 es una vista en perspectiva de otro rotor 1500 con otro ejemplo de polos blindados como barreras de flujo 1504 entre polos adyacentes del rotor 1502. Cada barrera de flujo 1504 está formada por un bucle conductor de electricidad 1506 alrededor de un núcleo magnéticamente permeable 1508 entre polos adyacentes 1502. El bucle 1506 puede ser una pila de capas finas de material conductor separadas por material menos conductor eléctricamente de permeabilidad magnética similar, por ejemplo, capas de cobre separadas por óxido de cobre, esmalte, aluminio u óxido de aluminio. Similar al rotor 1400 de la figura 14, los polos del rotor 1502 pueden estar hechos de una pila laminada de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las barreras de flujo 1504 forman regiones superficiales interpolares entre las regiones superficiales de los polos 1502 del rotor y pueden considerarse como polos apantallados superficialmente. Las regiones de superficie entre polos y las regiones de superficie entre polos definen una superficie exterior (o una superficie final) del rotor 1500. Cada núcleo 1508 forma una porción de la superficie exterior rodeada por un bucle 1506 respectivo. Cada bucle 1506 forma una porción de la superficie cilíndrica exterior del rotor 1500, como se ilustra en la figura 15A.

[0208] Los bucles 1506 pueden estar hechos de un material eléctricamente conductor, producto de baja energía. Por ejemplo, los bucles 1506 pueden estar hechos de cobre. El material del núcleo 1508 es más permeable magnéticamente que el material de los bucles 1506. El material del núcleo puede ser ferromagnético, por ejemplo, hierro. El material de los núcleos 1508 y el material ferromagnético de los polos del rotor 1502 pueden ser idénticos, como por ejemplo porciones contiguas de la pila de capas. En algunas realizaciones, el rotor 1500 se forma grabando regiones del material ferromagnético de la pila de las capas de acuerdo con las formas y posiciones de los bucles 1506 y, a continuación, depositando/colando material eléctricamente conductor en las regiones grabadas para formar los bucles 1506. Alternativamente, una barrera de flujo puede estar formada de material eléctricamente conductor, producto de baja energía dispuesto dentro del propio núcleo 1508.

[0209] Los bucles conductores 1506 de las barreras de flujo 1504 no se superponen y están aislados eléctricamente entre sí en el exterior del material ferromagnético. Las barreras de flujo 1504 están conectadas entre sí únicamente a través del material ferromagnético. Las barreras de flujo 1504 definen al menos una trayectoria eléctricamente conductora (por ejemplo, los bucles 1506) sobre el material de los núcleos 1508. Por "no superposición" se entiende que las barreras de flujo 1504 adyacentes están dispuestas de tal manera que cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de una barrera de flujo no rodea ninguna porción de cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera de flujo 1504.

[0210] Como se ilustra en la figura 15, el bucle 1506 de la barrera de flujo 1504 puede formar un circuito cerrado hecho del material eléctricamente conductor, por ejemplo, cobre. En algunas realizaciones, una barrera de flujo puede formarse como un polo apantallado por un bucle abierto de material conductor. Por ejemplo, la figura 16 es una vista esquemática de otro rotor 1600 con barreras de flujo 1604 entre polos adyacentes del rotor 1602. La barrera de flujo 1604 es similar a la barrera de flujo 1504 de la figura 15, excepto que la barrera de flujo 1604 tiene un bucle abierto 1606 con una ruptura 1608, por ejemplo, un espacio de aire, como se ilustra en la figura 16.

[0211] El bucle abierto 1606 también puede estar hecho de material eléctricamente conductor, por ejemplo, cobre. El bucle abierto 1606 define una capacitancia que puede formarse en una ubicación discreta a lo largo del bucle abierto 1606. Por ejemplo, dos superficies extremas opuestas del bucle abierto 1606 forman un entrehierro 1608, formando un condensador. El bucle abierto 1606 puede configurarse para tener una frecuencia de resonancia en un rango transmisible de un material magnéticamente permeable de los polos 1602 del rotor 1600, por ejemplo, hierro. En algunas realizaciones, el rotor 1600 se forma grabando regiones del material magnéticamente permeable de acuerdo con las formas y posiciones de los bucles abiertos 1606 y depositando/colando material eléctricamente conductor en las regiones grabadas para obtener los bucles 1606. Las separaciones 1608 pueden formarse durante la deposición del material conductor, o pueden

crearse mediante ablación o eliminación de otro modo de una tira estrecha de material para formar cada hueco. Cada separación de capacitancia 1608 abarca preferentemente al menos una interfaz de capa de la pila.

Ejemplo de barreras de flujo con capas superficiales

[0212] La figura 17 es una vista en perspectiva de otro rotor 1700 con barreras de flujo 1704 entre polos adyacentes del rotor 1702. Cada barrera de flujo 1704 incluye una capa eléctricamente conductora 1706 que forma una región superficial interpolar entre polos adyacentes 1702. Similar al rotor 1500 de la figura 15, los polos del rotor 1702 pueden estar hechos de una pila laminada de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Sin embargo, a diferencia de la barrera de flujo 1504 de la figura 15 que tiene un bucle eléctricamente conductor 1506, la capa eléctricamente conductora 1706 cubre por completo la región de superficie interpolar y forma una porción de una superficie exterior del rotor 1700. La capa eléctricamente conductora 1706 atraviesa esencialmente todas las placas magnéticamente activas de la pila y está preferiblemente en contacto directo con cada una de las placas de la pila.

[0213] La capa eléctricamente conductora 1706 puede formarse bajo la superficie exterior, por ejemplo, grabando el material ferromagnético de la pila de capas para formar regiones interpolares y fundiendo material eléctricamente conductor en las regiones interpolares.

[0214] La figura 18 es una vista en perspectiva de otro rotor 1800 con barreras de flujo 1804 entre polos adyacentes del rotor 1802. A diferencia de la barrera de flujo 1704 de la figura 17 que tiene la capa eléctricamente conductora formada bajo la superficie exterior del rotor 1700, cada barrera de flujo 1804 incluye una capa eléctricamente conductora 1806 formada sobre una superficie exterior cilíndrica del rotor 1800.

[0215] Como se ilustra en la figura 19, la capa eléctricamente conductora 1806 tiene un espesor que se extiende desde la superficie exterior hacia una separación nominal 1910 que está definida por un estator 1900 y los polos 1802 del rotor 1800. El estator 1900 tiene una superficie exterior que define múltiples polos del estator 1902 con devanados eléctricos asociados 1904. Como la capa eléctricamente conductora 1806 está formada sobre la superficie cilíndrica exterior del rotor 1800, reside dentro de la separación nominal 1910, haciendo que la holgura entre el rotor y el estator sea menor en la capa 1806 que adyacente a la capa 1806.

Efectos de los materiales/configuraciones de la barrera de flujo en la fuerza

[0216] La figura 20 ilustra las fuerzas generadas por motores que tienen diferentes barreras de flujo (por ejemplo, diferentes materiales/configuraciones) bajo un rango de frecuencias. Aquí fuerza se refiere a una fuerza útil paralela a una dirección de movimiento en la que un rotor es móvil con respecto a un estator. La frecuencia se refiere a una frecuencia magnética de una corriente parásita inducida en una barrera de flujo que puede controlarse mediante una frecuencia de pulsos de una corriente que energiza los polos del estator.

[0217] La curva 2002 representa el aire como un material pasivo que rellena las ranuras entre los polos adyacentes del rotor, donde la fuerza útil permanece constante a bajas frecuencias y finalmente cae rápidamente a frecuencias más altas, por ejemplo, por encima de un límite del núcleo en el punto 2001. La curva 2004 representa un relleno de un solo material (por ejemplo, de cobre) como barrera dinámica de flujo no ferromagnético, que se comporta esencialmente como el aire a bajas frecuencias, pero que aumenta por encima de una frecuencia de cruce (en el punto de cruce 2005). La curva 2006 representa un polo blindado (por ejemplo, un polo en bucle) como barrera dinámica de flujo ferromagnético, donde, a frecuencias más bajas, por ejemplo, por debajo de la frecuencia de cruce, la fuerza útil es menor que con el aire, mientras que la fuerza aumenta drásticamente con la frecuencia, por ejemplo, por encima de la frecuencia de cruce, más rápido que con el material no ferromagnético recto (por ejemplo, cobre) relleno representado por la curva 2004. A lo largo de la curva 2006, el punto 2003 muestra un límite de fuerza baja de reluctancia de ranura conductora, el punto 2005 muestra una frecuencia de cruce y el punto 2007 muestra una fuerza pico limitada por el entrehierro.

[0218] Para evitar la disminución de la fuerza a velocidades más bajas, el motor puede funcionar con frecuencias magnéticas más altas, por ejemplo, impulsando la corriente a través de cada devanado de polos a bajas revoluciones por minuto (RPM) para aumentar así la fuerza de salida. La razón por la que la fuerza para el polo apantallado es menor que la del aire a frecuencias más bajas puede deberse en gran medida al hecho de que existe una trayectoria de flujo ferromagnético alternativa que da lugar a una asimetría de reluctancia relativa. A frecuencias más altas, el motor está dominado por un apantallamiento inductivo relativo que se produce en la frecuencia de cruce. Este es el punto 2005 en el que la relación de saliencia del polo blindado es igual a la relación de saliencia del aire: efectivamente, la profundidad de la piel del polo blindado imita la profundidad de la piel del aire. A medida que aumenta la frecuencia, la relación de saliencia del polo blindado sigue aumentando.

[0219] La curva 2012 representa un superconductor no ferromagnético como barrera de flujo de relleno de material recto, donde se induce una ganancia de fuerza mayor que con el aire incluso a frecuencias relativamente bajas. En algunos casos, la barrera de flujo puede configurarse de manera que la curva 2006 y/o el punto de cruce 2005 puedan desplazarse lo más a la izquierda posible, por ejemplo, ajustando la relación de materiales (por ejemplo, la relación entre el material eléctricamente conductor del bucle y el material magnéticamente permeable del núcleo), el propio material, la

estratificación de materiales (por ejemplo, materiales individuales o combinación de materiales), la orientación de las capas de material con respecto a la interfaz magnética, o la geometría (por ejemplo, la profundidad, la anchura y la proximidad relativa con respecto al entrehierro). Por ejemplo, si el polo blindado de la curva 2006 está hecho de cobre y el núcleo del rotor de hierro con una relación 10:90, la curva 2006 puede convertirse en la curva 2008 con el polo blindado hecho de cobre y el núcleo del rotor de hierro con una relación 66:33.

[0220] Además, la estructura de la barrera de flujo también puede afectar al rendimiento del motor. Cuando la barrera de flujo está hecha de pares alternados de capa eléctricamente conductora y capa magnéticamente permeable (por ejemplo, cobre y níquel), por ejemplo, la barrera de flujo 1304 de la figura 13, la relación entre la fuerza generada y la frecuencia puede representarse mediante la curva 2010, que se aproxima más a la curva 2012 para el superconductor.

Ejemplo de barreras de flujo en el interior del rotor

[0221] Las figuras 21-23 muestran otro rotor 2100 con barreras de flujo 2104 que tienen elementos eléctricamente conductores bajo la superficie del material ferromagnético del rotor. Como se muestra en la figura 22, un cuerpo de rotor 2102 está hecho de una pila de capas laminadas del material ferromagnético. Las capas laminadas están separadas entre sí, al menos en una superficie del rotor, por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las interfaces pueden ser inhibidoras de corriente. La pila define orificios 2107 que se extienden a lo largo de su longitud, cruzando las interfaces.

[0222] Como se muestra en la figura 23, cada barrera de flujo incluye una estructura conductora que tiene al menos dos barras eléctricamente conductoras 2110 (se muestran cuatro) que se extienden a través de cada capa de la pila para cruzar cada interfaz de la pila y se conectan eléctricamente entre sí en extremos opuestos de la pila mediante placas conductoras 2108 para formar al menos un bucle conductor dentro del rotor. Cada barra conductora se inserta en, o se funde en, un orificio longitudinal correspondiente 2107 dentro de la pila de placas del rotor, y luego se puede soldar o soldar a las placas extremas 2108. Haciendo referencia de nuevo a la figura 21, cada estructura conductora, junto con la parte de las placas ferromagnéticas situada entre las barras conductoras y que las rodea inmediatamente, forma una barrera de flujo 2104 entre dos polos adyacentes del rotor 2106.

[0223] Las figuras 24-26A muestran otro rotor 2400 con barreras de flujo 2410 que tienen elementos conductores dentro de un material ferromagnético del rotor. Similar al rotor 600 de la figura 6, un cuerpo de rotor 2402 puede estar hecho de una pila de capas laminadas del material ferromagnético. Las capas laminadas están separadas entre sí, al menos en una superficie del rotor, por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las interfaces pueden ser inhibidoras de corriente. El rotor 2400 define un orificio 2401 en un centro del cuerpo del rotor 2402. El orificio 2401 puede ser similar al orificio 605 de la figura 6, y un árbol de salida, por ejemplo, el árbol de salida 107 de la figura 1, puede insertarse y moverse junto con el rotor 2400.

[0224] Como se muestra en la figura 25, el cuerpo 2402 del rotor define una serie de polos 2404 espaciados del rotor que forman porciones radialmente más externas del cuerpo del rotor, con polos 2404 adyacentes que definen ranuras 2406 entre ellos. El cuerpo del rotor 2402 también define orificios 2408 que se extienden en paralelo a lo largo de su longitud.

[0225] En lugar de rellenar las ranuras 2406 entre polos adyacentes del rotor 2402, cada una de las barreras de flujo 2410 incluye elementos conductores de electricidad que forman al menos un bucle que abarca una extensión magnéticamente activa del cuerpo del rotor 2402 por debajo de la superficie del rotor. Como se ilustra en la figura 26, la estructura conductora de cada barrera de flujo 2410 incluye múltiples bucles 2412, 2414, 2416 de material eléctricamente conductor cada uno aislado de otro externo al material ferromagnético del cuerpo del rotor 2402. Como se ilustra en la figura 26A, cada bucle, por ejemplo, el bucle 2416, incluye al menos dos barras eléctricamente conductoras 2418 conectadas eléctricamente entre sí en extremos opuestos de la pila mediante placas eléctricamente conductoras 2420. En el montaje, cada una de las barras conductoras se extiende a lo largo de un orificio correspondiente 2408 del cuerpo del rotor, como se ilustra en la figura 25. Las placas 2420 pueden tener una forma curva con dos extremos en extensiones magnéticamente activas de polos de rotor adyacentes 2404. La forma curvada puede basarse en una forma de la ranura 2406. Haciendo referencia de nuevo a la figura 24, los bucles 2412, 2414, 2416 de la barrera de flujo 2410 pueden disponerse en serie hacia la ranura 2406. En cierto sentido, las estructuras de bucle conductoras de cada barrera de flujo se extienden a, o abarcan porciones adyacentes de, polos adyacentes del rotor.

[0226] Las barreras de flujo 2410 están aisladas eléctricamente entre sí fuera del material ferromagnético. Las barreras de flujo adyacentes 2410 se arreglan tales que cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de una barrera de flujo no rodea ninguna porción de ninguna trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera de flujo. Las barreras de flujo 2410 pueden funcionar como escudos de flujo.

[0227] Durante el funcionamiento, un campo electromagnético transitorio que intenta penetrar en el material ferromagnético rodeado por las barras 2418 y 2420 (fuera de las barras también) puede causar que la corriente fluya en las barras y la corriente resultante puede actuar para bloquear eficazmente el flujo de penetrar en la región rodeada. El flujo magnético puede entonces seguir los canales estrechos entre los segmentos 2416, 2414 y 2412, dando lugar a trayectorias de baja reluctancia flanqueadas por trayectorias de alta reluctancia. El área rodeada por las barreras de flujo

2410 está bloqueada de la comunicación magnética, lo que resulta en caminos claros de baja y alta reluctancia. La fuerza se ejerce en el polo blindado/región no blindada dentro del rotor, en lugar de en el entrehierro entre los polos del estator y del rotor (por ejemplo, como se ilustra en la figura 15). La interfaz entre una región central rodeada y una región no rodeada puede considerarse una interfaz pseudonúcleo.

Ejemplo de barreras de flujo para polos con dientes múltiples y discretos

[0228] Se puede crear una interfaz estator-rotor dentada para un motor con el fin de maximizar el par en función de la superficie en la interfaz estator-rotor. Los motores tradicionales suelen estar limitados por su par en función de la superficie debido a las interacciones relativamente débiles del campo magnético. Al incluir dientes múltiples y discretos en cada polo y disminuir efectivamente la distancia de diente a diente del motor para el mismo polo, aumenta el número de ciclos que un polo puede ser energizado para una determinada distancia recorrida. Más concretamente, al colocar varios dientes en un mismo poste, se puede aumentar la fuerza en función de la superficie.

[0229] A pesar de conseguir una mayor fuerza específica para una superficie dada, la mayor densidad de potencia en un diseño de este tipo puede verse limitada debido a las importantes fugas de flujo. Una de las principales fuentes de esta fuga de flujo procede del aire de las ranuras que se crean entre los dientes, que se hacen progresivamente más pequeñas a medida que aumenta el número de dientes. Por consiguiente, para aumentar el rendimiento del motor utilizando el motor con polos de varios dientes, la mayor fuerza específica que se crea al aumentar el número de dientes puede utilizarse con una carga de corriente menor. Con este enfoque, el motor mantiene un número relativamente bajo de polos totales en el sistema, pero puede proporcionar un mayor número de ciclos de conmutación al permitir que la geometría de superficie en cada polo individual proporcione más ciclos eléctricos por arco de polo. Más concretamente, se puede generar una fuerza específica determinada en un polo con 400-700 amperios*vueltas de fuerza magnetomotriz (FMM), mientras que un polo típico necesitaría 3.000-4.000 amperios*vueltas de FMM para soportar la misma fuerza. Dado que menos amperios*vueltas requieren menos espacio, esto permite un motor que utiliza un enfoque de múltiples ranuras con yugo y bobinados proporcionalmente más pequeños, operado a una frecuencia más alta para lograr ganancias en par y densidades de potencia y par.

[0230] La relación entre los dientes del estator y del rotor se prefiere en una proporción de 0,6:1 y 1,4:1, más preferiblemente 0,8:1 y 1,2:1. Para una ranura convencional, se prefiere que la relación entre la anchura del diente y el entrehierro sea superior a 10:1, más preferiblemente entre 30:1 y 100:1 para aplicaciones de tracción directa, y preferiblemente 30:1 para aplicaciones que requieran velocidades más altas. Para los polos del estator, se prefiere que el número de dientes por polo esté comprendido entre el 20-90 % del número de dientes por polo que maximizan la fuerza para el entrehierro dado, más preferiblemente el 40-80 % de los dientes que maximizan la fuerza para un entrehierro dado.

[0231] Para un entrehierro dado, es preferible obtener la fuerza máxima con un número de dientes inferior al número entero máximo (por ejemplo, aproximadamente el 50-80 % del máximo). Después del pico de fuerza, la ganancia de fuerza comienza a asintótica y se vuelve relativamente insignificante. Se pueden considerar más factores para optimizar la fuerza con un número de dientes por orificio en un entrehierro determinado para el diseño del motor. Por ejemplo, el aumento de las ranuras de aire puede provocar fugas de flujo adicionales y una disminución de la saliencia. Además, un menor número de polos de mayor tamaño permite una mayor densidad de potencia y manejar una mayor carga de corriente más allá de la saturación. Además, como se comenta más adelante, las ranuras de los dientes pueden rellenarse con material diamagnético, lo que también puede afectar al rendimiento del motor.

[0232] Para un polo dado, la inductancia máxima sigue siendo aproximadamente la misma a medida que disminuye el tamaño del diente y aumenta el número de dientes. Sin embargo, la inductancia mínima aumenta debido a la permeabilidad del aire en las ranuras cada vez más pequeñas. Por lo tanto, la energía total por ciclo disminuye cuando aumenta el número de dientes por polo.

[0233] La figura 27 ilustra un motor 2700 que incluye dientes múltiples y discretos en cada polo del motor. El motor 2700 incluye un estator 2710 y un rotor 2720. Las superficies exteriores del estator 2710 y del rotor 2720 definen un entrehierro 2715. El motor 2700 es similar al motor 400 de la figura 4, excepto que cada polo 2712 del estator 2710 incluye múltiples dientes 2714 con ranuras 2716 entre ellos y cada polo 2722 del rotor 2720 incluye múltiples dientes 2724 con ranuras 2726 entre ellos. Obsérvese que puede haber ranuras 2718 entre los polos adyacentes del estator 2712, mientras que el rotor 2720 puede incluir un diente alterno continuo 2724 y una ranura 2726 a lo largo de la superficie exterior del rotor 2720.

[0234] Pueden formarse barreras de flujo entre dientes adyacentes del rotor 2724 y/o dientes adyacentes del estator 2714. Las barreras de flujo pueden ser similares a las barreras de flujo 704 de la figura 7, las barreras de flujo 1104 de la figura 11, las barreras de flujo 1304 de la figura 13, o las barreras de flujo 1404 de la figura 14.

[0235] El material de la barrera de flujo puede ser un material inductivo con mayores propiedades diamagnéticas que el aire durante el funcionamiento para aumentar la energía total por ciclo. Esto crea una barrera dinámica de flujo magnético. El uso de la impedancia de un inductor para proporcionar dicha propiedad diamagnética da como resultado una mayor relación de saliencia durante el funcionamiento a frecuencias moderadas, medias y altas, por ejemplo, de 2 Hz a 1 MHz.

Como se ha comentado anteriormente, esto se puede conseguir utilizando el efecto piel de un material único totalmente metálico como el aluminio, el cobre, el latón, la plata, el zinc, el oro, el grafito pirolítico, el bismuto, el grafeno o los nanotubos de carbono o, más preferiblemente, un superconductor. El superconductor puede funcionar a una frecuencia de 0,5 Hz o superior, y el cobre puede funcionar a frecuencias moderadas o superiores, de 20 kHz a 1 MHz. En otras realizaciones, pueden utilizarse combinaciones ferromagnéticas de materiales como cobre-hierro, plomo-hierro, latón-hierro, plata-hierro, zinc-hierro, oro-hierro, bismuto-hierro, aluminio-hierro, grafito-hierro pirolítico, grafeno-hierro, nanotubos de carbono-hierro o aleaciones Alinco (aluminio-níquel-cobalto), que pueden funcionar a 100 Hz a 20 kHz. En otras realizaciones, pueden utilizarse rellenos de mayor inductancia para generar una impedancia equivalente, como la construcción de un polo en bucle o un polo blindado (por ejemplo, un polo de hierro blindado con cobre) a frecuencias más bajas. Tal combinación de materiales diamagnéticos y ferromagnéticos se aproxima a las propiedades de un metamaterial. Estructuralmente, este relleno de ranuras empieza a aproximarse a una superficie lisa y continua de las caras del rotor y del estator y, a medida que los dientes disminuyen de tamaño, dicho material de relleno de ranuras puede servir de soporte mecánico para evitar deformaciones físicas causadas por las fuerzas generadas en el funcionamiento.

[0236] A medida que los dientes se hacen más pequeños en un polo dado, las ranuras se acercan y la fuga de flujo resultante hace que disminuyan tanto la relación de saliencia como el trabajo por ciclo y, por tanto, el par. Sustituyendo el aire por materiales que se aproximen a un material diamagnético (por ejemplo, un único material diamagnético o una combinación de materiales diamagnéticos y ferromagnéticos), es posible tratar el aumento del número de dientes del motor como una reducción electromagnética efectiva, similar a la de una caja de cambios. Mientras que la energía por ciclo, y por tanto el par, disminuyen al aumentar el número de dientes por polo para un tamaño de polo dado, el par y la densidad de potencia pueden alcanzarse aumentando la relación de saliencia utilizando un material diamagnético. Otra ventaja del diseño o configuración de los polos, especialmente con relleno de ranura diamagnética, es que el campo magnético en el polo con un número de dientes va en una sola dirección en un polo dado, a diferencia de un campo de inversión constante en un motor típico.

[0237] Como ya se ha comentado en la figura 20, a frecuencias más bajas la fuerza útil generada permanece constante o plana en función de la frecuencia, ya que la barrera de flujo diamagnético aparece como el aire y no tiene ningún efecto o tiene muy poco. A frecuencias medias-altas, el efecto de apantallamiento de flujo empieza a dominar y la fuerza sigue aumentando con frecuencias más altas. Así, al rellenar las ranuras con barreras de flujo diamagnético, se puede utilizar una corriente de accionamiento más baja (por tanto, menos vueltas), lo que puede ahorrar dinero al utilizar menos cable y aumentar la eficiencia al reducir la pérdida de resistencia. Además, el rendimiento del motor puede mejorarse aún más utilizando una corriente de accionamiento más alta, por ejemplo, por saturación. Además, la profundidad de la ranura influye en la fuerza horizontal generada. La fuerza resultante puede ser sustancialmente proporcional a la profundidad de la ranura a lo largo de una dirección perpendicular al entrehierro.

Motores de separación axial con barreras de flujo

[0238] La figura 28 es una vista en perspectiva de un ejemplo de motor de espacio axial 2800 con barreras de flujo entre polos adyacentes del rotor. El motor de separación axial 2800 tiene un rotor 2804 dispuesto en paralelo a un estator 2802. El rotor 2804 define un orificio central 2801, y un árbol de salida puede disponerse en el orificio central 2801 de modo que el rotor 2804 sea giratorio junto con el árbol de salida.

[0239] El rotor 2804 es móvil con respecto al estator 2802 por rotación alrededor de un eje de rotación del rotor (o un eje de rotación del árbol de salida). Una superficie extrema del rotor 2804 es perpendicular al eje de rotación del rotor. La superficie extrema del rotor 2804 está separada de una superficie extrema del estator 2802 a lo largo del eje de rotación para definir un espacio nominal 2803. La separación nominal 2803 es una separación axial entre las superficies extremas del estator 2802 y el rotor 2804 y a lo largo del eje de rotación del rotor.

[0240] El estator 2802 define una serie de polos de estator 2810, cada uno de los cuales incluye un núcleo de polo de estator 2812 rodeado por un devanado eléctrico asociado 2814. Los devanados eléctricos 2814 del estator 2802 son activables independientemente y espaciados circunferencialmente alrededor del estator. El rotor 2804 tiene una serie de polos de rotor 2820 con barreras de flujo 2830 entre los polos de rotor 2820. Cada barrera de flujo 2830 tiene un bucle conductor de electricidad que rodea un núcleo de material magnéticamente permeable. Los núcleos de las barreras de flujo, los polos del rotor y la placa posterior del rotor pueden ser porciones de una pieza contigua de material ferromagnético, como las formadas por polvo prensado y sinterizado. Los bucles conductores de las barreras de flujo pueden ser, por ejemplo, anillos de cobre prensados sobre los núcleos.

[0241] Las figuras 29-32 muestran diferentes vistas de un rotor 2900 de otro motor con separación axial. El rotor 2900 tiene una superficie extrema activa plana (orientada hacia el estator, no mostrada), que incluye regiones de superficie polar que forman los polos del rotor 2920, y regiones de superficie interpolar formadas por barreras de flujo 2930 entre las regiones de superficie polar. En este ejemplo, las barreras de flujo 2930 son polos blindados, similares a los polos blindados 1404 de la figura 14.

[0242] Cada barrera de flujo 2930 incluye un material eléctricamente conductor que forma un bucle 2932 alrededor de un núcleo 2934 de un material de núcleo. El material del núcleo es más permeable magnéticamente que el material conductor de la electricidad. El material del núcleo puede ser ferromagnético. El material del núcleo de los núcleos 2934

y el material de los polos del rotor 2920 pueden ser el mismo, y los núcleos 2934 y los polos del rotor 2920 forman un cuerpo de rotor entero continuo, tal como de polvo de hierro sinterizado. El material conductor de las barreras de flujo puede fundirse en el núcleo del rotor formado.

5 **[0243]** Como se ilustra en las figuras 29-32, cada bucle 2932 incluye cinco porciones de bucle 2932a, 2932b, 2932c, 2932d y 2932e. La porción de bucle 2932a forma una porción de la superficie del extremo del rotor 2900.

10 **[0244]** La porción de bucle 2932b se extiende a lo largo de una dirección paralela al eje de rotación hasta una extensión con una profundidad, y forma una porción de una superficie radial exterior del rotor 2900. La superficie del extremo es perpendicular a la superficie radial exterior. La porción de bucle 2932c se extiende a lo largo de una dirección paralela al eje de rotación hasta una extensión con una profundidad, y forma una porción de una superficie radial interior del rotor 2900. La profundidad de la porción de bucle 2932c puede ser idéntica a la profundidad de la porción de bucle 2932b.

15 **[0245]** Las porciones de bucle 2932d y 2932e se extienden a lo largo de una dirección radial desde la superficie radial interior del rotor hasta la superficie radial exterior del rotor para formar paredes de apantallamiento entre los polos adyacentes del rotor 2920 y el núcleo 2934. Las porciones de bucle 2932d y 2932e también se extienden dentro del cuerpo del rotor hasta una extensión con una profundidad que puede ser idéntica a la profundidad de las porciones de bucle 2932b y 2932c. Cada una de las porciones de bucle puede tener un espesor consistente e idéntico, preferiblemente mayor que una profundidad de piel de corriente eléctrica del material eléctricamente conductor del bucle 2932 a una frecuencia operativa particular.

Estatore con barrera de flujo

25 **[0246]** También se pueden instalar barreras de flujo en los estatores de los motores para aumentar aún más el rendimiento.

30 **[0247]** La figura 33 muestra un estator 3300 con barreras de flujo 3320 dispuestas entre los polos del estator 3310. Los polos del estator 3310 pueden estar alojados o conectados por un yugo magnéticamente permeable 3302. Cada polo de estator 3310 incluye un núcleo de estator 3312 rodeado por devanados eléctricos asociados 3314. Los núcleos del estator 3312 (y el yugo) pueden estar hechos de una pila de capas de material ferromagnético que se extienden a lo largo de un eje longitudinal. Las capas están separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Los núcleos de estator 3312 pueden ser salientes de estator que sobresalen del yugo 3302.

35 **[0248]** Cada barrera de flujo 3320 forma escudos de flujo que se extienden a lo largo de los bordes opuestos de los polos del estator 3310 y están formados por un material que tiene una conductividad eléctrica mayor que el material ferromagnético de los núcleos del estator 3312. La barrera de flujo 3320 puede extenderse en los espacios entre devanados eléctricos adyacentes 3314. Como se ilustra en la figura 34, la barrera de flujo 3320 puede extenderse desde un entrehierro 3350 hasta la horquilla 3302 que conecta los polos adyacentes del estator 3310. El entrehierro 3350 está definido entre dos superficies exteriores del estator 3300 y un rotor 3400. El rotor 3400 incluye una serie de polos de rotor 3410 con barreras de flujo 3420 entre ellos, como se discutió anteriormente.

45 **[0249]** Como se ilustra en las figuras 33 y 34, cada núcleo de estator 3312 rodeado por los devanados eléctricos 3314 tiene una anchura angular W_O a lo largo de una circunferencia del estator 3300. Las barreras de flujo 3320 se extienden en muescas en las caras de los núcleos del estator 3312, de tal forma que una anchura angular W_1 del núcleo del estator 3312 en el entrehierro, entre bordes opuestos de barreras de flujo 3320 adyacentes, es menor que la anchura angular W_O del núcleo del estator 3312 rodeado por los devanados eléctricos 3314. Es decir, $W_1 < W_O$.

50 **[0250]** La figura 35 muestra otro estator 3500 con barreras de flujo 3520 dispuestas entre los polos del estator 3510. Similar al estator 3300 de las figuras 33-34, cada polo de estator 3510 incluye un núcleo de estator 3512 rodeado por devanados eléctricos asociados 3514. Los núcleos de estator 3512 pueden ser salientes de estator que sobresalen de un yugo magnéticamente permeable 3502, formado como una pila de placas magnéticamente permeables con interfaces inhibidoras de corriente. Cada barrera de flujo 3520 está formada por un material que tiene una conductividad eléctrica mayor que un material de los núcleos del estator 3512 y que atraviesa las interfaces de la pila. Como se ilustra en la figura 36, la barrera de flujo 3520 puede extenderse desde un entrehierro 3550 hasta la horquilla 3502, conectando polos adyacentes del estator 3510 en el entrehierro 3550 definido entre el estator 3500 y un rotor 3600. El rotor 3600 incluye una serie de polos de rotor 3610 con barreras de flujo 3620 entre ellos, como se discutió anteriormente.

60 **[0251]** El motor 3500 difiere del de las figuras 33-34 en que la anchura angular de los núcleos del estator es esencialmente constante desde el entrehierro hasta el yugo 3502. Es decir, $W_O = W_1$.

65 **[0252]** La figura 37 muestra otro estator 3700 con barreras de flujo 3720 dispuestas entre los polos del estator 3710. Similar al estator 3300 de las figuras 33-34, cada polo de estator 3710 incluye un núcleo de estator 3712 rodeado por devanados eléctricos asociados 3714. Los núcleos de estator 3712 pueden ser salientes de estator que sobresalen de un yugo 3702 magnéticamente permeable, con núcleos de estator y yugo formados como una pila de placas ferromagnéticas con interfaces inhibidoras de corriente. Cada barrera de flujo 3720 está formada por un material eléctricamente conductor y atraviesa al menos una mayoría de las interfaces de placa de los núcleos del estator. Como se ilustra en la figura 38, la

barrera de flujo 3520 puede extenderse desde una superficie interior del estator 3700 hasta el yugo 3502 que conecta los polos adyacentes del estator 3710.

[0253] Los núcleos de estator 3712 tienen lengüetas longitudinalmente continuas que se reciben en ranuras correspondientes de las barreras de flujo 3720. Una vez montados los devanados en los núcleos, las barreras de flujo pueden insertarse longitudinalmente y sujetarse mediante las lengüetas de los núcleos del estator, asegurando aún más los devanados.

Motores lineales con barreras de flujo

[0254] Como se ha comentado anteriormente, las barreras de flujo pueden configurarse en motores de separación radial y motores de separación axial, en los que los polos del rotor y/o los polos del estator están dispuestos circunferencialmente. A continuación se describen motores lineales con barreras de flujo, que no pertenecen a la presente invención, en los que los polos del motor y/o los polos del estator están dispuestos linealmente y el movimiento relativo entre el estator y el impulsor se realiza a lo largo de una línea.

[0255] Las figuras 39 y 40 muestran un motor lineal 3900 - no perteneciente a la presente invención - que incluye un estator 3910 y un impulsor 3950. El impulsor 3950 es móvil con respecto al estator 3910 a lo largo de una dirección de movimiento y define, junto con el estator 3910, una separación nominal 3940 que tiene una anchura perpendicular a la dirección de movimiento.

[0256] El estator 3910 define una serie de polos de estator 3920 posicionados linealmente a lo largo de la dirección de movimiento y conectados linealmente por un yugo magnéticamente permeable o placa trasera 3902. Cada polo de estator 3920 incluye un núcleo de estator 3922 rodeado por devanados eléctricos asociados 3924. Los núcleos de estator 3922 pueden estar hechos de una pila de capas de material ferromagnético, con cada capa extendiéndose a lo largo de la dirección de movimiento. Las capas están separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Los núcleos de estator 3922 pueden ser salientes de estator que sobresalen del yugo 3902. Los salientes del estator definen ranuras 3930 entre los mismos.

[0257] El impulsor 3950 incluye una serie de polos 3960 con barreras de flujo 3970 entre ellos y espaciados a lo largo de la dirección de movimiento. Las barreras de flujo 3970 pueden ser polos blindados, similares a las barreras de flujo 1504 de la figura 15. Cada barrera de flujo 3970 está formada por un bucle eléctricamente conductor 3972 alrededor de un núcleo magnéticamente permeable 3974 entre polos del impulsor adyacentes 3960. Los polos del impulsor 3960 pueden estar hechos de una pila laminada de capas de material ferromagnético separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Las barreras de flujo 3970 tienen, cada una, una superficie exterior plana paralela a la dirección de movimiento y forman una región de superficie interpolar entre las regiones de superficie polar de los polos del impulsor 3960. Las regiones de la superficie entre polos y las regiones de la superficie de los polos definen una superficie exterior (o una superficie final) del impulsor 3950. Cada núcleo 3974 forma una porción de la superficie exterior rodeada por un bucle 3972 respectivo. Los bucles 3972 pueden estar hechos de un material eléctricamente conductor, producto de baja energía, como el cobre. Un material del núcleo 3974 es más permeable magnéticamente que el material de los bucles 3974. El material de los núcleos 3974 y el material ferromagnético de los polos del impulsor 3960 pueden ser porciones contiguas de la pila de las capas. Los bucles 3972 de las barreras de flujo 3970 no se superponen y están aislados eléctricamente entre sí fuera del material ferromagnético. Las barreras de flujo 3970 están conectadas eléctricamente entre sí sólo a través del material ferromagnético, si es que lo están.

[0258] Las figuras 41 y 42 muestran otro motor lineal 4100 -no perteneciente a la presente invención- que incluye un estator 4110 y un impulsor 4150, donde el estator 4110 y el impulsor 4150 tienen cada uno múltiples polos dentados, como se ha descrito anteriormente con respecto a la figura 27, pero en el que el material conductor entre los dientes se forma en bucles. El impulsor 4150 es móvil con respecto al estator 4110 a lo largo de una dirección de movimiento y define, junto con el estator 4110, una separación nominal 4440 que tiene una anchura perpendicular a la dirección de movimiento.

[0259] Similar al estator 3910 de las figuras 39-40, el estator 4110 define una serie de polos de estator 4120 posicionados linealmente a lo largo de la dirección de movimiento y conectados linealmente por un yugo o placa posterior 4102 magnéticamente permeable. Cada polo de estator 4120 incluye un núcleo de estator 4122 rodeado por devanados eléctricos asociados 4124. Los núcleos del estator 4122 pueden estar hechos de una pila de capas de material ferromagnético, extendiéndose cada capa a lo largo de la dirección de movimiento. Las capas están separadas entre sí por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético. Los núcleos de estator 4122 pueden ser salientes de estator que sobresalen del yugo 4102. Los salientes del estator definen ranuras 4130 entre los mismos. A diferencia del estator 3910, el polo 4120 del estator (o el núcleo 4122 del estator) incluye múltiples dientes 4122a con ranuras 4122b entre ellos, al menos en la superficie exterior del polo 4120 del estator. Como se discutió anteriormente, las barreras de flujo se forman en las ranuras 4122b entre múltiples dientes de polos del estator 4122a. En la configuración mostrada, el material en las dos ranuras izquierdas 4122b de cada polo de estator forma un bucle alrededor del diente izquierdo del estator 4122a, y el material en las dos ranuras derechas forma un segundo bucle alrededor del diente derecho del estator 4122a. En esta configuración, los dos bucles actúan para apantallar la penetración del flujo a través de los dos dientes exteriores de los polos del estator. Alternativamente, el material eléctricamente conductor que rellena

cada una de las ranuras interdentes 4122b puede actuar como un reflector de flujo local separado a través del efecto de las corrientes de Foucault establecidas dentro del material conductor (sin formar un bucle con el material de una ranura adyacente). Como otra alternativa, cada ranura 4122b puede contener a su vez una barrera de flujo polar blindada.

[0260] El impulsor 4150 incluye una serie de polos del impulsor posicionados linealmente a lo largo de la dirección de movimiento. Cada polo del impulsor incluye múltiples dientes 4160 con barreras de flujo 4170 en ranuras entre dientes adyacentes 4160. Cada barrera de flujo 4170 puede ser de polos blindados, similar a las barreras de flujo 3970 de la figura 39. Cada barrera de flujo 4170 está formada por un bucle eléctricamente conductor 4172 alrededor de un núcleo magnéticamente permeable 4174 entre dientes de polos del impulsor adyacentes 4160. Los bucles 4172 pueden estar hechos de un material eléctricamente conductor, producto de baja energía. Un material del núcleo 4174 es más permeable magnéticamente que el material de los bucles 4174. El material de los núcleos 4174 y el material ferromagnético de los polos del impulsor 4160 pueden ser porciones contiguas de la pila de las capas. Los bucles 4172 de las barreras de flujo 4170 no se superponen y están aislados eléctricamente entre sí fuera del material ferromagnético. Las barreras de flujo 4170 sólo pueden conectarse entre sí a través del material ferromagnético.

Funcionamiento de motores con barreras de flujo

[0261] Los efectos de las barreras de flujo pueden variar en las fuerzas horizontales bajo diferentes frecuencias. Como se ilustra en la figura 20, una fuerza horizontal puede empezar a aumentar por encima de una frecuencia de corte, por ejemplo, 10 Hz, y el aumento entre una frecuencia más baja, por ejemplo, 10 Hz, y una frecuencia más alta, por ejemplo, 105 Hz, puede ser de más de un orden de magnitud. A frecuencias más altas, una barrera de flujo puede mostrar propiedades diamagnéticas más fuertes para concentrar el flujo magnético hacia el polo del rotor, lo que a su vez aumenta el componente de fuerza a lo largo de la dirección de movimiento.

[0262] La fuerza útil también puede verse afectada por las condiciones de funcionamiento. En condiciones saturadas y a alta frecuencia, las barreras de flujo pueden mostrar propiedades diamagnéticas más fuertes para concentrar el flujo magnético hacia el polo del rotor, en comparación con las condiciones no saturadas. La fuerza útil puede seguir aumentando cuando aumenta la frecuencia. Por ejemplo, a una frecuencia más alta, por ejemplo, 105 Hz, la fuerza horizontal puede aumentar dos órdenes de magnitud cuando una corriente de accionamiento aumenta de 10 Amp*vuelas (correspondiente a una condición de operación no saturada) a 200 Amp*vuelas (correspondiente a una condición de operación saturada).

[0263] Como ya se ha indicado, el número de dientes por asta también puede influir en la fuerza útil. Un aumento del número de dientes por polo puede provocar un aumento gradual de la fuerza. Sin embargo, cuando el tamaño de la separación es mayor, por ejemplo, a 1,0 mm, la fuerza puede disminuir al aumentar el número de dientes por polo.

[0264] Para las configuraciones con barreras de flujo, cada juego de polos puede funcionar con corriente de pulso-CC o de pulso-CA.

[0265] El funcionamiento utiliza barreras de flujo de alta inductancia y baja resistencia, lo que da como resultado una reactancia elevada que está en fase con el campo magnético. A medida que el campo magnético asciende a través de las bobinas primarias y los dientes de reluctancia, el campo magnético se refleja a través de los dientes blindados y da lugar a una alta impedancia al campo magnético. Este sistema puede funcionar mediante una señal magnética alterna sólo hasta el 50 % del ciclo de trabajo (por ejemplo, de no alineado a alineado). Continuar durante todo el ciclo de trabajo (por ejemplo, de alineado a no alineado) puede dar lugar a un par inverso.

[0266] Una barrera de flujo de reactancia más alta también puede permitir un sistema de factor de potencia más alto que puede generar par más eficientemente en comparación con una máquina convencional. El diseño de barrera de flujo de alta reactancia y alta impedancia puede impedir que prácticamente todo el flujo magnético penetre en las barreras de flujo durante todo el ciclo de funcionamiento. De este modo, el motor puede beneficiarse de propiedades diamagnéticas que antes sólo se experimentaban en motores superconductores a una amplia gama de temperaturas (por ejemplo, temperatura ambiente-temperatura elevada). También pueden ser menos sensibles a la temperatura que los motores de imanes permanentes, que tienden a desmagnetizarse por encima de una temperatura crítica.

[0267] Los motores descritos anteriormente con barreras de flujo pueden accionarse dinámicamente con una corriente de onda cuadrada. Si se acciona dinámicamente, se puede utilizar una onda cuadrada a una frecuencia de conmutación relativamente más baja que una onda sinusoidal equivalente para inducir una gran reactancia en la barrera de flujo mientras se pulsa a una frecuencia relativamente baja (tal como 50 Hz). Esto se debe en parte a la elevada proporción de valores armónicos en una onda cuadrada frente a una sinusoidal. Esto también disminuye las pérdidas de conmutación requeridas por un dispositivo electrónico de potencia debido a la alta frecuencia requerida por la conmutación de modulación por ancho de pulsos (PWM). En tal operación, pueden utilizarse laminaciones relativamente finas (por ejemplo, 0,127 mm) para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas en el hierro del núcleo y bobinados de bajo calibre (por ejemplo, 0,2 mm) o incluso de alambre de Litz en las bobinas primarias para disminuir las pérdidas por efecto piel en los bobinados del núcleo.

[0268] Los motores descritos anteriormente también pueden beneficiarse de una mayor eficiencia de bobinado de las bobinas. Mientras que la proporción típica de llenado de ranuras de un bobinado es del 30-40 % de un área de ranura dada, utilizando técnicas de fundición para llenar las barreras de flujo en ranuras entre polos adyacentes, el motor puede utilizar sustancialmente todo (por ejemplo, 85-95 %) el volumen de la ranura para las barreras de flujo. Esto puede disminuir la cantidad total de cable necesario para el devanado primario del motor, lo que puede permitir que el devanado primario utilice menos vueltas en comparación con un motor típico.

[0269] Como se ha señalado anteriormente, el relleno de las ranuras con un material de flujo diamagnético ofrece un medio para concentrar el flujo magnético en el funcionamiento del motor. Específicamente, cuando el estator y el rotor están dispuestos en un estado no alineado, la reflexión electromagnética interna significativa impide la mayor parte de la comunicación magnética de las superficies de los polos opuestos. Este blindaje diamagnético permite que las ranuras de campo empujen eficazmente el rotor, mientras que la reluctancia de los polos electromagnéticos tira del mismo. Este efecto permite producir más energía por ciclo a partir del sistema y es similar al efecto que pueden producir los imanes permanentes en determinadas configuraciones.

[0270] Este efecto proporciona una ventaja notable sobre los imanes permanentes, que pueden estar sujetos a desmagnetización por altas corrientes parásitas. Este efecto puede observarse en una curva B-H que examina la coercitividad de un imán permanente. En los motores descritos anteriormente, una barrera de flujo de alta reactancia puede aproximarse a un imán permanente en la dirección opuesta con una coercitividad infinita. De este modo, la barrera de flujo puede reflejar el campo magnético impuesto para alcanzar niveles de campo magnético superiores a los que pueden lograrse en los típicos motores de imanes permanentes, lo que puede aumentar la densidad de par, la densidad de potencia y la eficiencia mediante la creación de una mayor FEM trasera. Además, mientras que los imanes permanentes se desmagnetizan a temperaturas elevadas, como se ha mencionado anteriormente, las barreras de flujo pueden construirse con materiales capaces de soportar temperaturas superiores a 37,78 grados Celsius (100 grados Fahrenheit) más calientes que los imanes permanentes típicos.

[0271] Además, cuando los imanes permanentes producen un campo magnético constante, la barrera de flujo diamagnético existe dinámicamente en un estado transitorio. Esto beneficia tanto a la eficiencia como a la seguridad, ya que los motores de imanes permanentes pueden dar lugar a un par de abolladura, un par de arrastre y un par de frenado, que a veces pueden ser catastróficos debido al EMF que puede producirse tanto si se utiliza potencia como si no. Los motores anteriores pueden controlarse para que funcionen efectivamente en rueda libre durante largos periodos de tiempo, con pérdidas debidas únicamente a la resistencia de los cojinetes.

[0272] Además, a diferencia de un MI con una carga inductiva significativa que genera una corriente continua, la corriente en cada barrera de flujo puede volver casi a cero en cada ciclo. Cuanto mayor sea la frecuencia de funcionamiento del motor, menor será la corriente necesaria en cada barrera de flujo para mantener la reflexión. Como el sistema es reactivo, la energía se devuelve elásticamente o se traduce en energía cinética del rotor en cada ciclo de conmutación.

[0273] El relleno de la ranura de la barrera de flujo diamagnético puede ajustarse, tanto para una aplicación determinada como dinámicamente durante el funcionamiento. A diferencia del aire, las propiedades magnéticas del sistema pueden sintonizarse, tanto en amplitud de fuerza magnetomotriz (FMM) para una posición dada, como en frecuencia de la FMM. Esto permite la adaptación en tiempo real debilitando o reforzando las propiedades del flujo magnético del sistema cambiando la frecuencia de conmutación del motor. Esto puede cambiar la contrafase en la bobina primaria, lo que puede permitir al motor alcanzar rangos de velocidad más amplios que los motores tradicionales. Los motores tradicionales tienen un retro-EMF fijo basado en una relación de saliencia fija, que se utiliza para cambiar la magnitud del campo magnético. El motor puede cambiar la magnitud del campo magnético, además de la frecuencia de activación del funcionamiento del motor.

[0274] A velocidades más altas, el motor puede funcionar como un motor de reluctancia reactiva. En el funcionamiento convencional del SRM, se aplica una tensión de pico al inicio de la posición no alineada del estator y el rotor (o los dientes estator-rotor) y se aumenta rápidamente la corriente hasta que el estator y el rotor (o los dientes estator-rotor) alcanzan un punto de alineación. En este punto, se aplica una tensión inversa y la corriente cae a cero. En una condición de rotor bloqueado (calado) en un SRM convencional, la corriente se aplica de forma continua en lugar de pulsada. En un motor con barreras de flujo, durante la parada la corriente pasa por pulsos a través de una bobina activa. Una vez que la frecuencia de conmutación de los polos supera la frecuencia de cruce de las barreras de flujo durante la aceleración del motor, cada polo puede ser excitado por un solo pulso.

Ejemplo de proceso

[0275] Implementaciones de la presente divulgación proporcionan un método de accionamiento de un motor eléctrico. El motor eléctrico puede ser el motor eléctrico 102 de la figura 1, y el método puede ser realizado por un controlador de motor, por ejemplo, el controlador de motor 104 de la figura 1.

[0276] Durante el funcionamiento, el controlador del motor energiza un primer polo activo de una serie de polos activos dispuestos a lo largo de un entrehierro entre la serie de polos activos y un componente magnético pasivo que tiene una

serie de polos pasivos dispuestos a lo largo del entrehierro, pulsando corriente a través de un devanado eléctrico asociado con el primer polo activo. La corriente pulsada incluye una secuencia de al menos tres pulsos durante los cuales los devanados de secuencia de los polos activos adyacentes de la serie de polos activos no están energizados. La pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo hace que la corriente pase a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo de acuerdo con una forma de onda de corriente en la que una relación entre una corriente máxima y una corriente mínima durante la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo es de al menos 4:1, 7: 1, o incluso 10:1.

[0277] En algunos casos, el devanado eléctrico asociado con el primer polo activo incluye múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo y enrolladas alrededor de un núcleo común. El controlador del motor puede impulsar la corriente a través de las múltiples bobinas conectadas conductivamente en paralelo.

[0278] En algunos ejemplos, el controlador del motor impulsa la corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo operando un primer conmutador para abrir y cerrar en múltiples ciclos entre una fuente de voltaje y el devanado eléctrico asociado con el primer polo activo. El primer conmutador puede estar asociado con el primer polo activo y acoplado conductivamente al primer polo activo. El primer conmutador puede ser el conmutador 134 de la figura2 o el conmutador de potencia 200 de la figura 2A.

[0279] Después de que el primer polo activo ha sido energizado (por múltiples pulsos de corriente), el controlador del motor energiza entonces un segundo polo activo de la serie de polos activos, pulsando corriente a través de un devanado eléctrico asociado con el segundo polo activo. La corriente pulsada para el segundo polo activo también incluye una secuencia de al menos tres pulsos durante cuya secuencia el devanado del primer polo activo no está energizado, haciendo que la corriente pase a través del devanado eléctrico asociado con el segundo polo activo de acuerdo con una forma de onda de corriente. En la forma de onda de corriente, una relación entre una corriente máxima y una corriente mínima durante la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico asociado al segundo polo activo es de al menos 4:1, 7:1, o incluso 10:1.

[0280] El primer polo activo puede ser energizado por pulsos de corriente a una frecuencia de pulsos de entre 2 Hz y 1 MHz, en algunos casos entre 10 Hz y 20 kHz, y en algunos casos entre 100 Hz y 5 kHz. Energizar el primer polo activo y luego energizar el segundo polo activo puede generar una primera fuerza entre el primer polo activo y un polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo, y una segunda fuerza entre el segundo polo activo y un polo pasivo a través del entrehierro desde el segundo polo activo. La primera y segunda fuerzas pueden inducir un movimiento relativo entre los polos activos y los polos pasivos. El movimiento relativo puede incluir un movimiento del componente magnético pasivo con respecto a los polos activos.

[0281] El componente magnético pasivo In es un rotor del motor, y el movimiento relativo incluye la rotación del rotor. El controlador del motor puede detectar además una velocidad del rotor y controlar una frecuencia de la corriente pulsada (o la frecuencia de pulsación) en función de la velocidad del rotor detectada. El controlador del motor puede mantener además una frecuencia de pulsos de corriente durante los cambios de velocidad del rotor, hasta al menos una velocidad del rotor a la que una frecuencia a la que se energiza cada polo activo es al menos la mitad de la frecuencia de pulsos. La corriente puede ser pulsada a través de los devanados eléctricos asociados con el primer y segundo polos sólo por debajo de una velocidad del rotor correspondiente a un pulso por energización del polo.

[0282] Después de energizar el segundo polo activo, el controlador del motor puede energizar un tercer polo activo de la serie de polos activos, dispuesto en un lado opuesto del segundo polo activo que el primer polo activo, pulsando corriente a través de un devanado eléctrico asociado con el tercer polo activo, incluyendo una secuencia de al menos tres pulsos durante cuya secuencia los devanados del primer y segundo polos activos no están energizados. Después de energizar el tercer polo activo, el controlador del motor puede energizar nuevamente el primer polo activo pulsando corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo, y luego energizar nuevamente el segundo polo activo pulsando corriente a través del devanado eléctrico asociado con el segundo polo activo, y luego energizar nuevamente el tercer polo activo, y así sucesivamente.

[0283] Como se ha indicado anteriormente, las barreras de flujo se implementan en el componente magnético pasivo. En algunos ejemplos, la pulsación de la corriente a través del devanado eléctrico asociado con el primer polo activo genera corrientes parásitas en una primera barrera de flujo adyacente a un polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo. La barrera de flujo tiene una conductividad eléctrica superior a la del polo pasivo a través del entrehierro. El componente magnético pasivo puede incluir además una segunda barrera de flujo, con el polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo dispuesto entre la primera y segunda barreras de flujo. La primera y la segunda barreras de flujo están aisladas eléctricamente entre sí fuera de los polos pasivos.

[0284] En algunos motores, los polos pasivos están formados por una pila de capas de material magnéticamente permeable. La corriente parásita en la primera barrera de flujo actúa para repeler el flujo magnético del primer polo activo. En algunos ejemplos, la primera barrera de flujo está dispuesta entre el polo pasivo a través del entrehierro desde el primer polo activo y un polo pasivo adyacente, y la barrera de flujo forma un bucle conductor de un material eléctricamente conductor alrededor de un núcleo de un material de núcleo más permeable magnéticamente que el material eléctricamente conductor.

[0285] En algunos casos, el componente magnético pasivo incluye además barreras de flujo entre pares adyacentes de polos pasivos de la serie de polos pasivos, y las barreras de flujo incluyen cada una un material eléctricamente conductor distinto del material que forma los polos pasivos y que define al menos una trayectoria eléctricamente conductora sobre el material del núcleo magnéticamente permeable. Las barreras de flujo están aisladas eléctricamente entre sí fuera de la serie de polos pasivos. Las barreras adyacentes del flujo se pueden arreglar tales que cualquier trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de una barrera del flujo no rodea ninguna porción de ninguna trayectoria conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera del flujo.

[0286] En algunas realizaciones, el motor incluye además escudos de flujo que se extienden a lo largo de los bordes opuestos de cada polo activo y formado de un material que tiene una mayor conductividad eléctrica que el material del polo activo dispuesto entre los escudos de flujo. Los escudos de flujo pueden extenderse hasta las separaciones entre devanados eléctricos adyacentes. Los escudos de flujo pueden extenderse desde el entrehierro hasta un yugo magnéticamente permeable que conecta los polos activos adyacentes.

Ejemplo Refrigeración y mitigación del calor

[0287] Los motores eléctricos pueden generar mucho calor durante su funcionamiento y necesitan refrigeración, sobre todo cuando funcionan a alta frecuencia. Se puede utilizar un sistema de refrigeración activo para proporcionar una refrigeración intermitente o continua de la superficie mediante la circulación de un fluido refrigerante a través del motor. El sistema de refrigeración puede ser el sistema de refrigeración descrito en la solicitud de patente en trámite S/N 62/675.207, presentada el 23 de mayo de 2018 y titulada "Motor eléctrico".

[0288] Además, si se reducen las temperaturas de funcionamiento, el rendimiento y la potencia de una barrera de flujo pueden aumentar para una frecuencia determinada. Las condiciones típicas de funcionamiento son de -80 °C a 300 °C. Se puede añadir refrigerante al sistema del motor para suprimir aún más la temperatura y aumentar las propiedades diamagnéticas de una barrera de flujo.

[0289] Un refrigerante puede ser cualquier fluido convencional utilizado para mitigar el calor. En condiciones de funcionamiento, el refrigerante puede ser un fluido de baja viscosidad en el rango de 0,001 Pa * s a 0,5 Pa * s (1 a 500 centipoise), tales como agua o aceite de motor para permitir tanto una alta eficiencia de refrigeración y la dinámica de rotación. El refrigerante también puede amortiguar las vibraciones generadas durante el funcionamiento, así como proporcionar una fuerza restauradora a los armónicos que se generan a velocidades de rotación más altas.

[0290] La refrigeración activa puede permitir una mayor densidad de potencia al proporcionar un medio para absorber el calor de las bobinas eléctricas y las superficies de contacto mecánico. Se puede utilizar un sistema de lubricación activa para proporcionar una lubricación intermitente o continua de la superficie mediante la circulación de un fluido lubricante a través del motor. Por ejemplo, una bomba de fluido puede promover mecánicamente que un lubricante fluya desde la bomba de fluido al motor a través de líneas de fluido, donde puede ser descargado a través de boquillas direccionales para proporcionar lubricación activa y/o enfriamiento de fluido a lugares específicos dentro del motor. El fluido puede entonces acumularse gravitacionalmente en una bandeja de aceite en la base del motor y fluir a través de una línea de retorno de fluido de vuelta a la bomba para su recirculación. De este modo, un conjunto de rotor de motor puede funcionar en un entorno frío y no sumergido. Además, una parte del lubricante puede pasar a través de un intercambiador de calor para añadir o eliminar calor del lubricante con el fin de modular la temperatura y/o la viscosidad del lubricante para satisfacer las necesidades específicas de una aplicación.

[0291] Un refrigerante puede ser cualquier fluido convencional utilizado para mitigar el calor. En condiciones de funcionamiento, el refrigerante puede ser un fluido de baja viscosidad en el rango de 0,001 Pa * s a 0,5 Pa * s (1 a 500 centipoise), tales como agua o aceite de motor para permitir tanto una alta eficiencia de refrigeración y la dinámica de rotación. El refrigerante también puede amortiguar las vibraciones generadas durante el funcionamiento, así como proporcionar fuerza restauradora a los armónicos que se generan a velocidades de rotación más altas.

[0292] El motor puede incluir una bandeja de recolección para recoger gravitacionalmente el refrigerante descargado dentro del conjunto del motor y dirigirlo hacia una línea de fluido de retorno.

[0293] El sistema de refrigerante puede tener una bomba de fluido que proporciona un gradiente de presión al refrigerante que resulta en la circulación a través del sistema de fluido. Dicha bomba puede ser una bomba de desplazamiento fijo, como una bomba rotativa, o una bomba de desplazamiento variable, como una bomba de engranajes o de pistones. La bomba puede estar conectada operativamente a una fuente de energía mecánica o eléctrica y puede funcionar de forma continua o intermitente durante el funcionamiento del motor. Un sistema de lubricación activa por cárter húmedo puede tener una sola bomba de fluido conectada operativamente a una bandeja colectora para hacer circular el aceite a través de las líneas de fluido y dentro del sistema refrigerado. En este caso, la mayor parte del suministro de aceite se encuentra en la bandeja colectora. Alternativamente, las bombas fluidas múltiples se pueden funcionar en una configuración activa del líquido refrigerador del sumidero seco donde el líquido de la cacerola de la colección se bombea continuamente en un tanque de tenencia, preferiblemente con una altura grande en relación con su área transversal, y

una segunda bomba puede bombear el líquido bajo tarifa de flujo separada, controlada de nuevo al motor para terminar la circulación del líquido refrigerador.

[0294] El sistema del líquido refrigerador puede tener uno o más inyectores direccionales para dirigir el líquido refrigerador a las localizaciones específicas dentro de la assembly del motor incluyendo, por ejemplo, los polos del estator.

Otras realizaciones

[0295] Cualquiera de los motores descritos anteriormente puede controlarse para generar energía eléctrica a partir de energía dinámica (como para frenar regenerativamente el motor). Esto puede lograrse alterando la temporización de la señal de excitación de tal manera que la corriente del estator sea pulsada en el punto de entrehierro mínimo (o incluso ligeramente retrasada con respecto al punto de entrehierro mínimo) para generar EMF hacia adelante durante la expansión. De esta manera, la corriente eléctrica puede ser generada y dirigida al almacenamiento en una batería asociada, mientras que un par de desaceleración se aplica al rotor para frenar el motor, a pesar de que el motor no es mecánicamente atrás accionable por par aplicado al árbol de salida.

[0296] Cualquiera de los motores descritos anteriormente puede controlarse para generar energía eléctrica a partir de energía dinámica (como para frenar regenerativamente el motor). Esto puede lograrse alterando la temporización de la onda de compresión de tal manera que la corriente del estator sea pulsada en el punto de entrehierro mínimo (o incluso ligeramente retrasada con respecto al punto de entrehierro mínimo) para generar EMF hacia adelante durante la expansión. De esta manera, la corriente eléctrica puede ser generada y dirigida al almacenamiento en una batería asociada, mientras que un par de desaceleración se aplica al rotor para frenar el motor, a pesar de que el motor no es mecánicamente accionable de manera trasera por par aplicado al árbol de salida.

[0297] El alcance está definido por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un motor eléctrico que comprende:

un estator (410, 420, 1010, 1120, 1900) que define múltiples polos de estator (412, 802, 902, 1012, 1122) con devanados eléctricos asociados (416, 1904, 2814, 3314, 3514), en el que el estator comprende un componente magnético activo (106) con múltiples polos activos (412, 802, 902, 1012, 1122) asociados con los devanados eléctricos;

un rotor (420, 600, 700, 1020, 1100) que tiene una superficie (402) móvil con respecto a una superficie (401) del estator en una dirección de movimiento, comprendiendo el rotor

múltiples polos de rotor (422, 602, 804, 904, 1022), y

un componente magnético pasivo (108), en el que

el rotor es móvil con respecto al estator y define, junto con el estator, una separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) entre los polos del estator y los polos del rotor, comprendiendo los polos del rotor un material de polos magnéticamente permeable,

el rotor comprende barreras de flujo (704, 906, 1104, 1304, 1404) entre polos adyacentes del rotor, comprendiendo cada una de las barreras de flujo un segundo material que tiene una conductividad eléctrica diferente de la del material del polo magnéticamente permeable,

la conductividad eléctrica de las barreras de flujo es mayor que la conductividad eléctrica del material de los polos magnéticamente permeable, en el que las barreras de flujo están eléctricamente aisladas entre sí fuera de los polos del rotor, y

el componente magnético pasivo (108) define una serie de polos pasivos espaciados del material de polo magnéticamente permeable que define ranuras (604) entre los mismos, extendiéndose las ranuras en un ángulo distinto de cero con respecto a la dirección de movimiento, en el que cada ranura contiene una barrera de flujo (704, 906, 1104, 1304, 1404) respectiva que comprende el segundo material que se extiende a lo largo de la ranura y forma una trayectoria eléctricamente conductora a lo largo de la ranura, y en el que las barreras de flujo están fijadas al material del polo magnéticamente permeable dentro de las ranuras y están conectadas entre sí únicamente a través del material del polo magnéticamente permeable; y

un controlador de motor (104), que comprende un controlador de bobinado (130), en el que el controlador de bobinado (130) comprende múltiples conmutadores (134) acoplados a respectivos bobinados eléctricos (416, 1904, 2814, 3314, 3514) o conjuntos de bobinados del componente magnético activo (106), en el que el controlador de bobinado está acoplado a compuertas de los múltiples conmutadores y operable para enviar una tensión de control respectiva a cada conmutador respectivo de los múltiples conmutadores, en el que el controlador de bobinado está configurado para

i) accionar secuencialmente los conmutadores (134) durante los respectivos ciclos de trabajo de energización de los polos para generar flujo magnético a través de la separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) entre los polos activos y los polos pasivos y,

ii) durante un ciclo de trabajo de energización de cada polo activo, impulsar corriente a través del devanado del polo activo, incluyendo una secuencia de al menos 3 pulsos durante los cuales los devanados de secuencia de los polos activos adyacentes no están energizados, en el que una relación de corriente máxima y mínima a través del devanado de un polo activo energizado durante la pulsación de corriente es al menos 4:1, particularmente al menos 7:1, más particularmente 10:1.

2. El motor eléctrico de la reivindicación 1, en el que el material magnéticamente permeable de los polos del rotor (422, 602, 804, 904, 1022) comprende una pila de capas de material ferromagnético separadas entre sí, al menos en una superficie del rotor (420, 600, 700, 1020, 1100), por interfaces menos conductoras eléctricamente que el material ferromagnético.

3. El motor eléctrico de la reivindicación 1,

en el que el componente magnético pasivo (108) comprende múltiples polos pasivos que comprenden material de polo magnéticamente permeable;

en el que el componente magnético pasivo comprende además las barreras de flujo que conectan polos pasivos adyacentes del componente magnético pasivo, comprendiendo cada una de las barreras de flujo (704, 906, 1104, 1304, 1404) un material eléctricamente conductor distinto del material del polo magnéticamente permeable y definiendo al menos una trayectoria eléctricamente conductora alrededor del material del polo magnéticamente permeable; y

en el que las barreras de flujo adyacentes están dispuestas de tal manera que cualquier ruta conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de cualquier barrera de flujo no rodea ninguna porción de cualquier ruta conductora definida dentro del material eléctricamente conductor de otra barrera de flujo.

4. El motor eléctrico de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el segundo material forma un bucle eléctricamente conductor (1606) alrededor de un polo respectivo.

5. El motor eléctrico de la reivindicación 4, en el que el bucle define una capacitancia (1608).

6. El motor eléctrico de la reivindicación 5, en el que la capacitancia (1608) se forma en una ubicación discreta a lo largo del bucle (1606).

7. El motor eléctrico de una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 6, en el que el bucle tiene una frecuencia de resonancia en un rango transmisible del material del polo magnéticamente permeable.

8. El motor eléctrico de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el rotor está dispuesto dentro del estator.

9. El motor eléctrico de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) es una separación radial delimitada al menos parcialmente por una superficie radialmente exterior del rotor.

10. El motor eléctrico de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que las barreras de flujo (704, 906, 1104, 1304, 1404) están dispuestas en ranuras entre polos adyacentes del rotor, comprendiendo cada una de las barreras de flujo múltiples pares de capas alternas que se extienden paralelas a la separación nominal y forman interfaces entre capas de materiales diferentes, en el que una primera capa del par es más conductora eléctricamente que una segunda capa del par y la segunda capa del par es más permeable magnéticamente que la primera capa del par, en el que la primera y la segunda capas tienen, cada una, una profundidad de capa de corriente eléctrica mayor que un espesor de capa respectivo en una dirección perpendicular a la separación nominal a una frecuencia de funcionamiento determinada.

11. Un método que comprende:

proporcionar un motor eléctrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10; y accionar el motor eléctrico, en el que el accionamiento comprende

energizar un primer polo activo de los múltiples polos activos (412, 802, 902, 1012, 1122) dispuestos a lo largo de la separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) entre los múltiples polos activos y el componente magnético pasivo (108) que tiene una serie de polos pasivos dispuestos a lo largo de la separación nominal, haciendo pasar corriente por pulsos a través del devanado eléctrico (416, 1904, 2814, 3314, 3514) asociado con el primer polo activo, incluyendo la secuencia de al menos 3 pulsos durante los cuales los devanados secuenciales de los polos activos adyacentes de los múltiples polos activos no están energizados, y luego energizar un segundo polo activo de los múltiples polos activos, pulsando corriente a través del devanado eléctrico asociado con el segundo polo activo, incluyendo la secuencia de al menos 3 pulsos durante cuya secuencia el devanado del primer polo activo no está energizado, y provocando la energización de cada polo activo que la corriente pase a través del devanado eléctrico asociado con el polo activo de acuerdo con la forma de onda de corriente en la que la relación entre la corriente máxima y la corriente mínima durante la pulsación de corriente a través del devanado eléctrico es de al menos 4:1, particularmente de al menos 7:1, más particularmente de 10:1.

12. El método de la reivindicación 11, en el que el accionamiento comprende además detectar la velocidad del rotor y controlar una frecuencia de la corriente pulsada en función de la velocidad del rotor detectada, y opcionalmente mantener la frecuencia de pulsos de la corriente durante los cambios de velocidad del rotor, hasta al menos una velocidad del rotor a la que una frecuencia a la que se energiza cada polo activo es al menos la mitad de la frecuencia de pulsos.

13. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 11 y 12, en el que la corriente pulsante a través del devanado eléctrico (416, 1904, 2814, 3314, 3514) asociado a un primer polo activo genera corriente parásita en una primera barrera de flujo (704, 906, 1104, 1304, 1404) adyacente a un polo pasivo a través de la separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) desde el primer polo activo, teniendo la barrera de flujo una conductividad eléctrica superior a la del polo pasivo a través de la separación nominal.

14. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que energizar el primer polo activo y luego energizar el segundo polo activo genera una primera fuerza entre el primer polo activo y un polo pasivo a través de la separación nominal (805, 905, 1015, 1130, 1910) desde el primer polo activo, y una segunda fuerza entre el segundo polo activo y un polo pasivo a través de la separación nominal desde el segundo polo activo.

15. El método de la reivindicación 14, en el que la primera y segunda fuerzas inducen un movimiento relativo entre los polos activos y los polos pasivos, y opcionalmente en el que el movimiento relativo comprende la rotación del rotor (420, 600, 700, 1020, 1100).

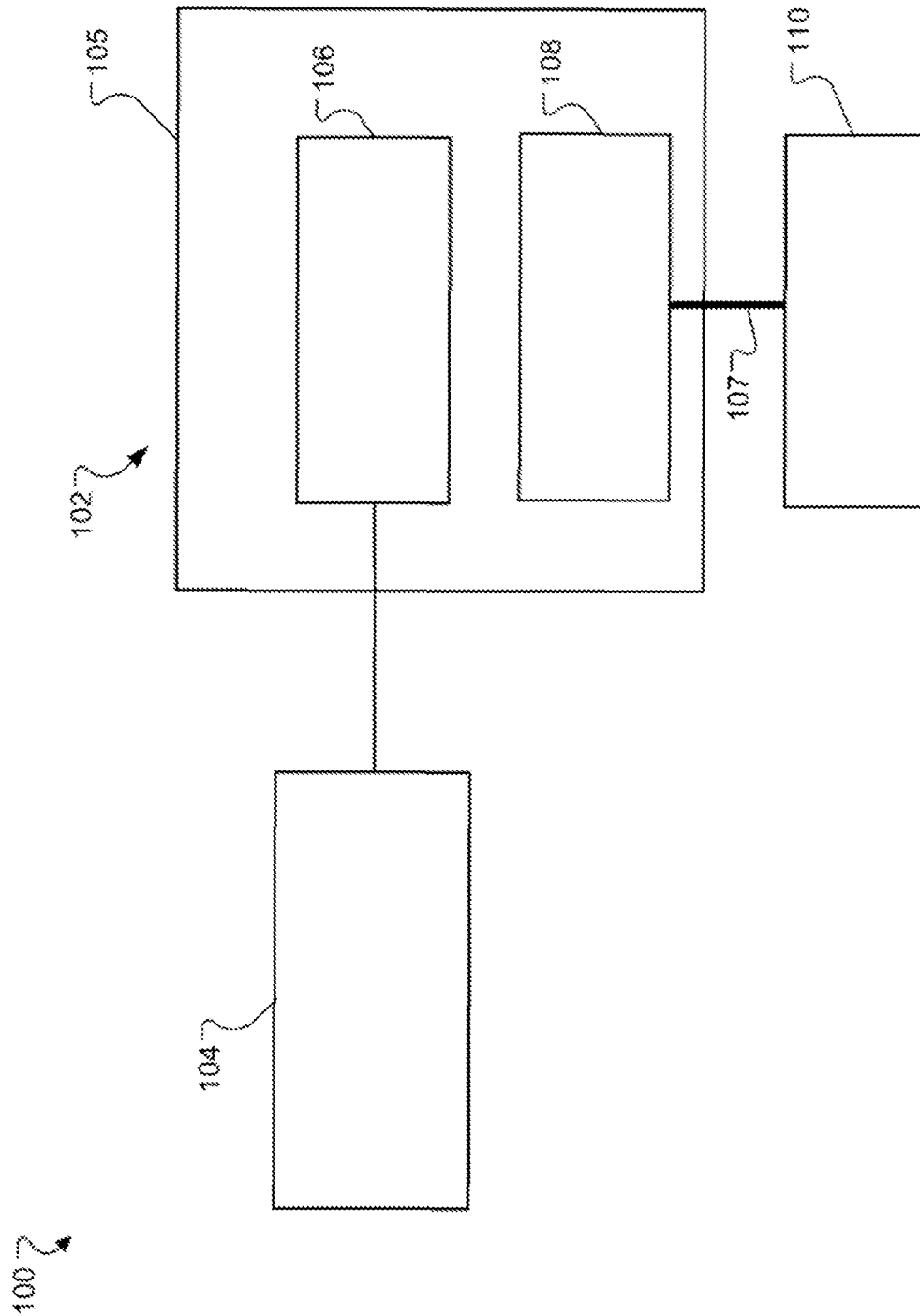


FIG.1

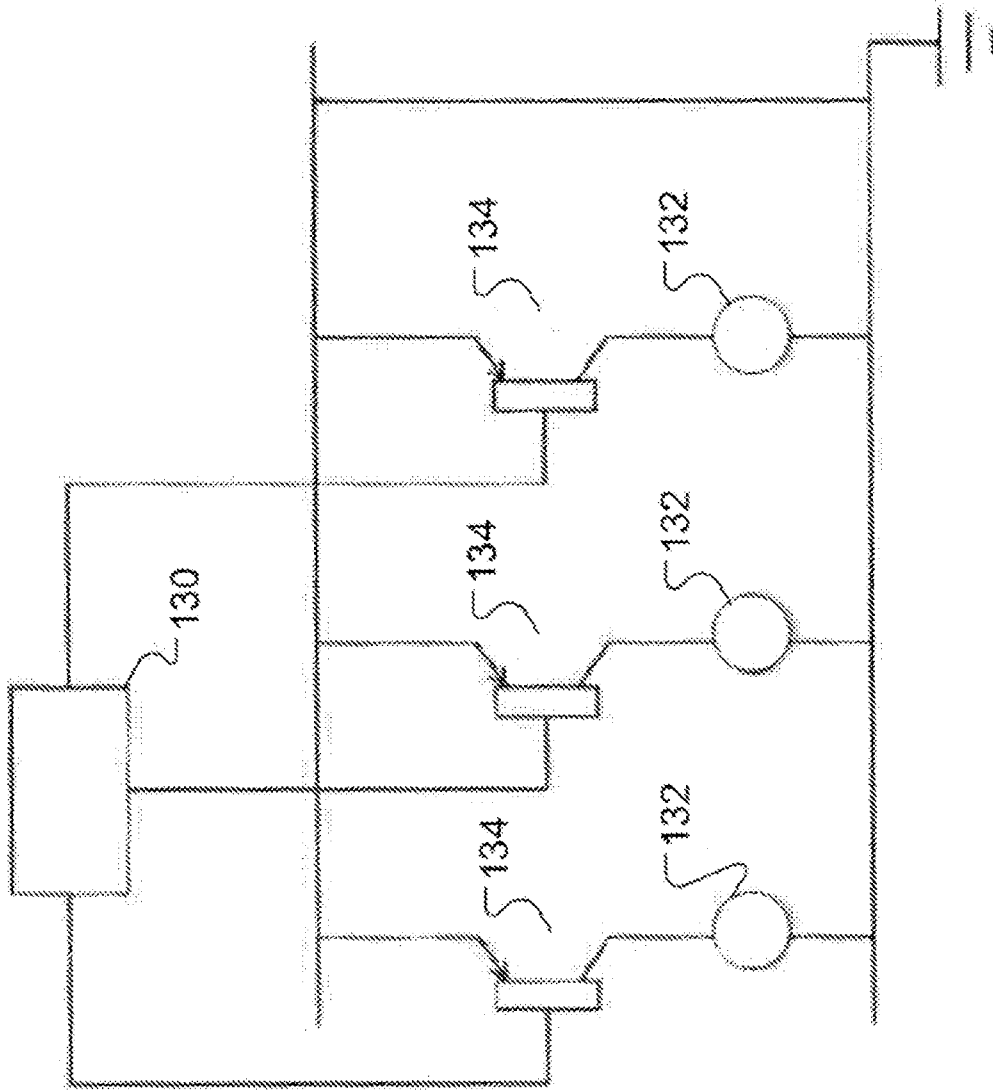


FIG. 2

200 ↗

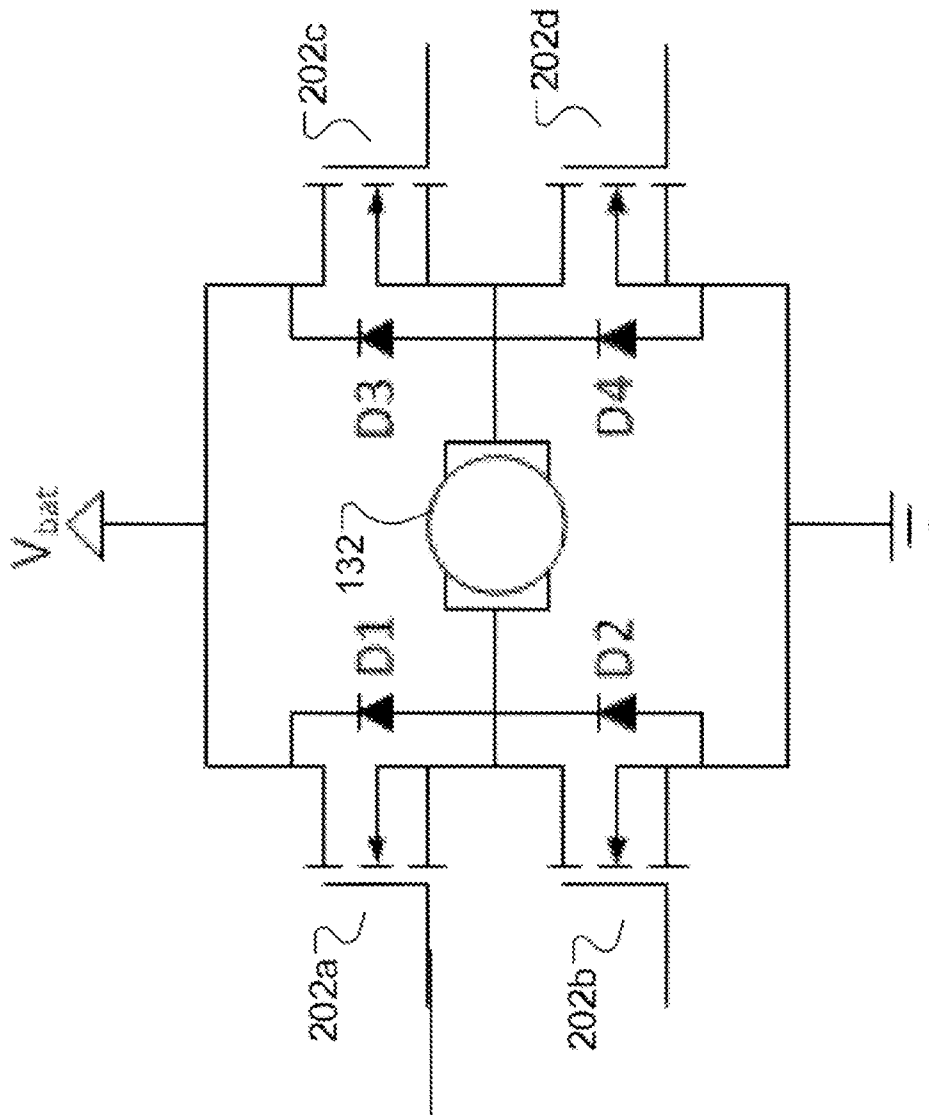


FIG. 2A

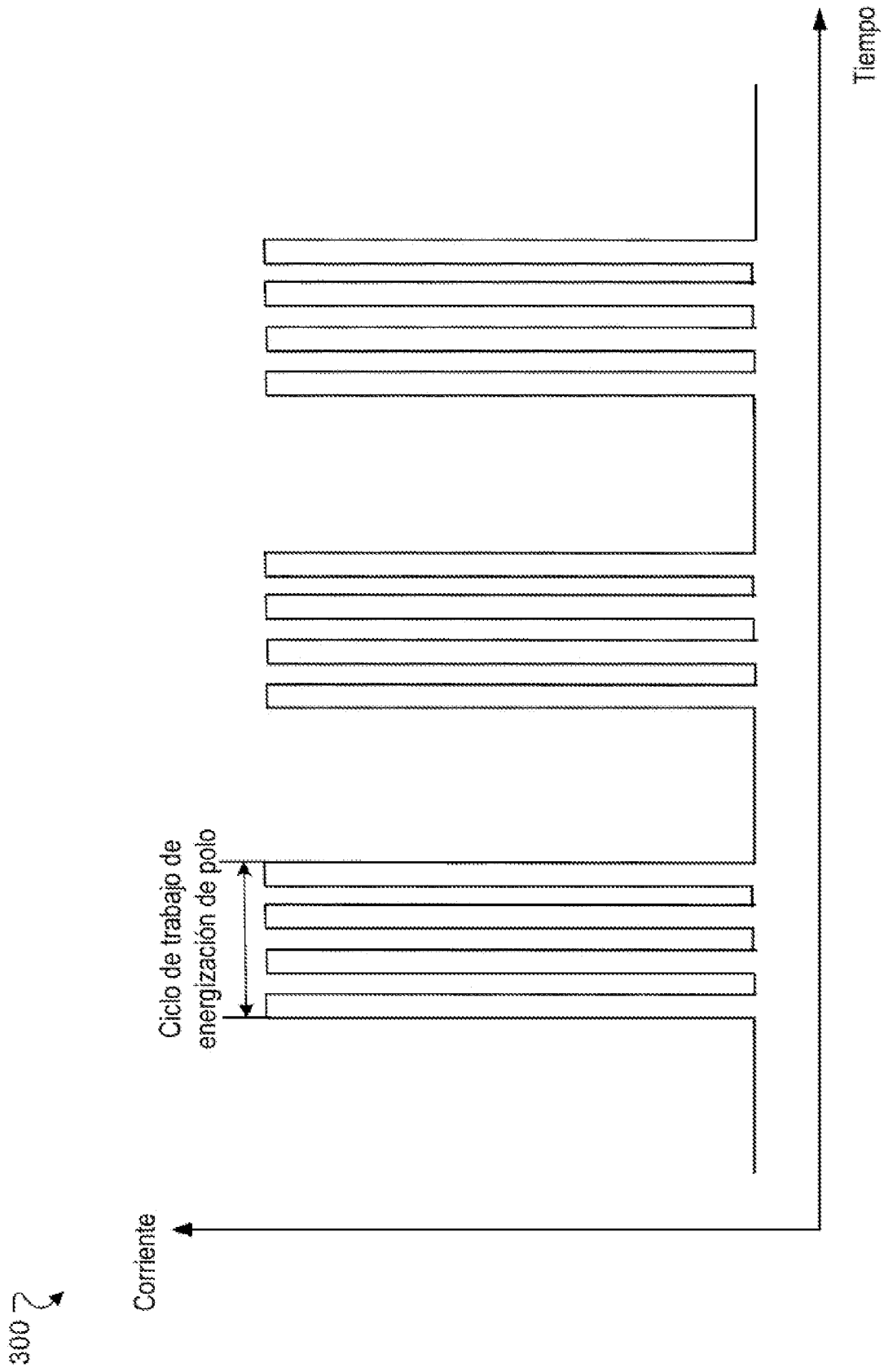


FIG. 3

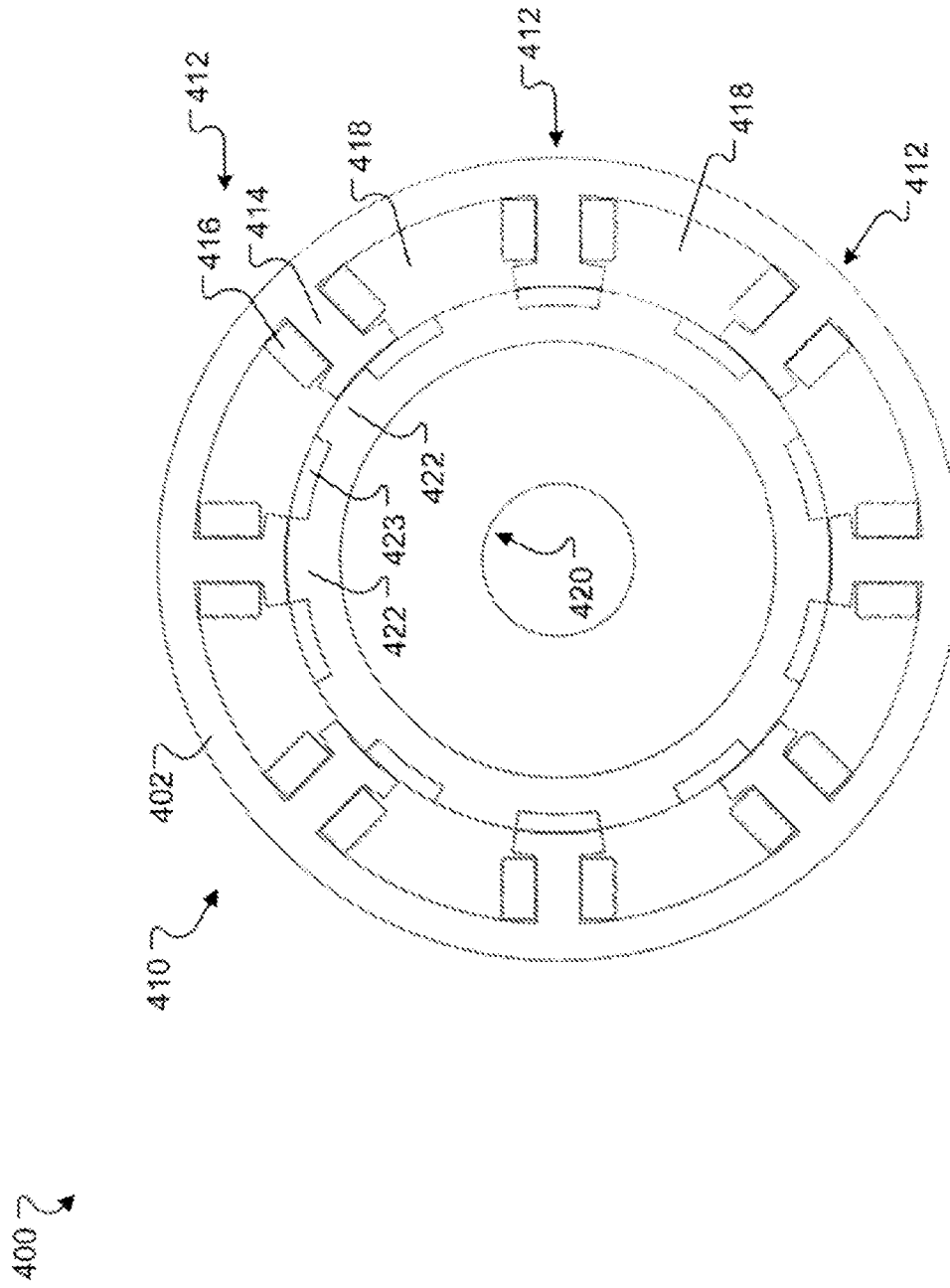


FIG. 4

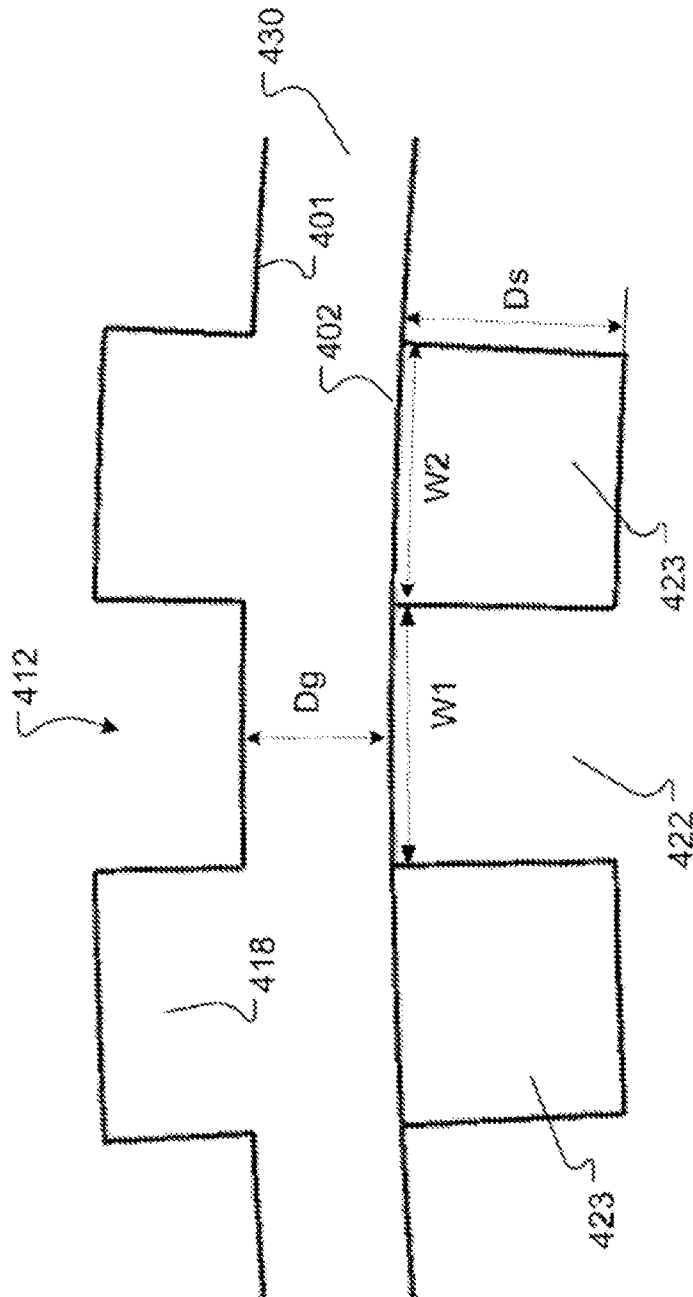


FIG. 5

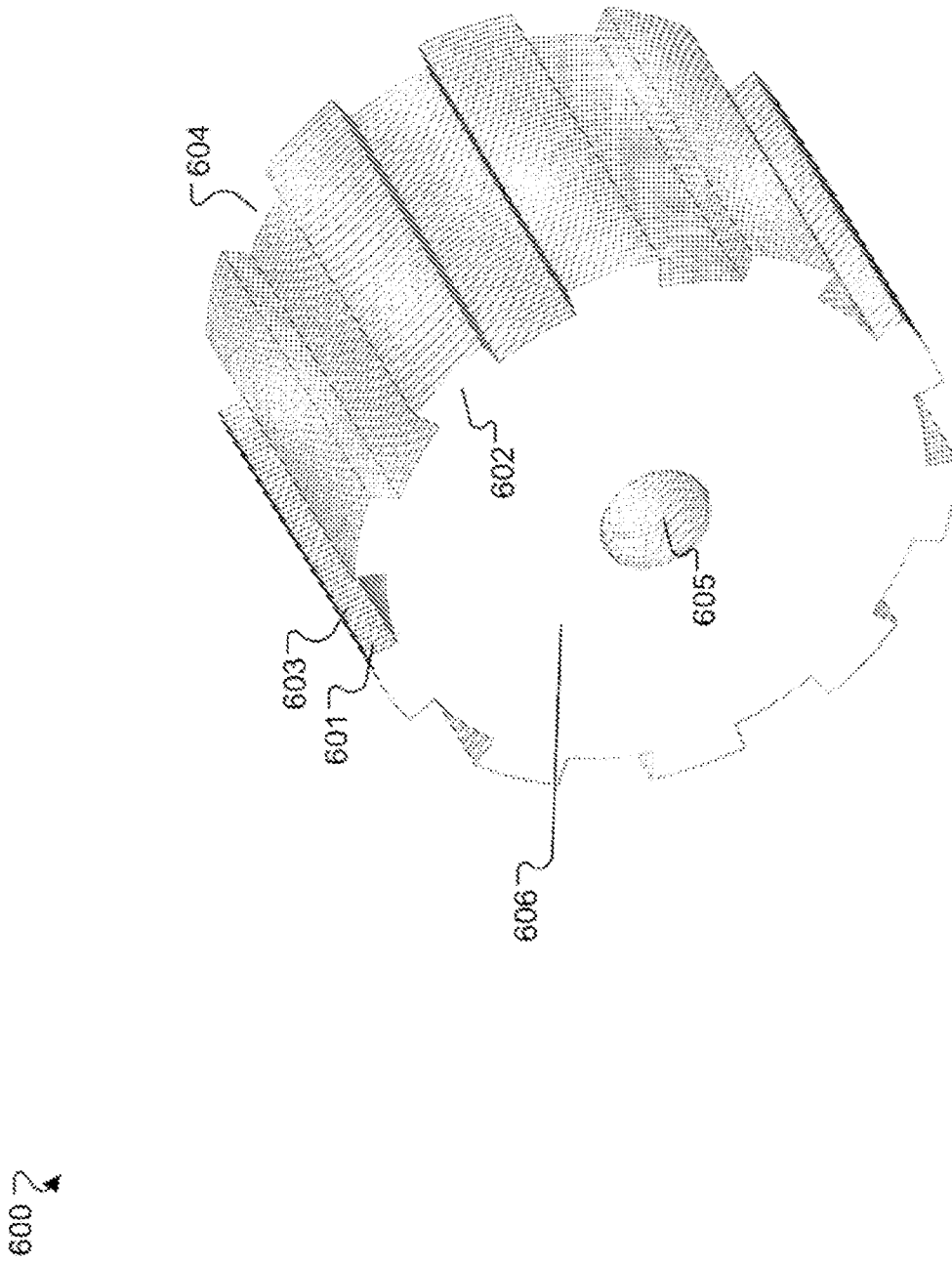


FIG. 6

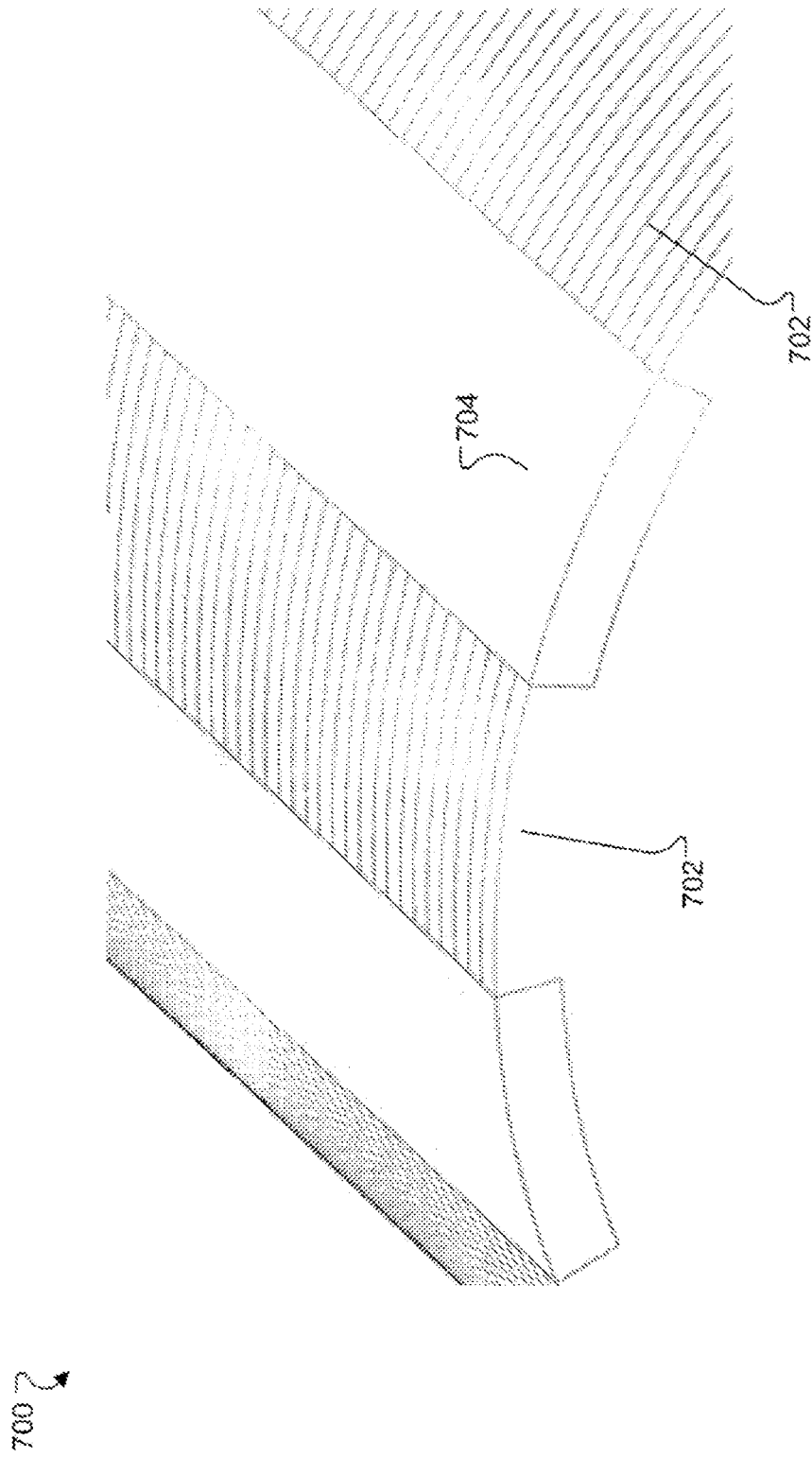


FIG. 7

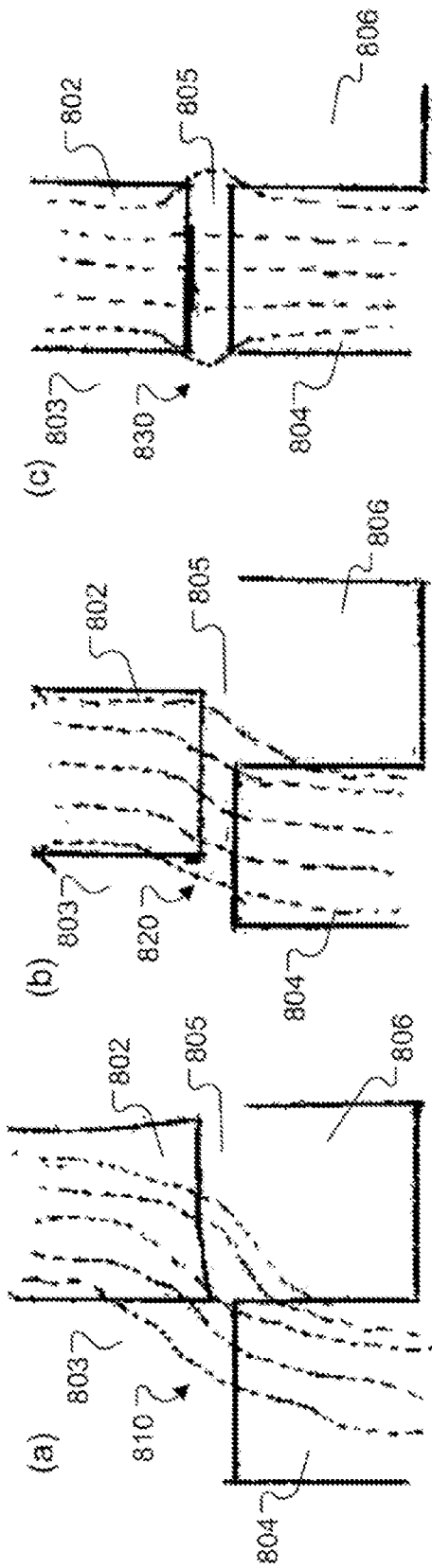


FIG. 8A

FIG. 8B

FIG. 8C

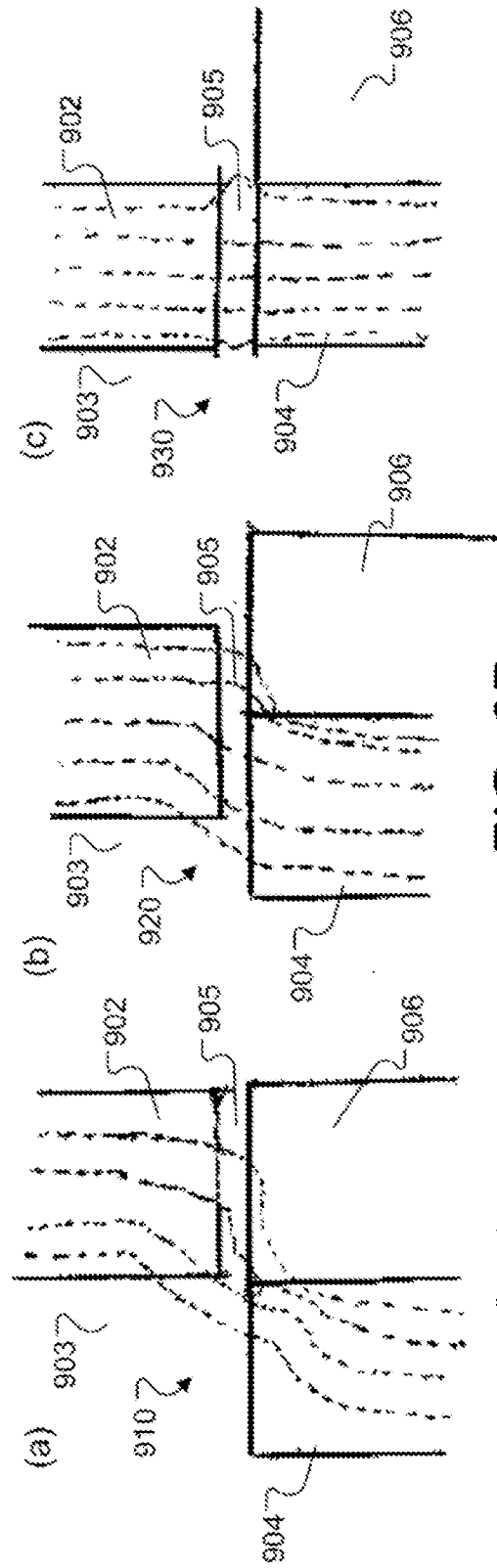
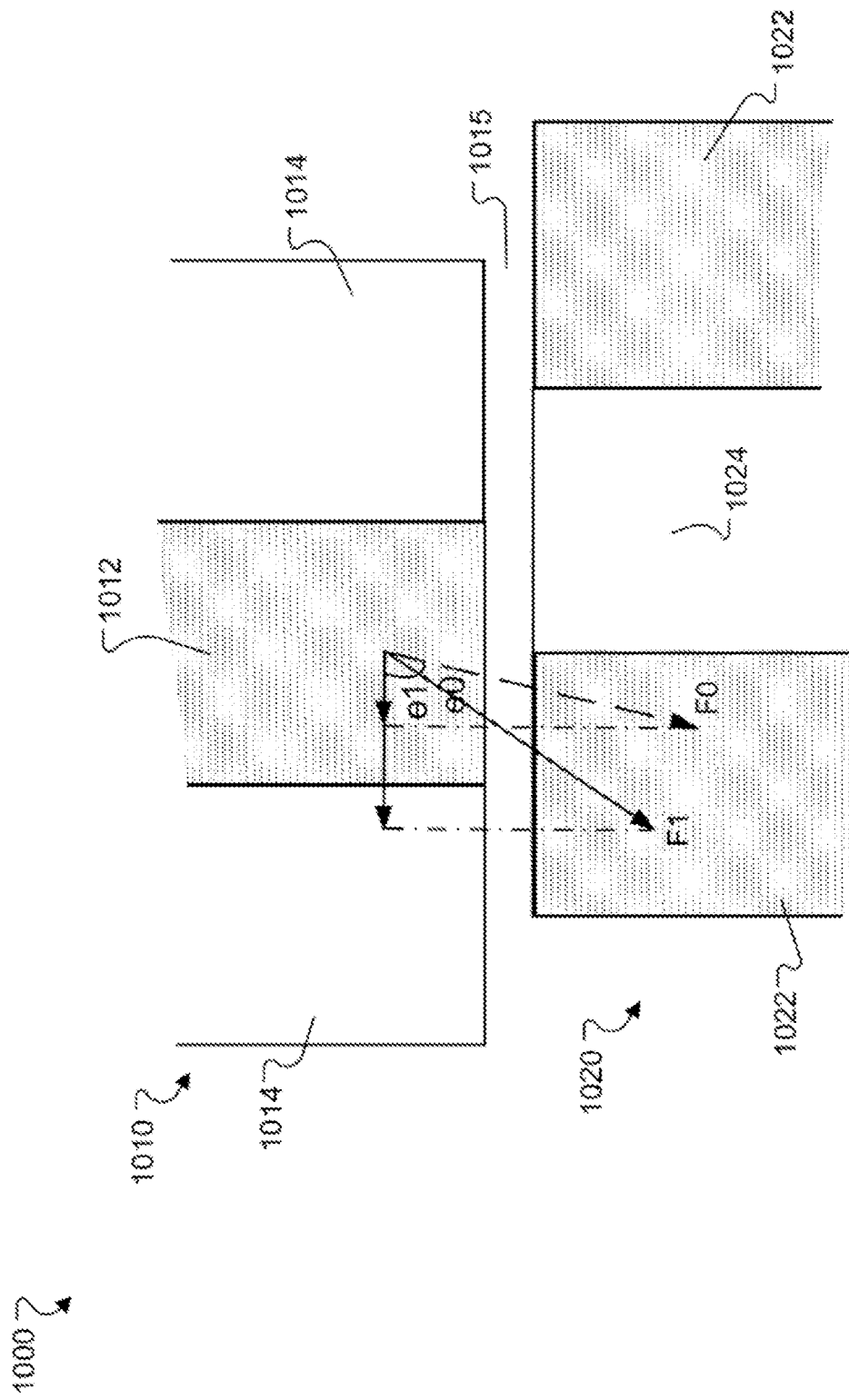


FIG. 9A

FIG. 9B

FIG. 9C

10^x 19E

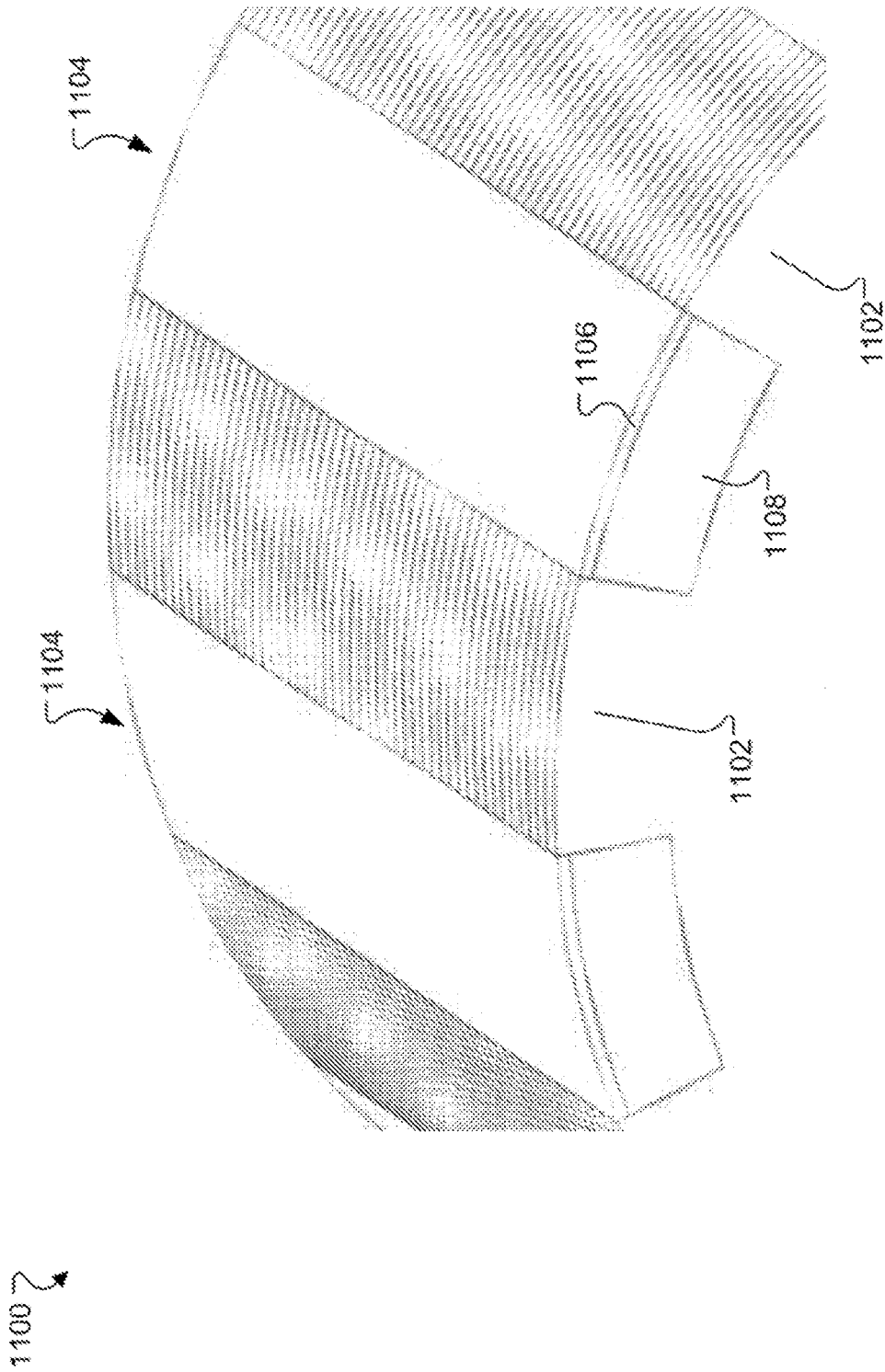


FIG. 11

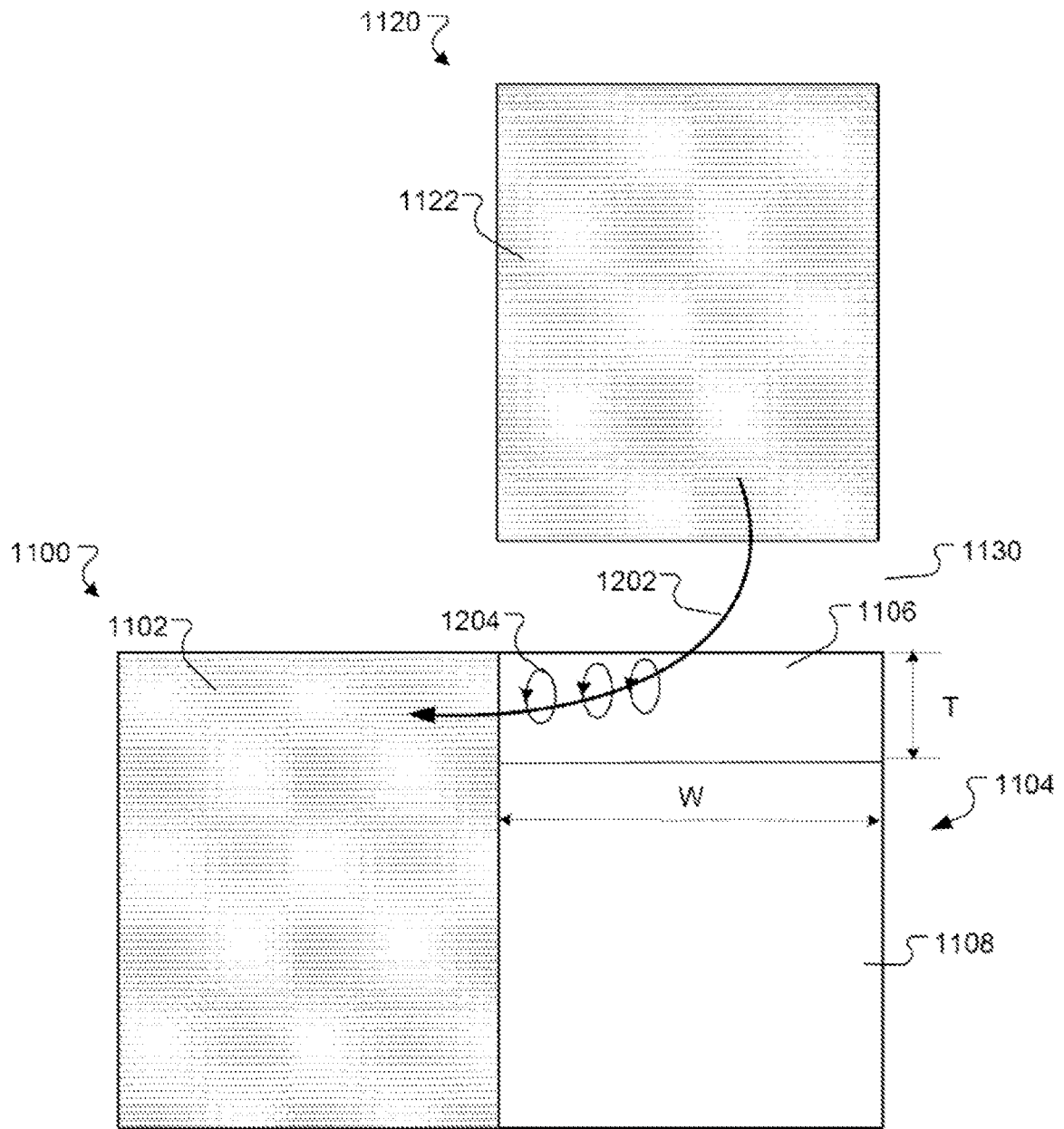


FIG. 12

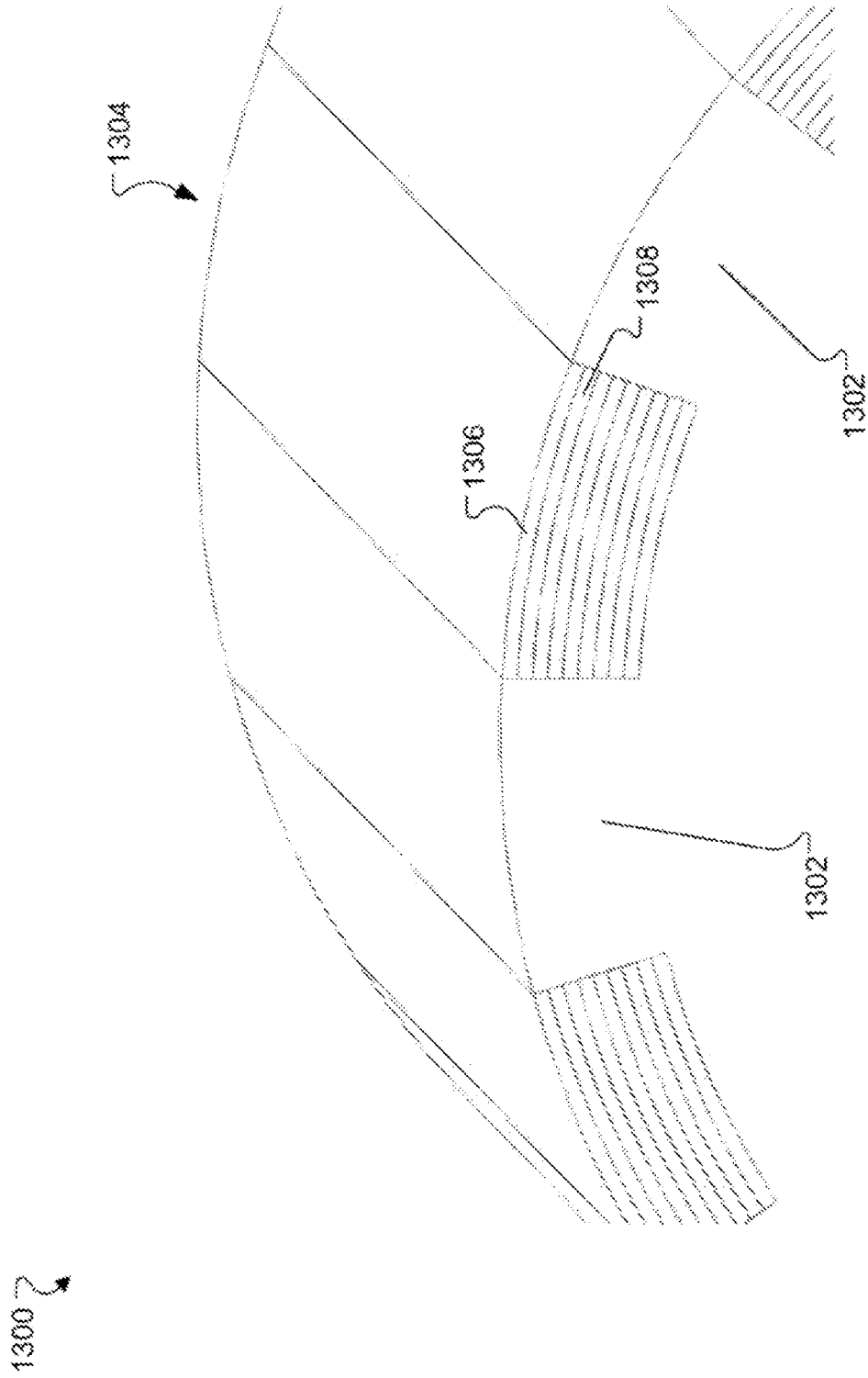


FIG. 13

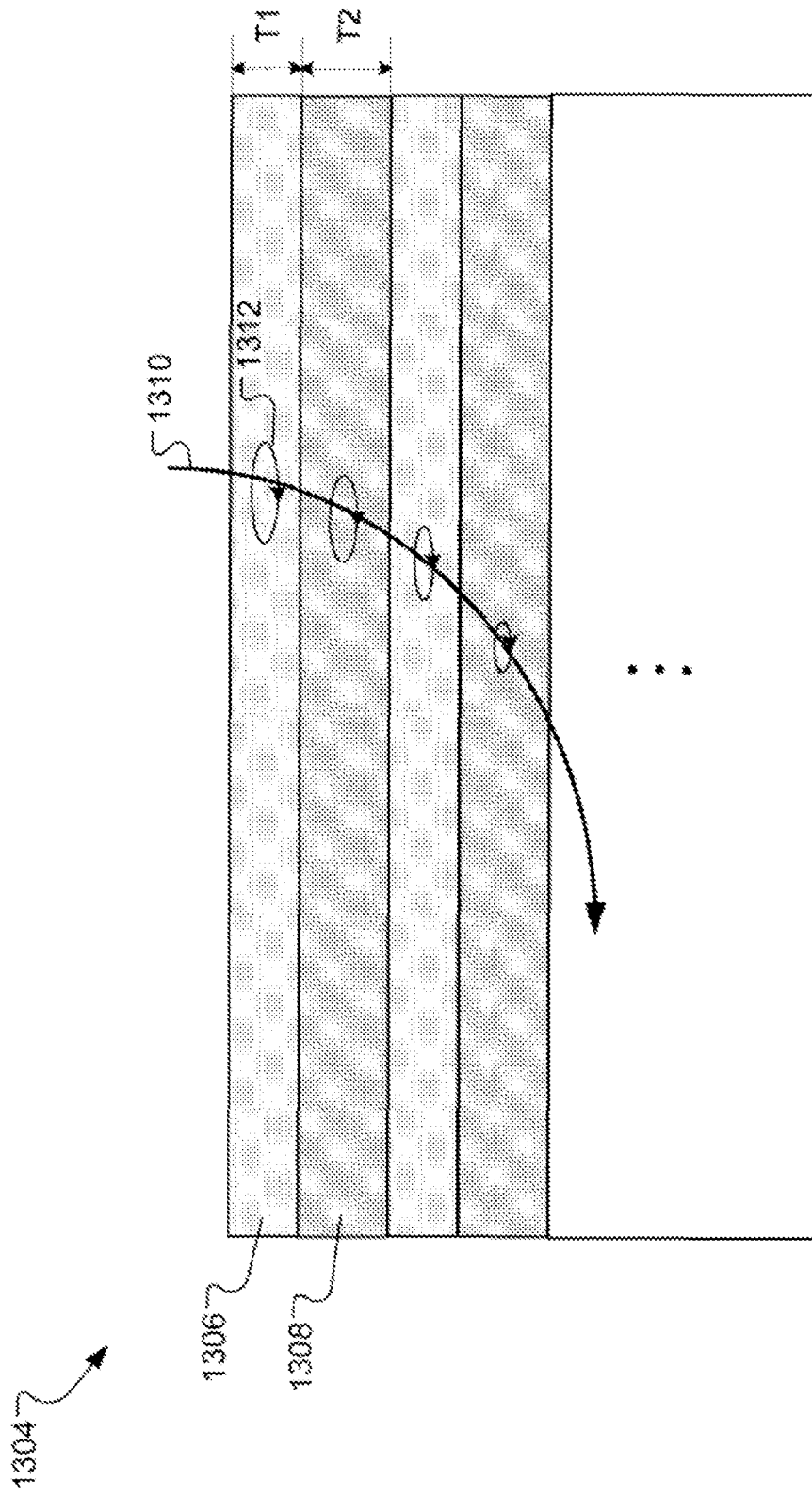


FIG. 13A

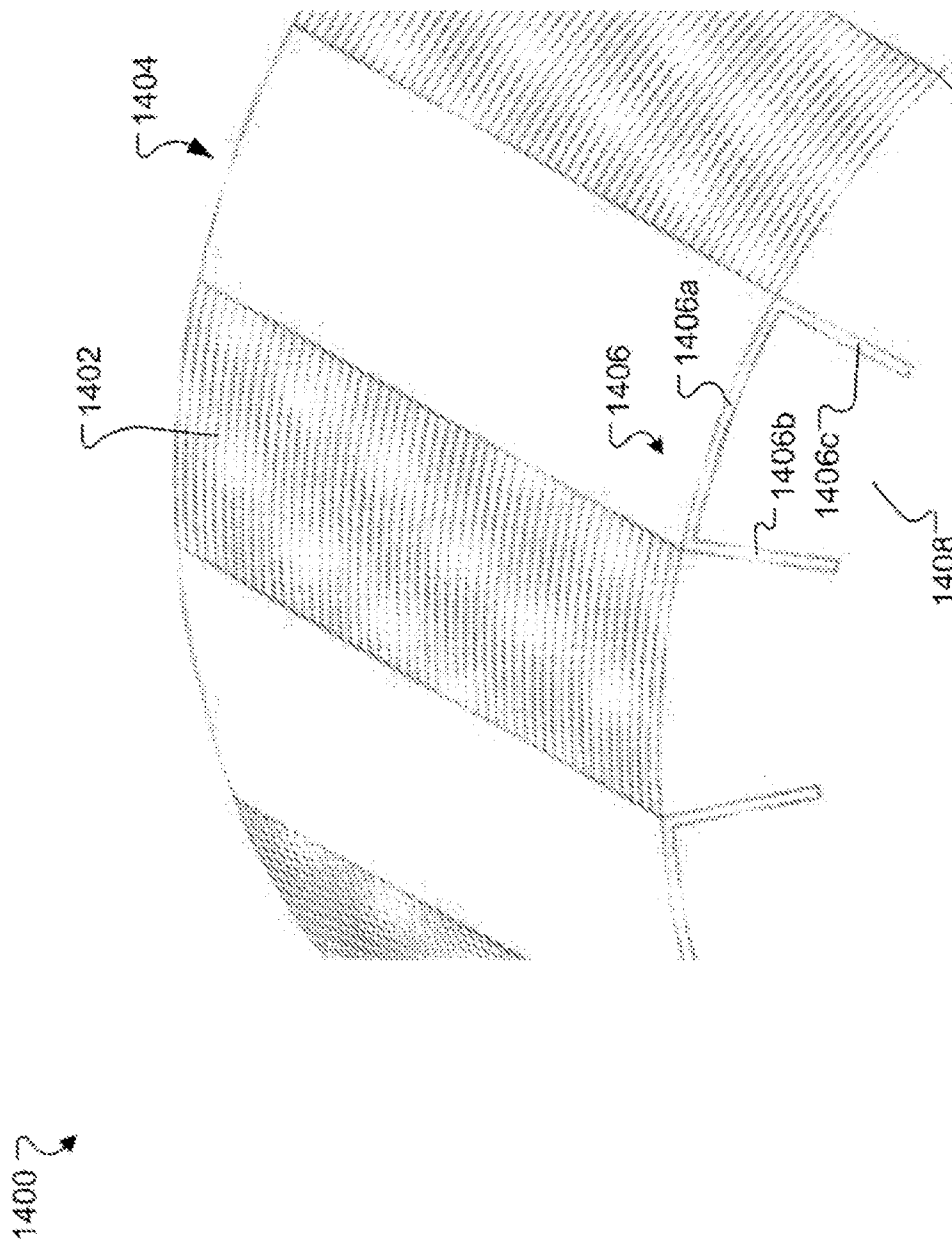


FIG. 14

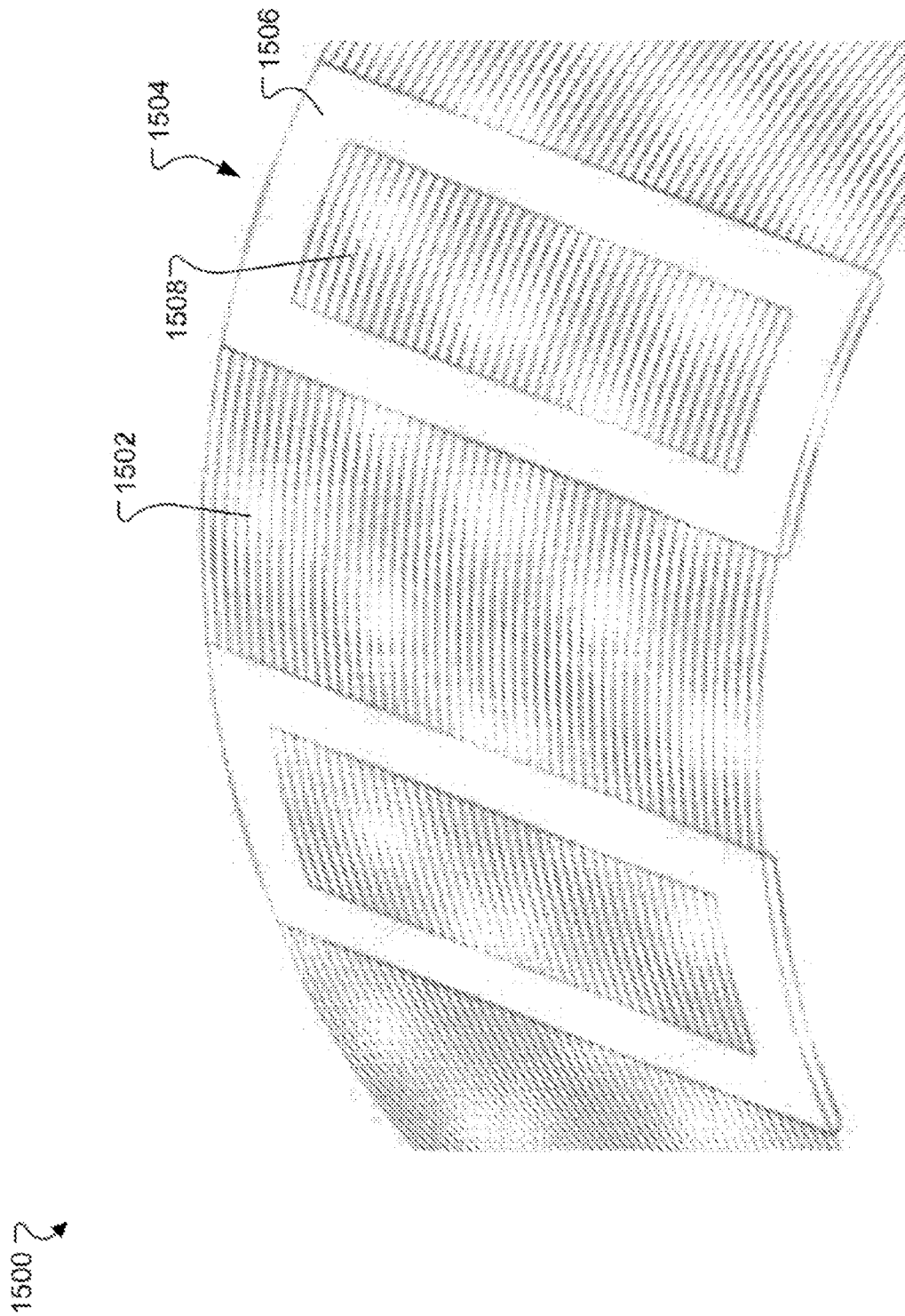


FIG. 15

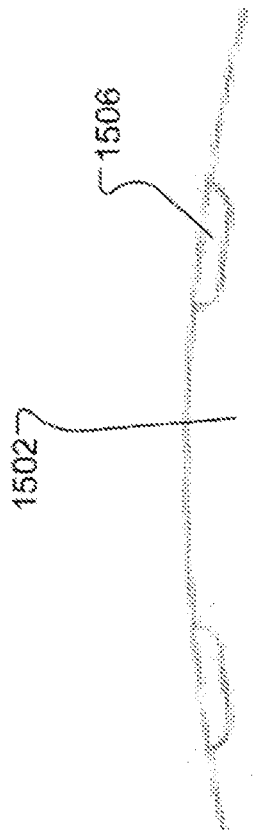


FIG. 15A

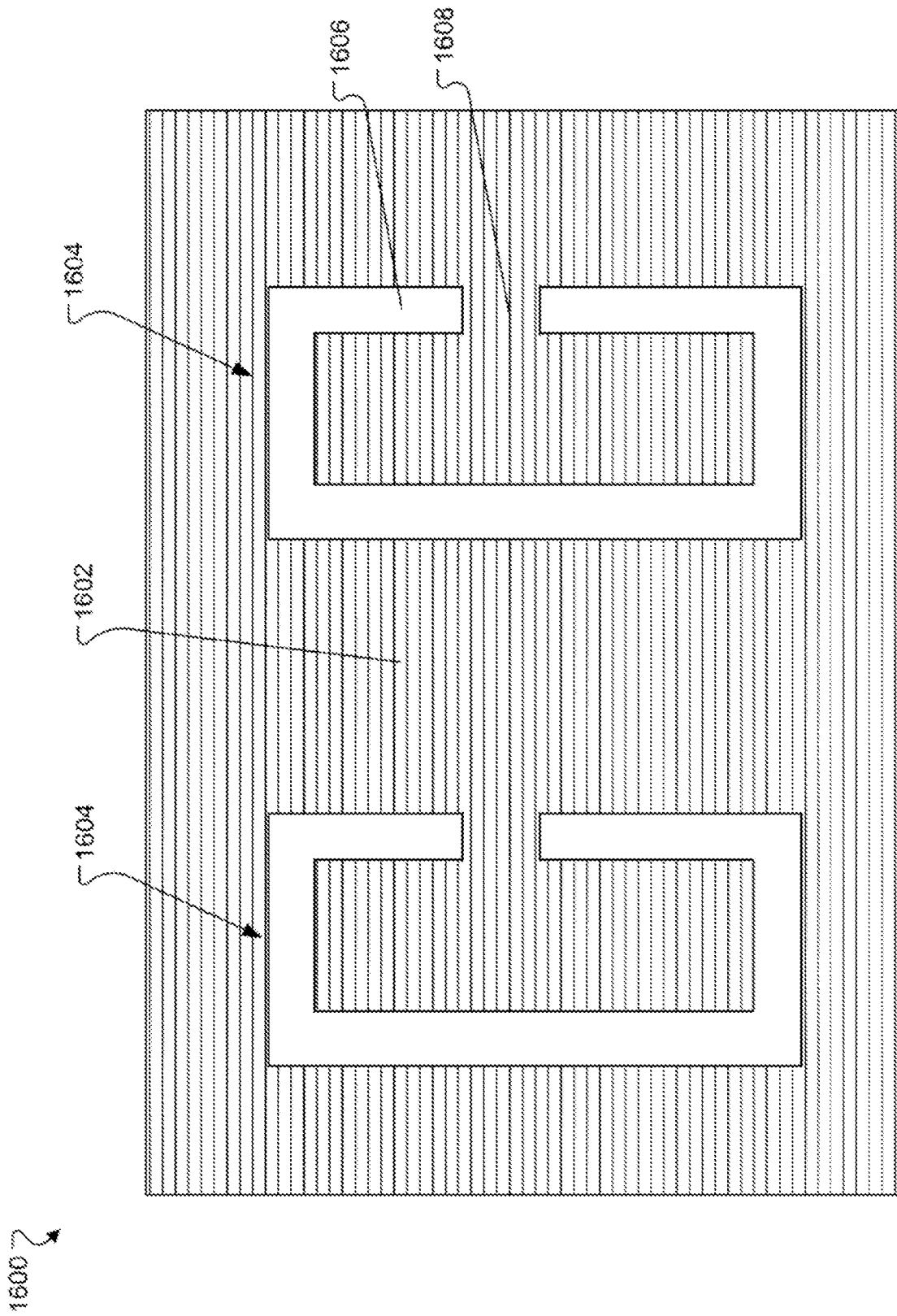


FIG. 16

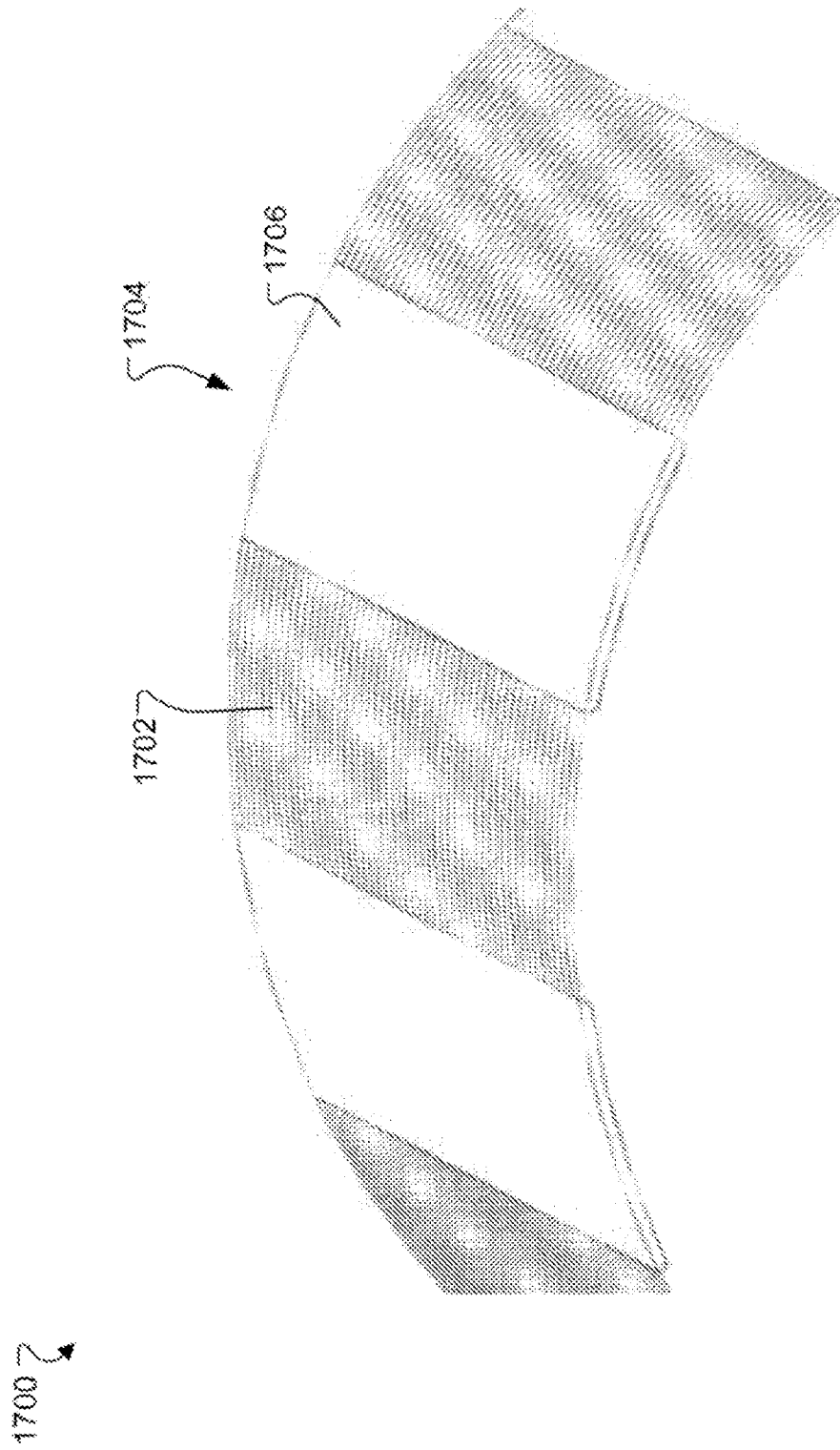


FIG. 17

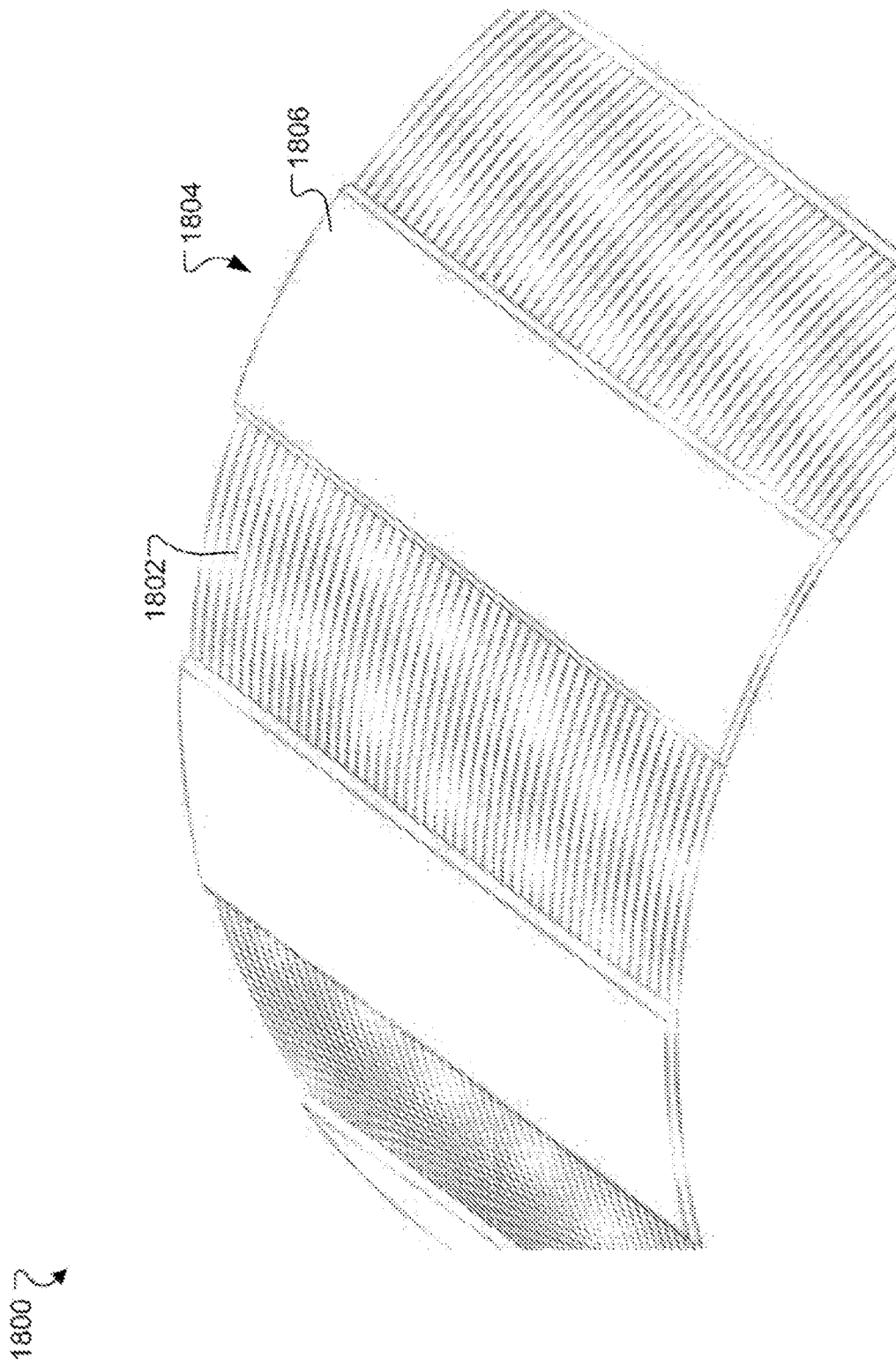


FIG. 18

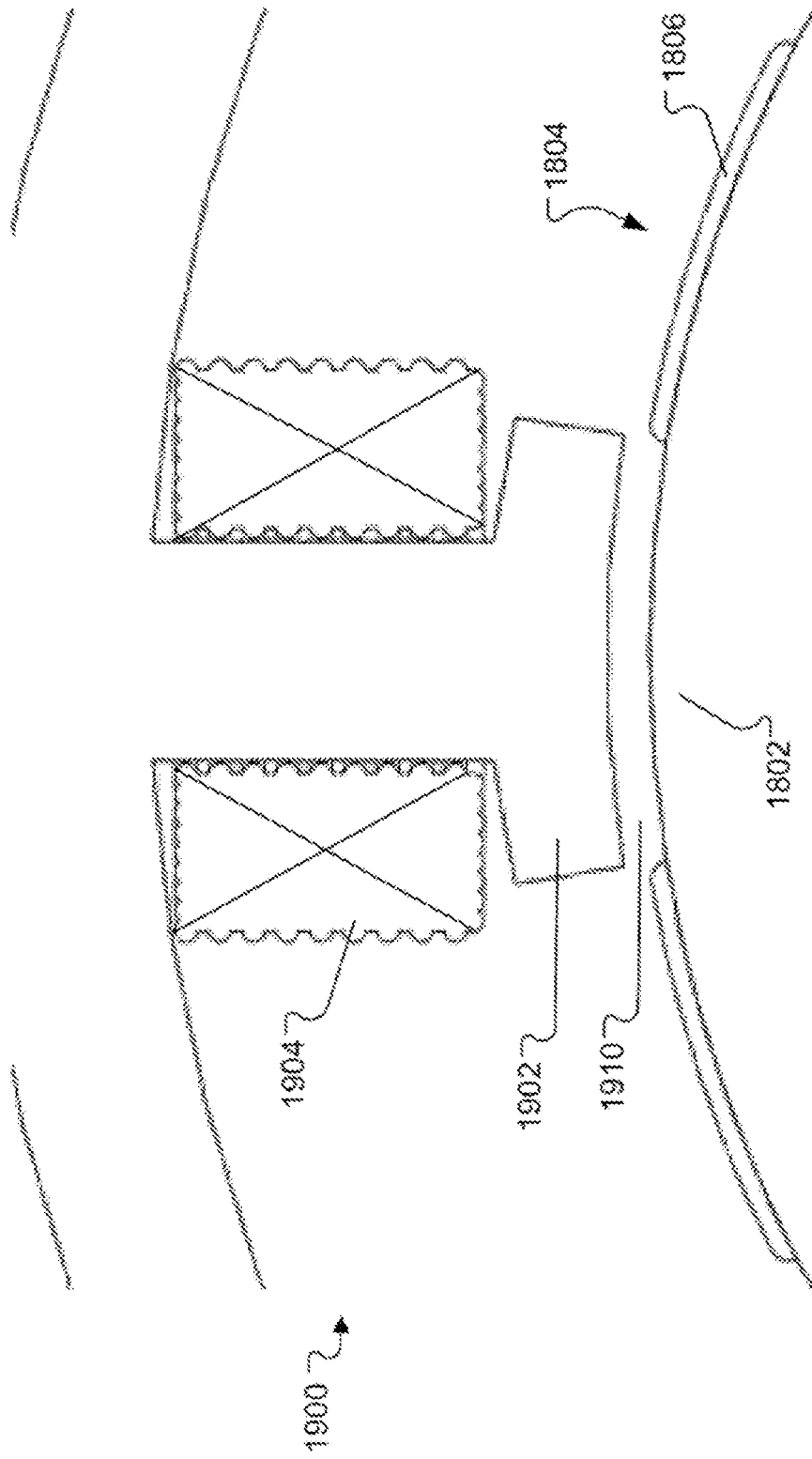


FIG. 19

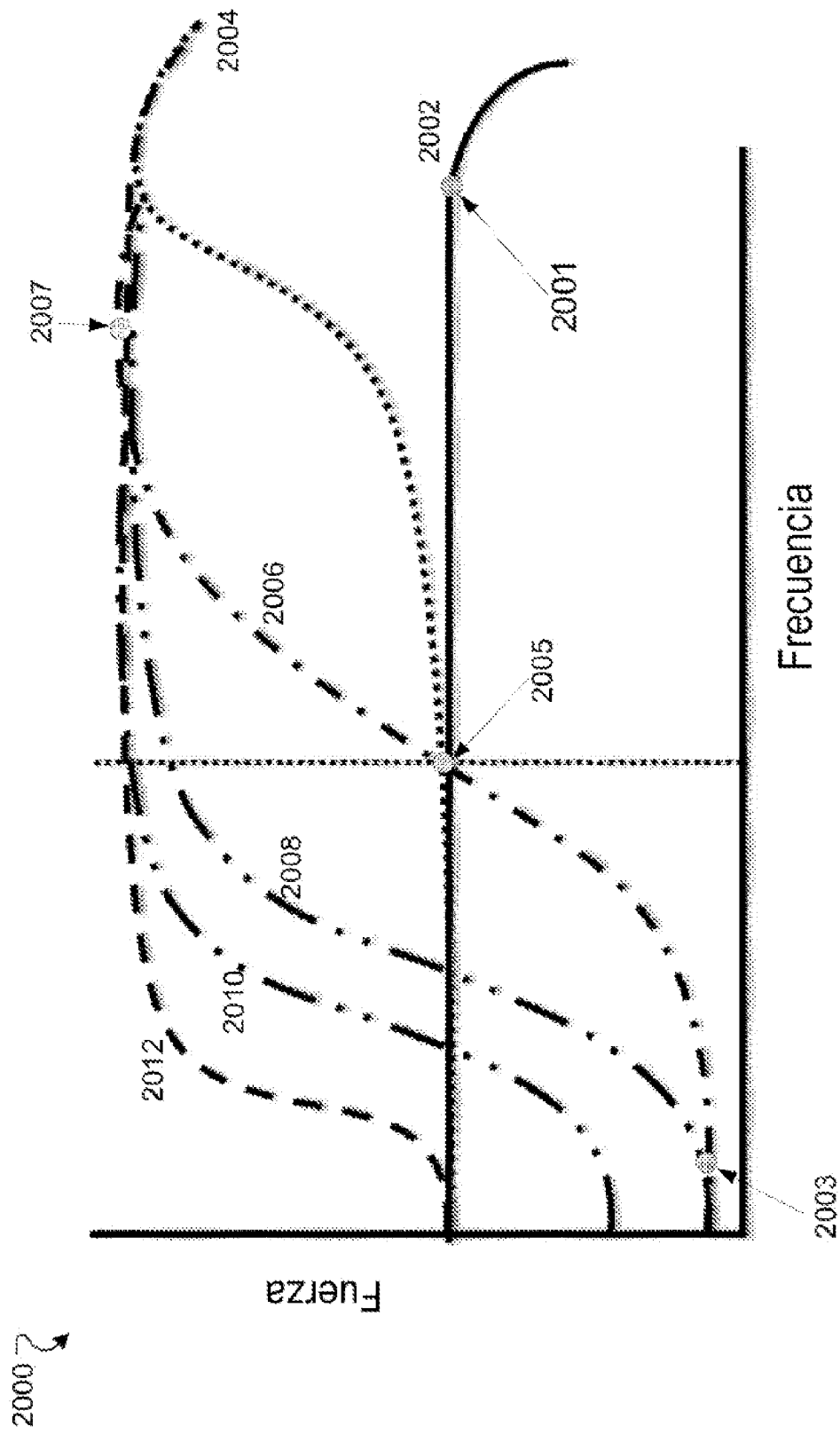


FIG. 20

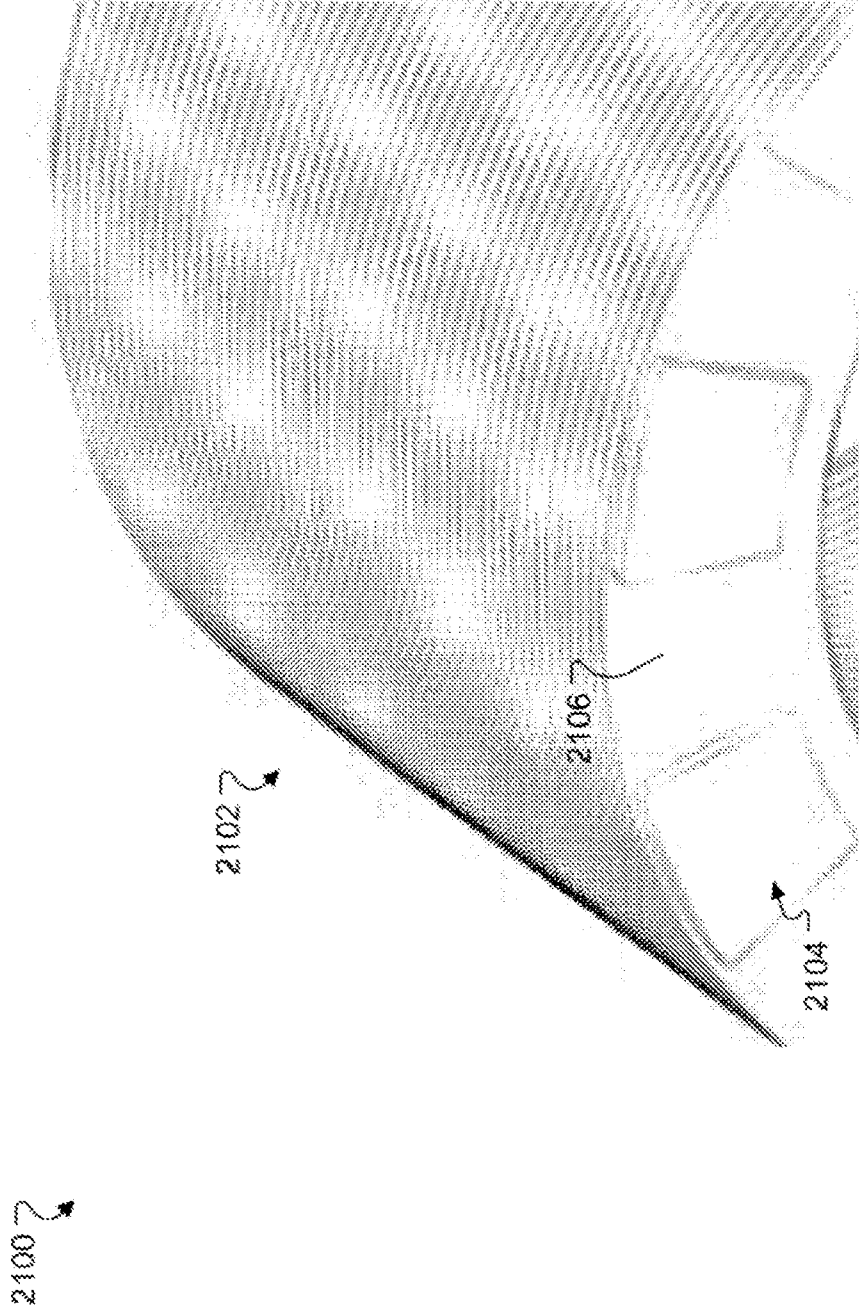


FIG. 21

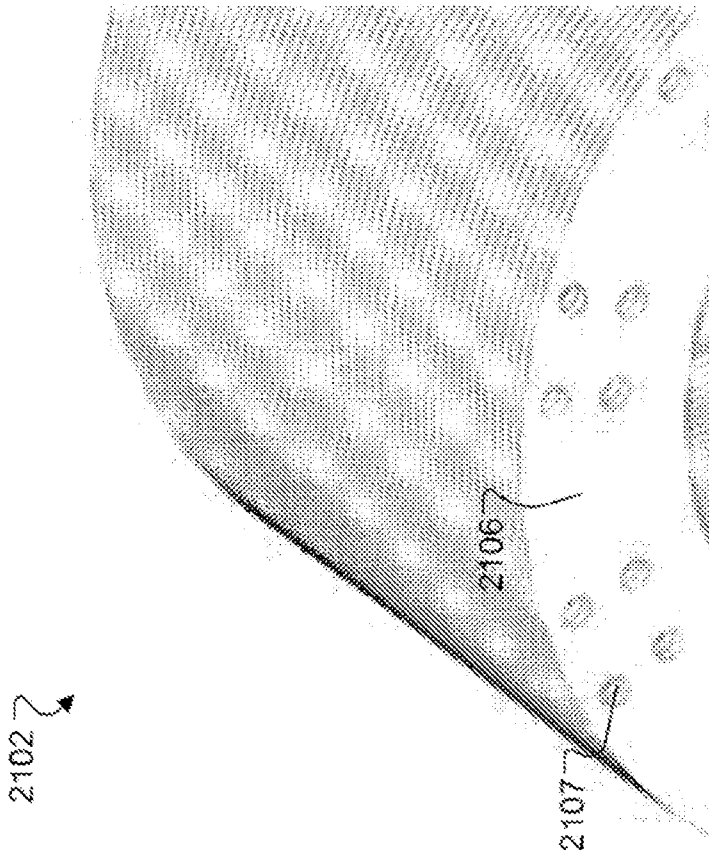


FIG. 22

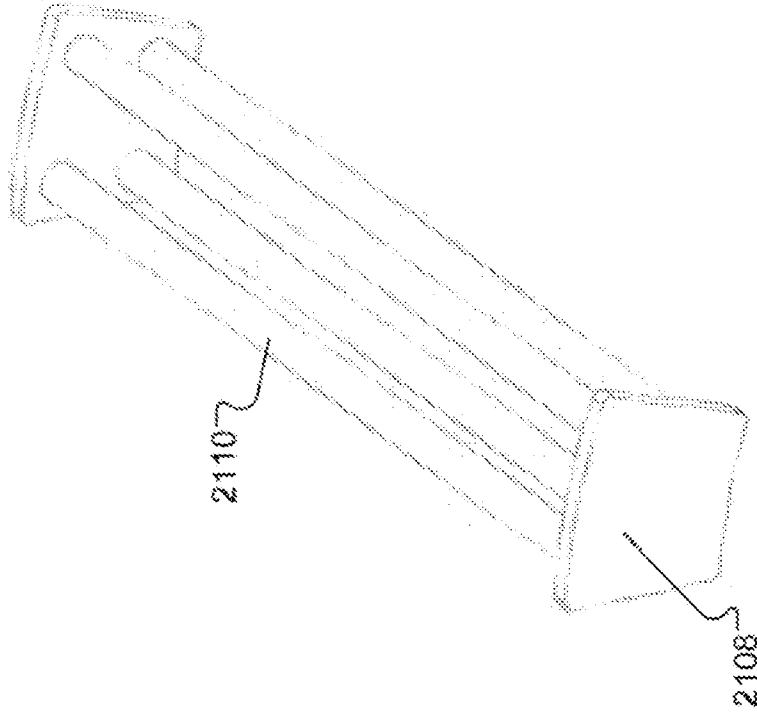


FIG. 23

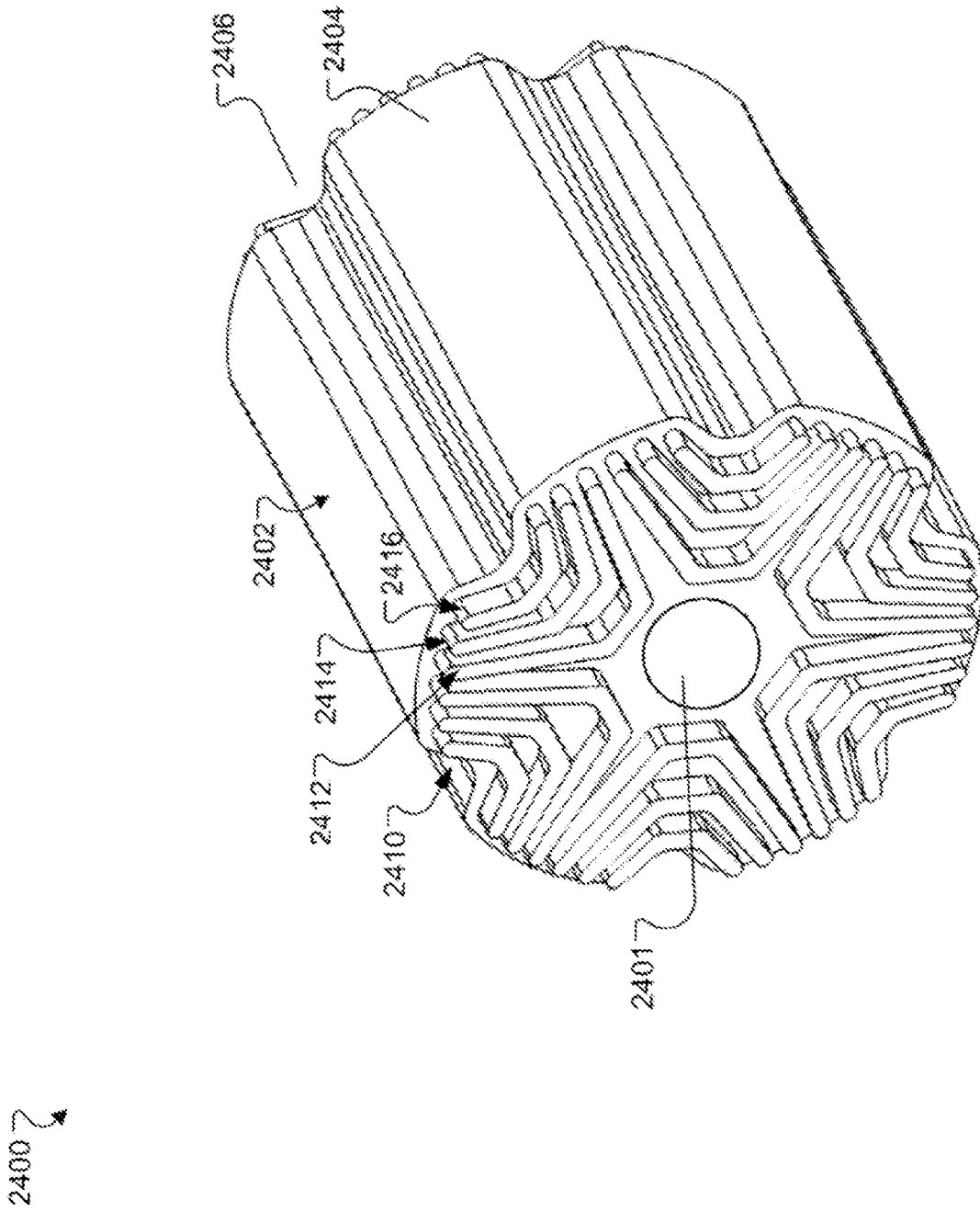


FIG. 24

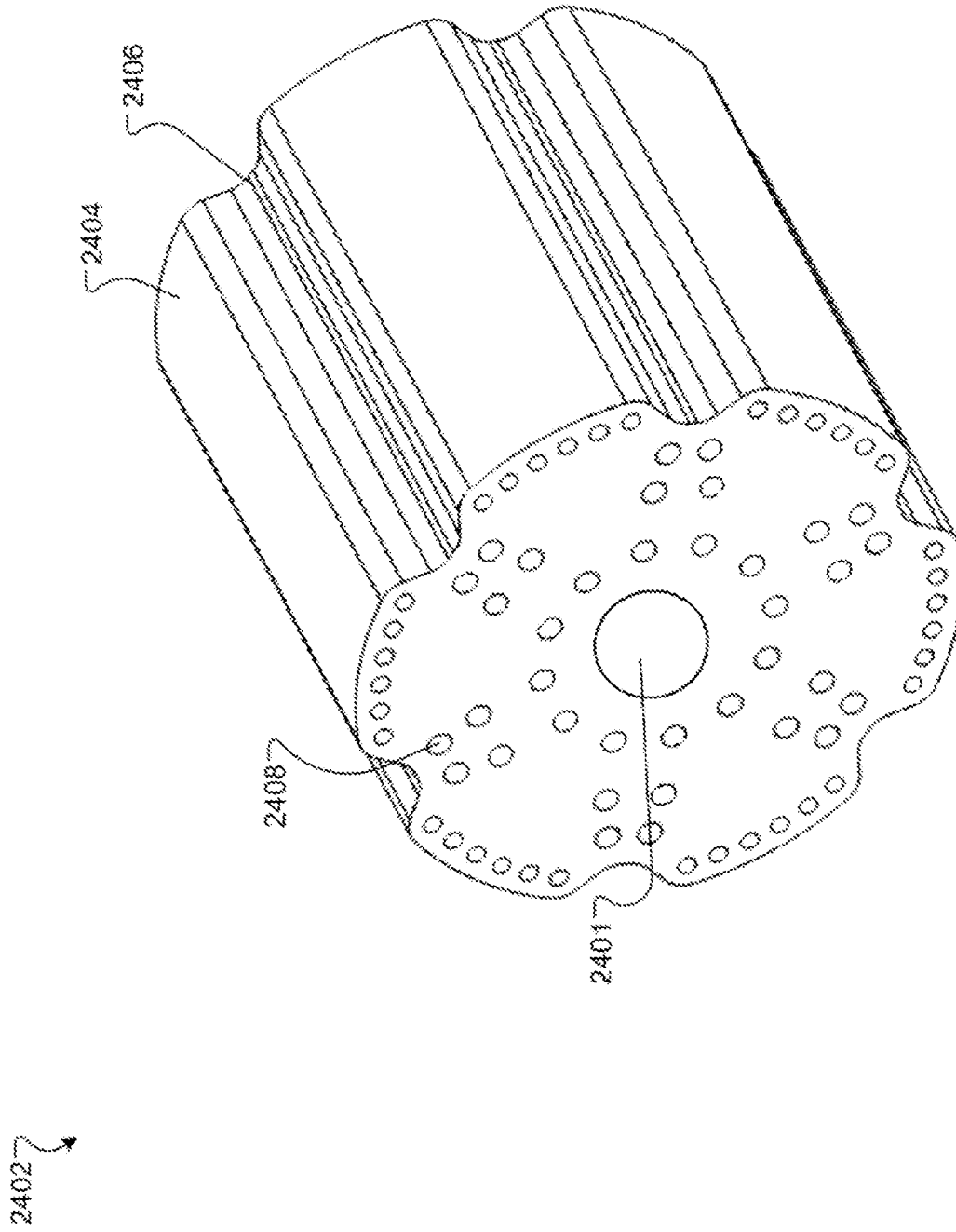


FIG. 25

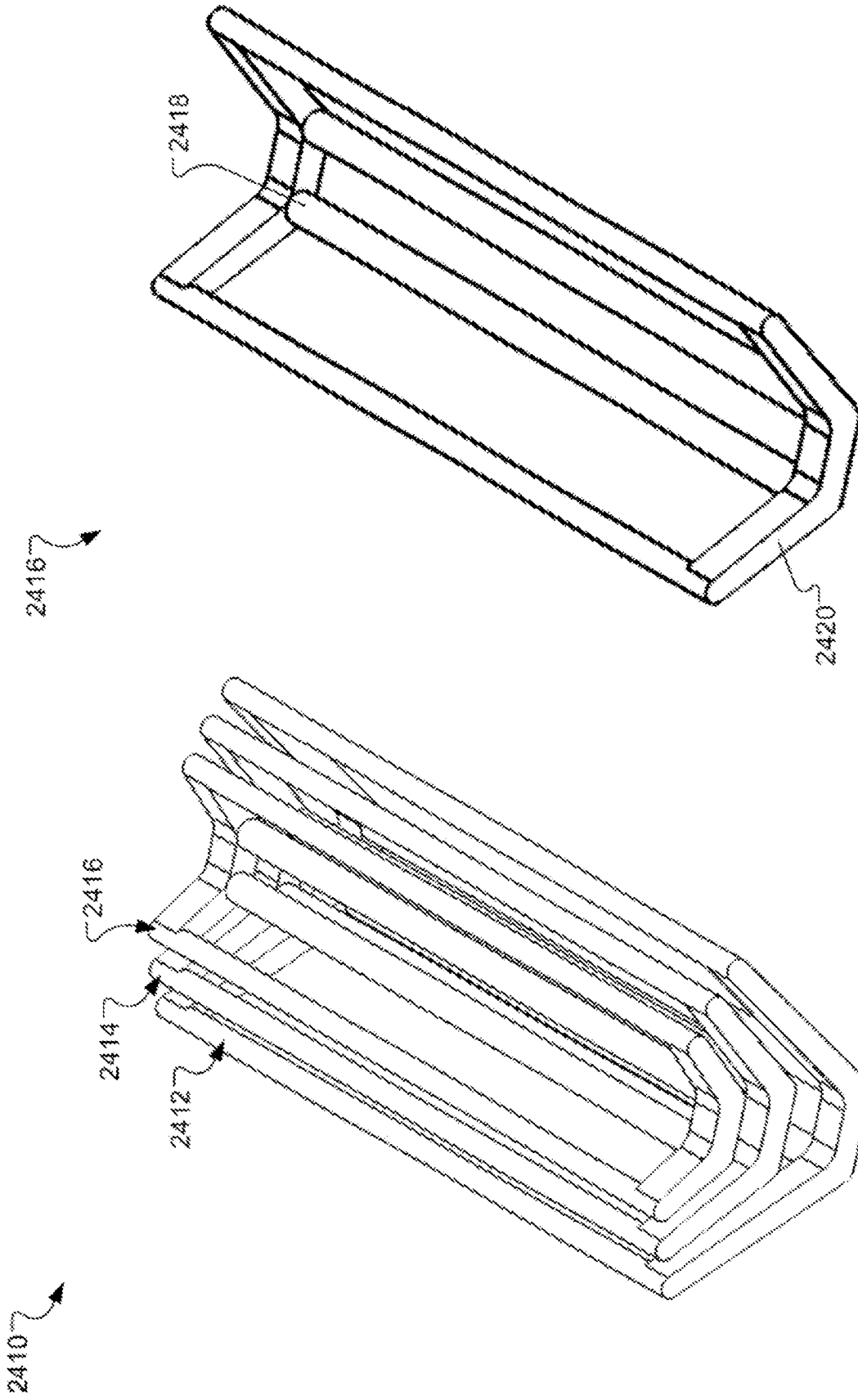


FIG. 26A

FIG. 26

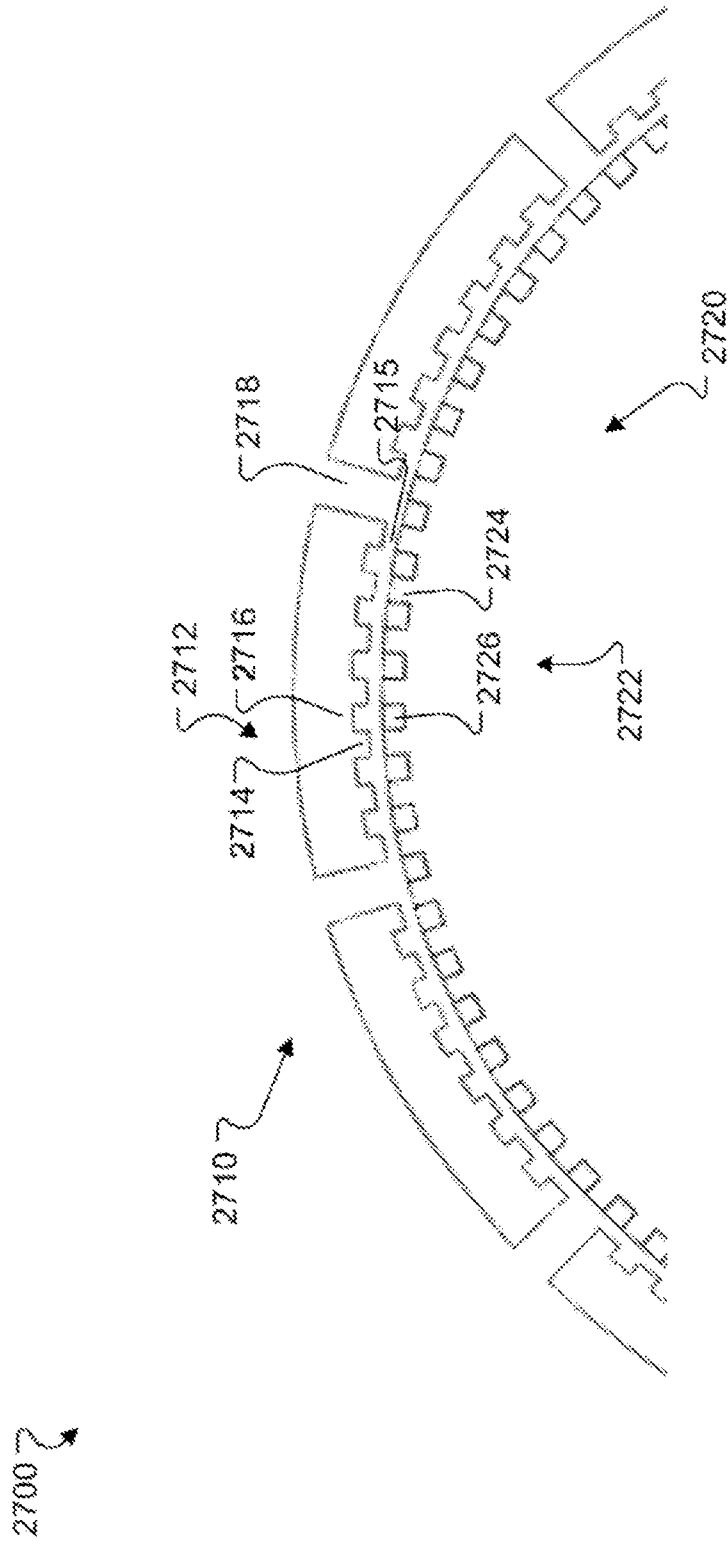


FIG. 27

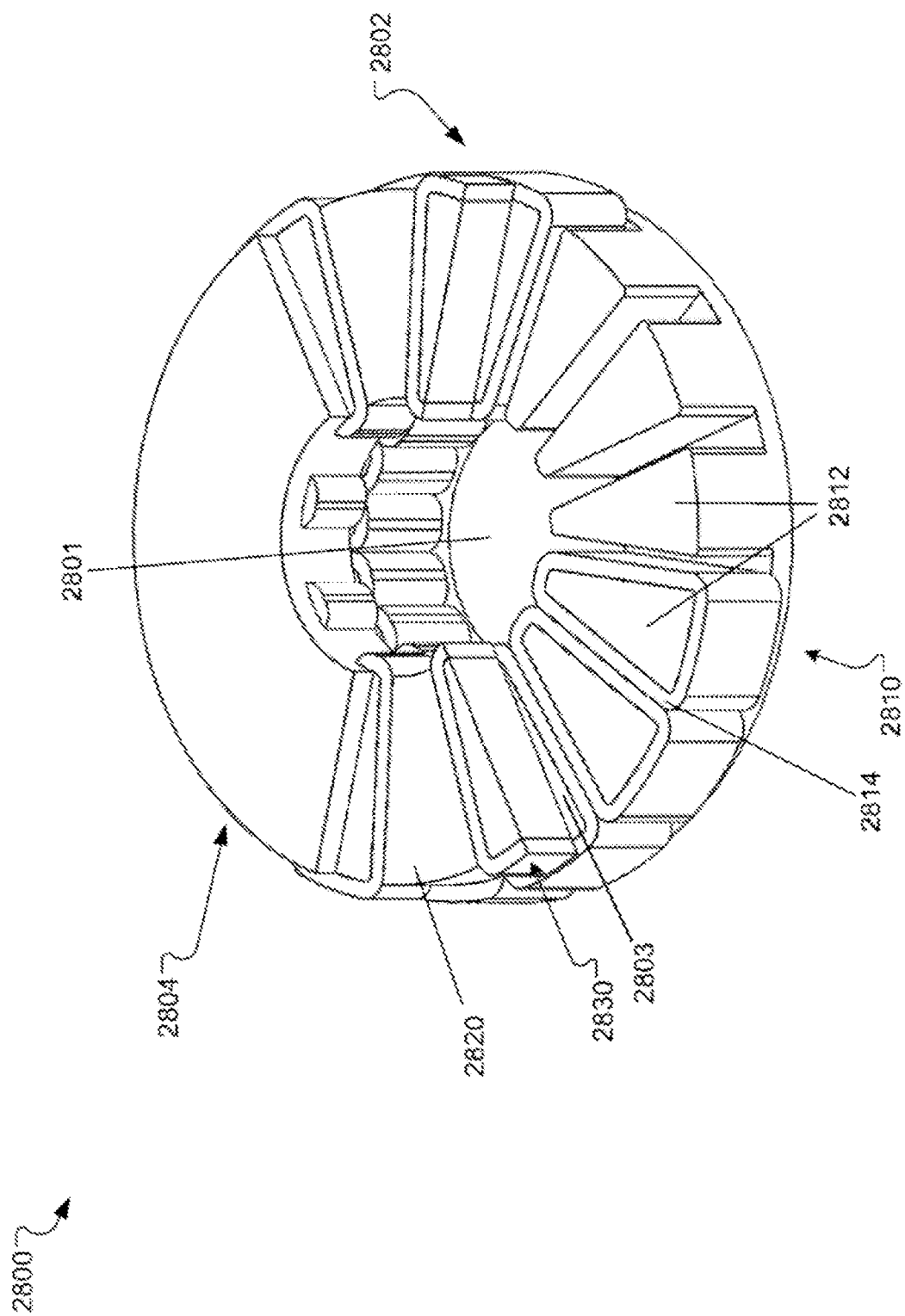


FIG. 28

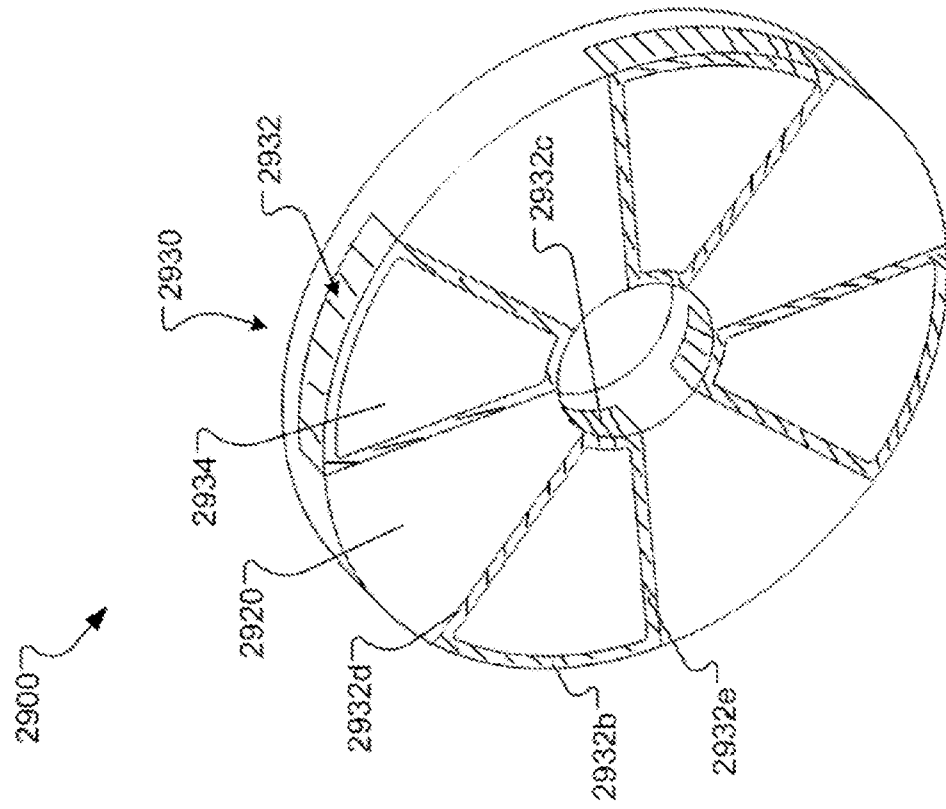


FIG. 29

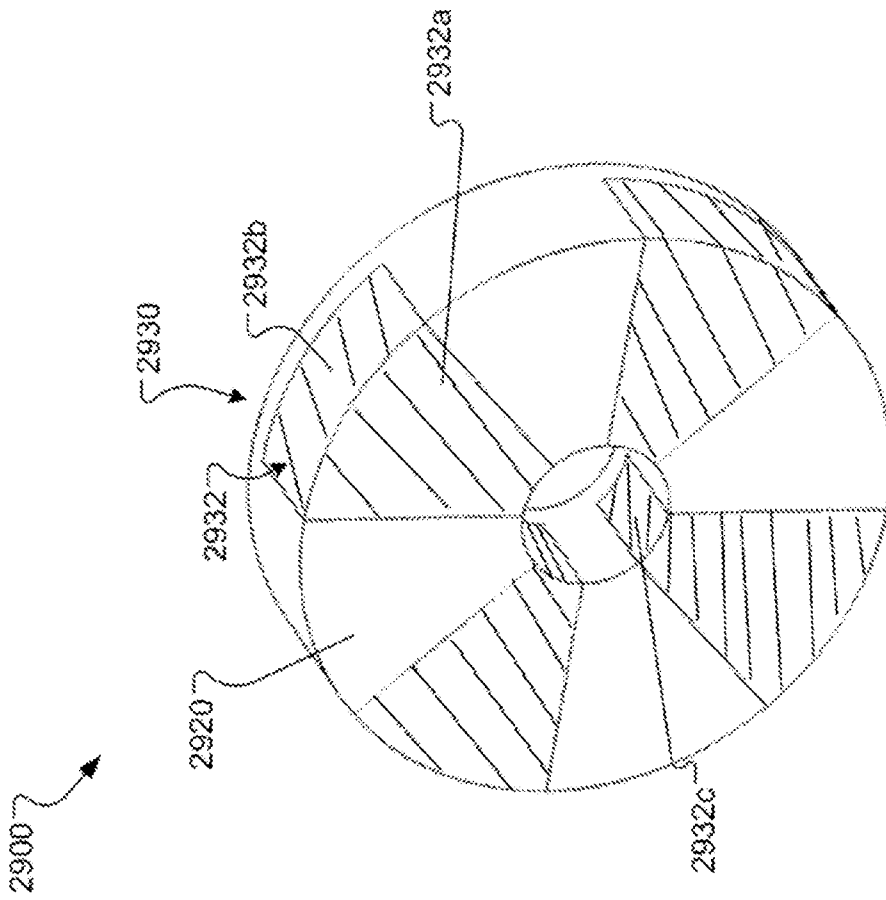


FIG. 30

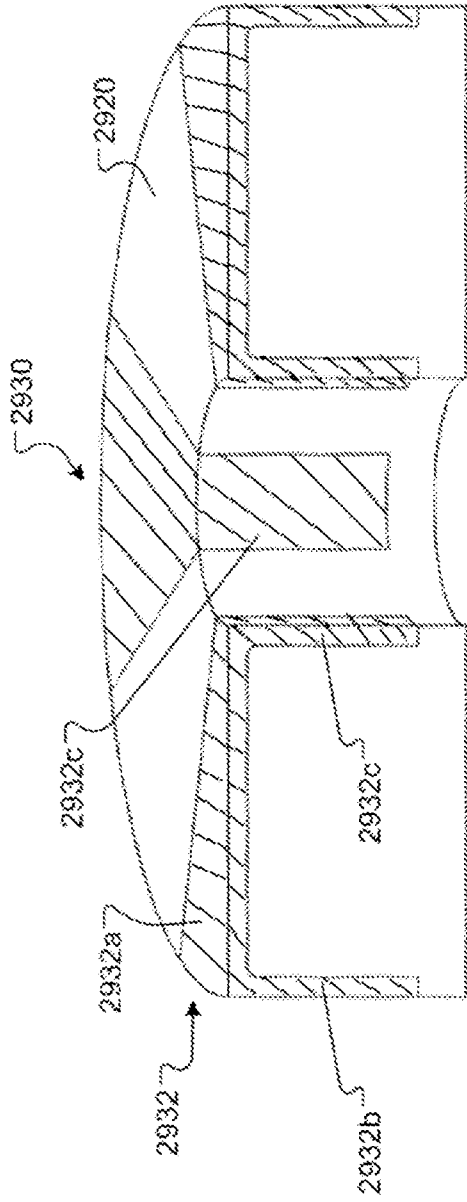


FIG. 31

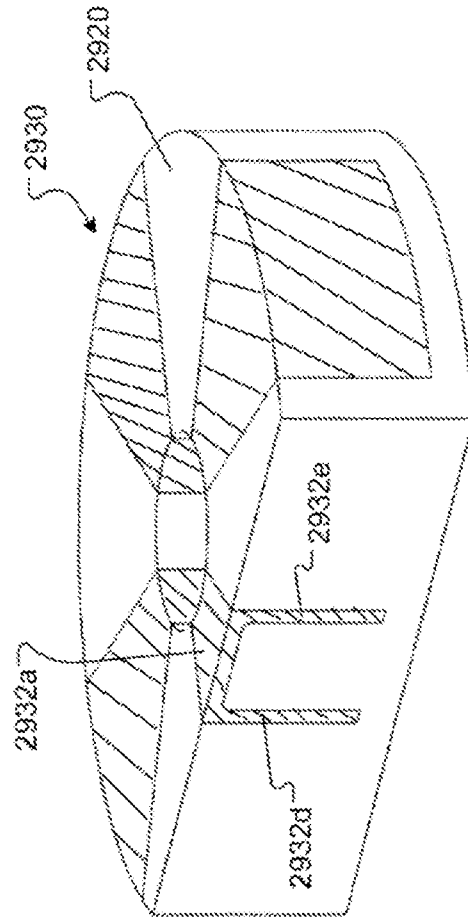


FIG. 32

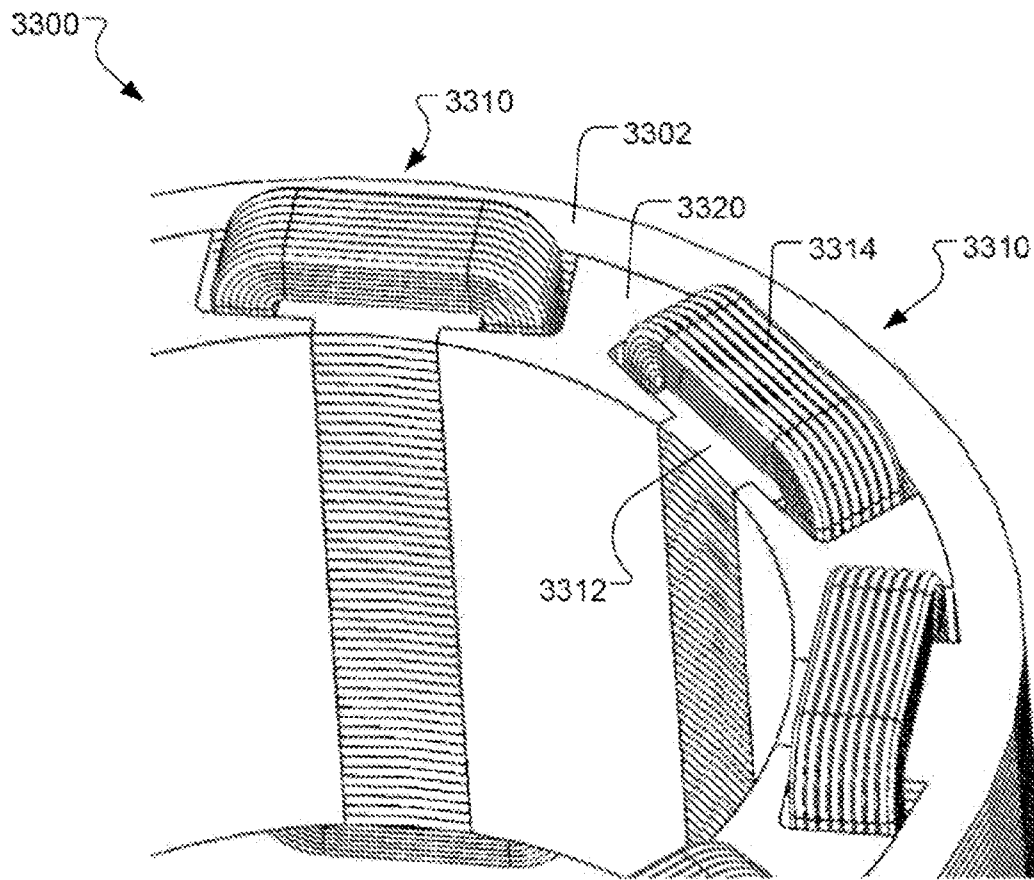


FIG. 33

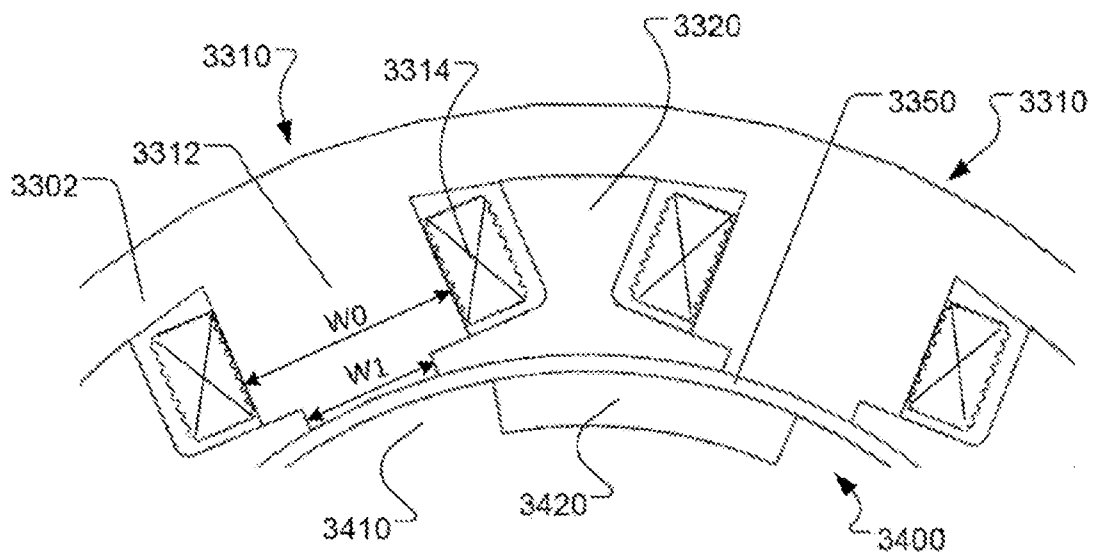


FIG. 34

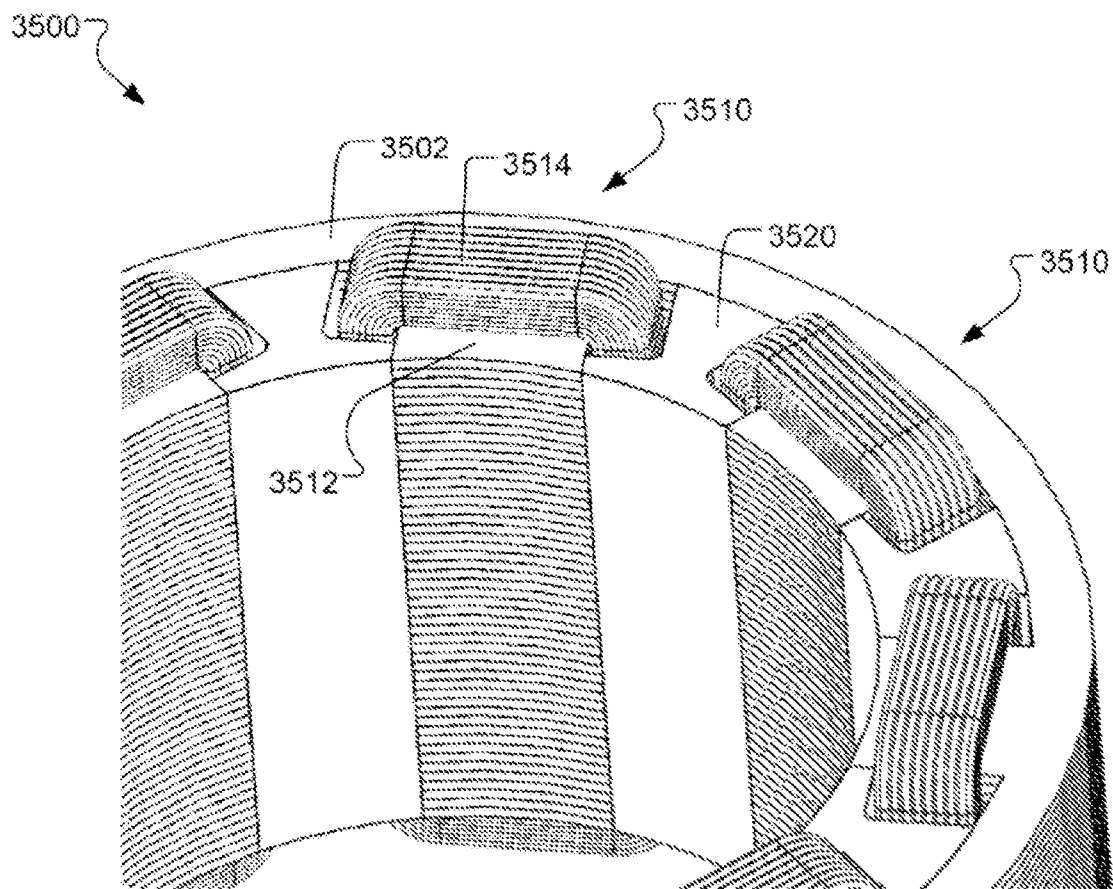


FIG. 35

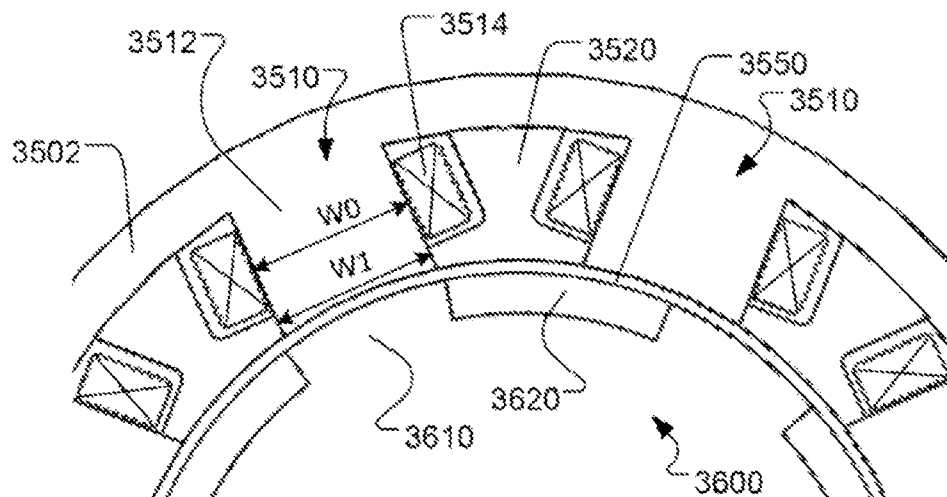


FIG. 36

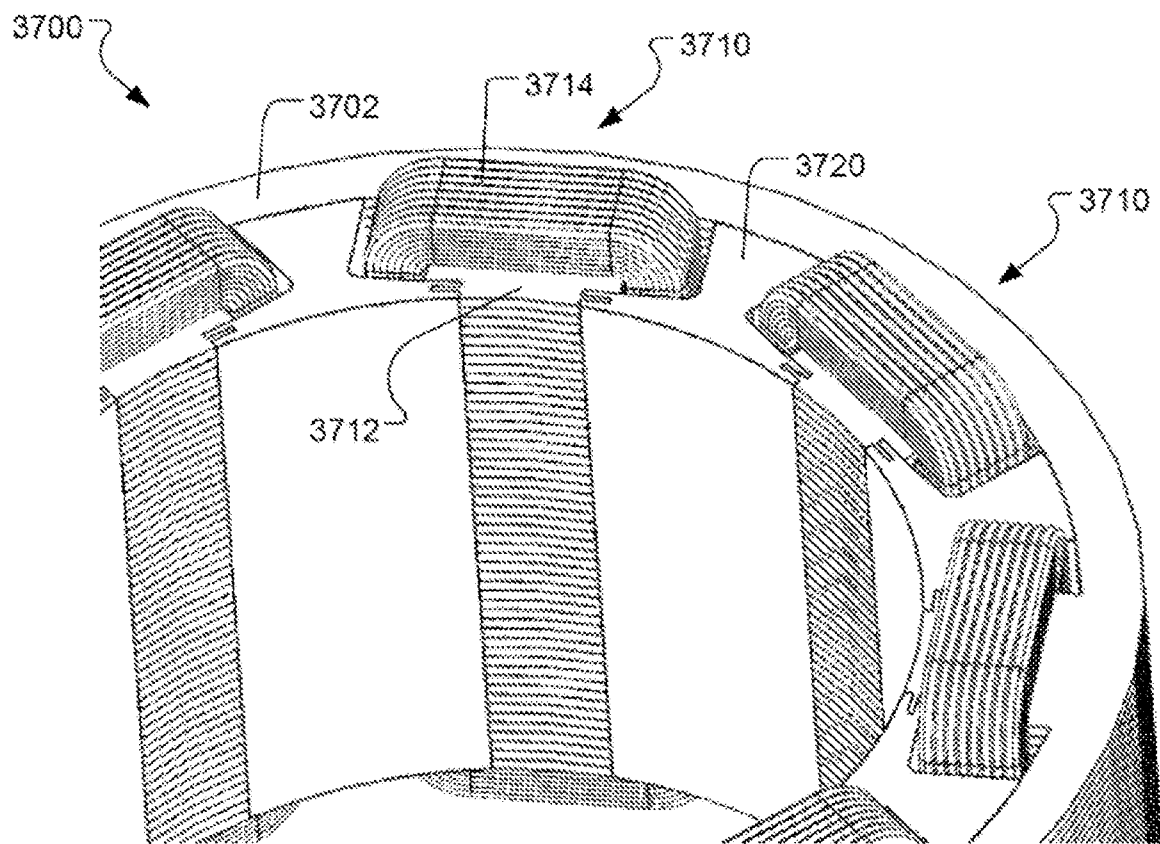


FIG. 37

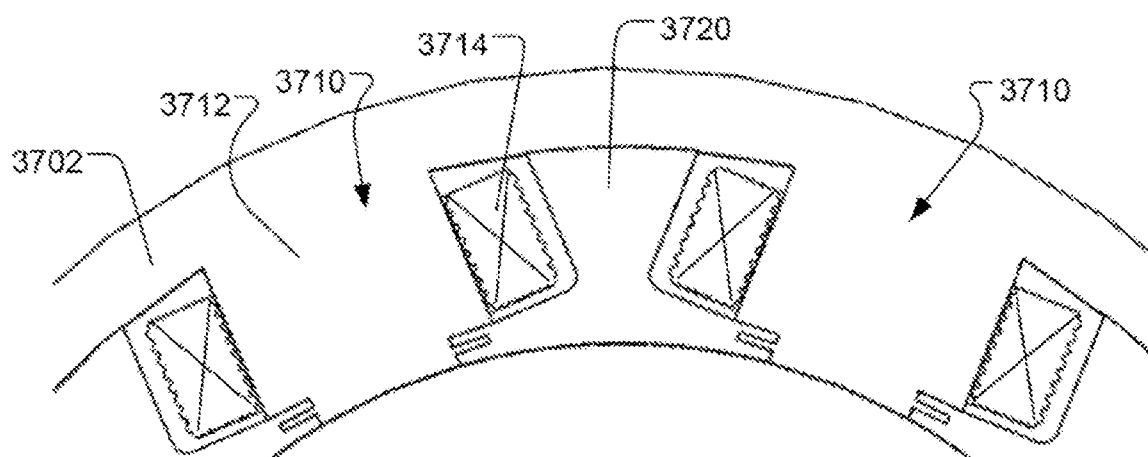


FIG. 38

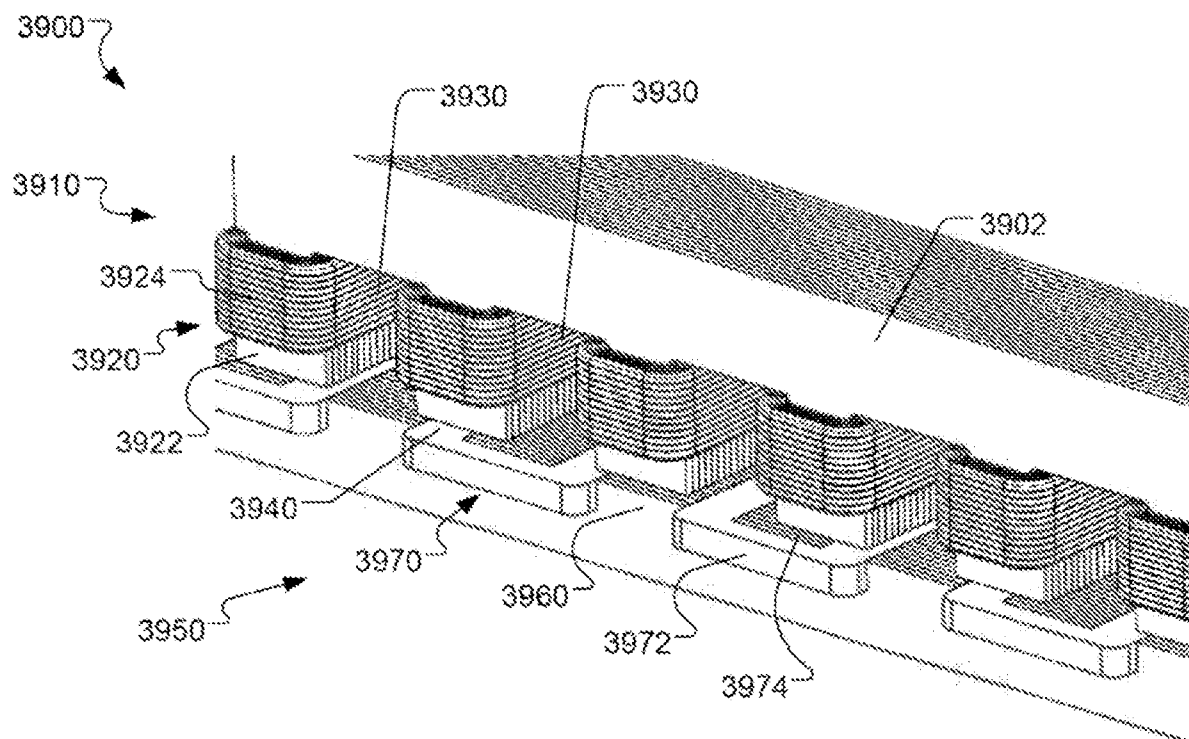


FIG. 39

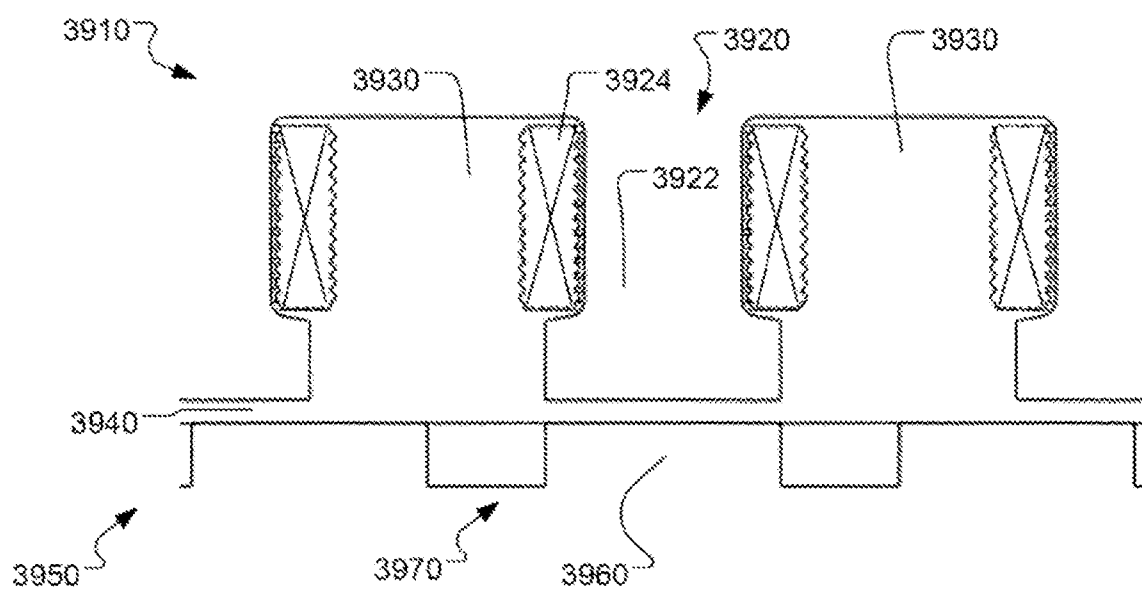


FIG. 40

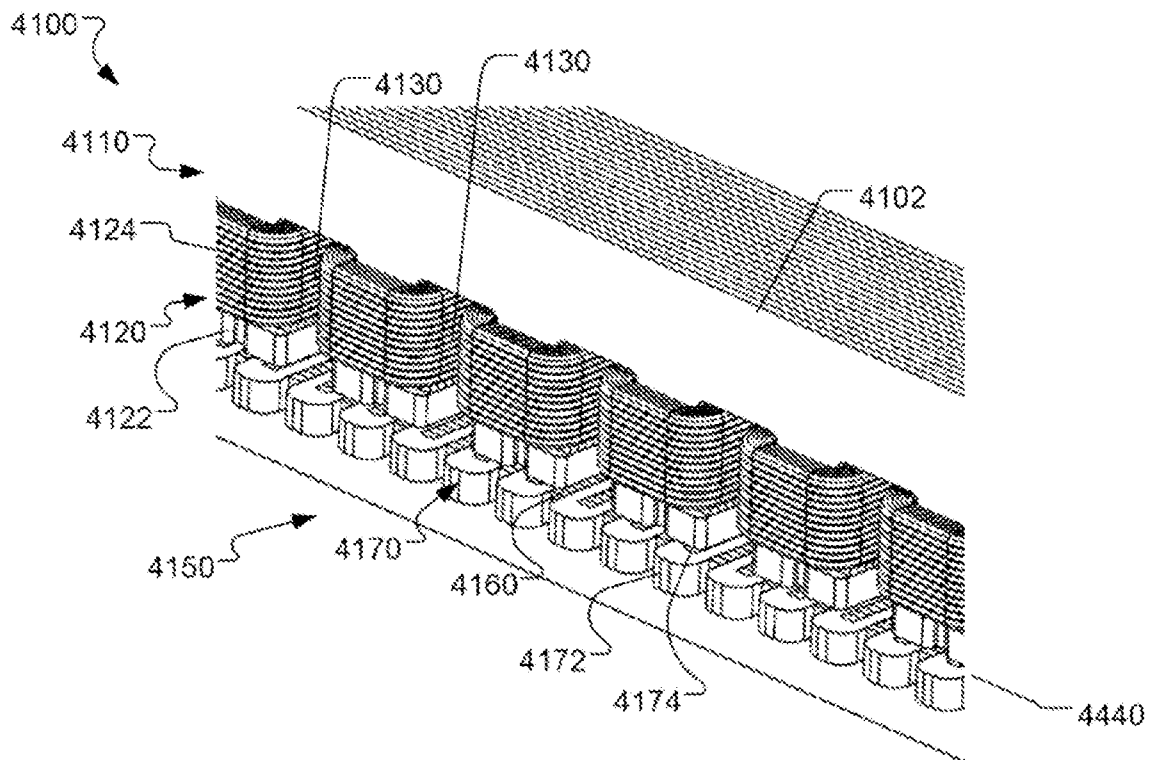


FIG. 41

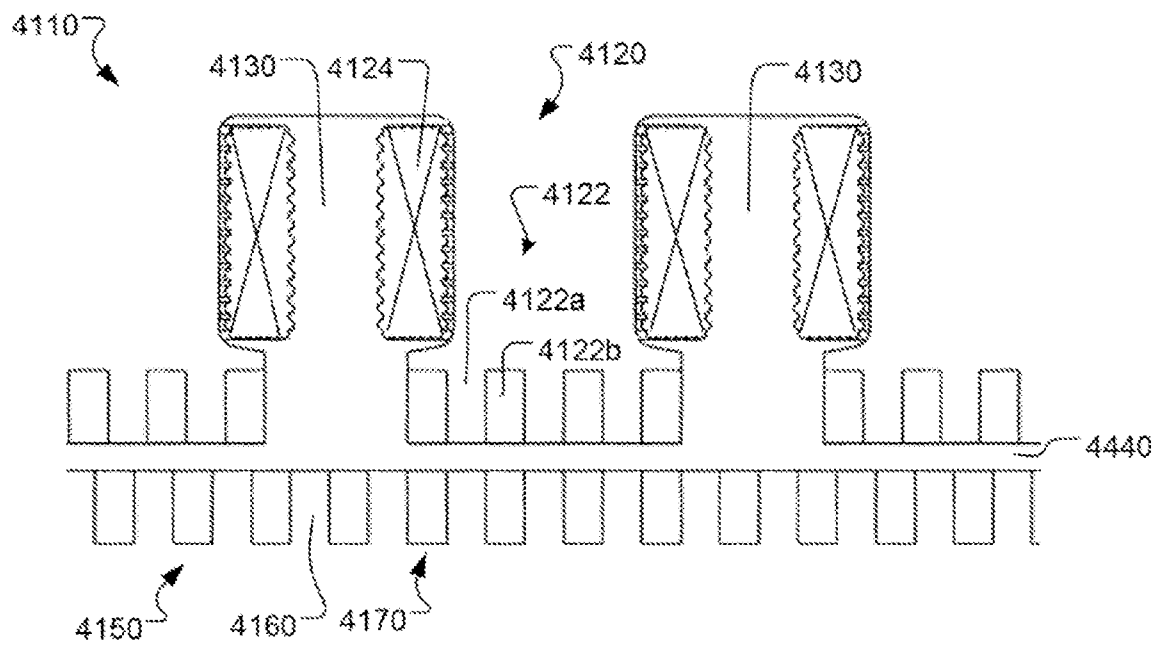


FIG. 42