

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 934 708**

51 Int. Cl.:

H02P 9/30 (2006.01)

H02P 25/03 (2006.01)

H01F 38/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2015 PCT/US2015/029729**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.11.2015 WO15175316**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2015 E 15792915 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.11.2022 EP 3123488**

54 Título: **Máquina síncrona de campo enrollado con excitador de campo resonante**

30 Prioridad:

13.05.2014 US 201414276859

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

24.02.2023

73 Titular/es:

**GBOX LLC (100.0%)
1615 Aquila Avenue North
Golden Valley, Minnesota 55427, US**

72 Inventor/es:

BOX, GARY

74 Agente/Representante:

SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio

ES 2 934 708 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

Máquina síncrona de campo enrollado con excitador de campo resonante

5 Campo de la invención

Esta invención se refiere a máquinas síncronas de campo enrollado y a métodos para funcionarlas de manera eficiente.

10 Antecedentes de la invención

Los motores y generadores eléctricos son máquinas que existen desde hace mucho tiempo. En la actualidad, las máquinas eléctricas grandes de alta eficiencia, es decir, aquellas con una clasificación de más de 10 caballos de fuerza (HP) y, a menudo, más de 100 hp, utilizan dispositivos síncronos de campo enrollado con mecanismos de control costosos y máquinas pequeñas, es decir, aquellas con una clasificación de 10 HP o menos, utilizan dispositivos magnéticos de rotor de tierras raras o dispositivos de campo de rotor de inducción. Se espera que los dispositivos magnéticos de rotor de tierras raras aumenten de precio en los próximos años y los dispositivos de campo de rotor de inducción son ineficientes desde el punto de vista energético.

Los aumentos proyectados en el costo de la energía, tanto desde el punto de vista económico como ambiental, han llevado a la necesidad de motores y generadores que sean tanto de bajo costo como energéticamente eficientes.

Se proporcionan ejemplos de generadores conocidos en la técnica en los documentos CN103560632A y US6570370B2, por ejemplo. Otro ejemplo se proporciona en el documento XP055420349, RENEWABLE ENERGY AND POWER QUALITY JOURNAL, DO-HYUN KANG ET AL, "Contactless Excitation System for Synchronous Generators".

Resumen de la invención

Esta invención aborda esa necesidad con un dispositivo que permite que un generador o motor síncrono de campo enrollado eficiente opere en aplicaciones con menor costo o mayor eficiencia energética que los motores de imán permanente o de inducción que se usan actualmente en esas aplicaciones. Como tal, de acuerdo con la reivindicación 1 de la invención, se proporciona un aparato que comprende, al menos, un generador de tensión de CA de onda cuadrada que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento; al menos un excitador de campo resonante en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada, el excitador de campo resonante tiene un marco de referencia rotativo, un marco de referencia estático y un circuito resonante que comprende en serie un condensador resonante y un transformador rotativo con una inductancia de fuga variable que comprende un núcleo magnético con un devanado del primario montado en el marco de referencia estático del marco del motor separado por un espacio de un segundo núcleo magnético con un devanado del secundario, y el excitador de campo resonante está configurado para funcionar en un modo resonante a una frecuencia resonante de al menos 50 kHz; un dispositivo controlador en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada y el excitador de campo resonante y configurado para medir la tensión y la corriente en el excitador de campo resonante, rastrear la frecuencia de resonancia y ajustar la frecuencia de accionamiento para que coincida sustancialmente con la frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de corriente CA; y un rectificador en comunicación con el excitador de campo resonante y configurado para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor de una máquina síncrona de campo enrollado.

La invención permite fabricar y utilizar una máquina síncrona de campo enrollado, como un motor o un generador, en situaciones de velocidad variable que antes no eran posibles, que es más eficiente que las máquinas de inducción y no tiene costosos imanes de rotor de tierras raras presentes en las máquinas de imanes permanentes. Los aspectos pueden usarse como motores o generadores, dispositivos que comprenden devanados de rotor que son adecuados para una fácil inserción o adaptación en máquinas de inducción o imanes permanentes existentes o como dispositivos adecuados para usar en la construcción de nuevas máquinas síncronas de campo enrollado. Estos se pueden usar en máquinas que van desde máquinas de gran potencia, como automóviles, hasta máquinas de pequeña potencia, como cortadoras de césped, bombas y compresores. Las máquinas de la invención y los dispositivos de la invención usados en máquinas ofrecen al menos cinco mejoras sobre la tecnología de máquinas actual. En primer lugar, estos amplían los límites de potencia prácticos y económicos de los motores y generadores de campo enrollado síncrono hasta aplicaciones de potencia fraccionaria, eliminando los imanes permanentes que ahora se utilizan en motores de alta eficiencia en ese rango de potencia. En segundo lugar, estos permiten que los motores síncronos de campo enrollado de alta eficiencia reemplacen a los motores de inducción de baja eficiencia en un rango de potencia más amplio, lo que ayuda a lograr los objetivos nacionales de eficiencia energética. En tercer lugar, estos reducen el tamaño y el peso total de los motores síncronos de campo enrollado en todos los niveles de potencia. En cuarto lugar, estos brindan funciones tales como debilitamiento de campo, control de campo directo y monitoreo que actualmente no están disponibles en la tecnología de motores y generadores de imanes permanentes. En quinto lugar, estos proporcionan casi la misma alta eficiencia que los motores síncronos de imanes permanentes sin el uso de imanes permanentes.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención conectado a una máquina síncrona de campo enrollado.

La figura 2A es un esquema de una realización del excitador de campo resonante que muestra el condensador en el marco de referencia rotativo.

La figura 2B es un esquema de una realización del excitador de campo resonante que muestra el condensador en el marco de referencia estacionario.

La figura 3A es una vista lateral de una ilustración de una realización de un excitador de campo resonante que utiliza un transformador rotativo axial de núcleo en forma de olla.

La figura 3B es una vista posterior de la realización de la figura 3A.

La figura 4A es una vista lateral de una ilustración de una realización de un excitador de campo resonante que utiliza un transformador rotativo radial.

La figura 4B es una vista posterior de la realización de la figura 4A.

La figura 5A es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención conectados a un rotor síncrono de campo enrollado.

La figura 5B es un diagrama de bloques de un sistema de movimiento eléctrico universal conectado al dispositivo de la invención que se muestra en la figura 5.

La figura 6 es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención susceptibles de ser conectados a un rotor síncrono de campo enrollado.

Si bien la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, los detalles se han mostrado a modo de ejemplo en los dibujos y se describirán en detalle a continuación. Debe entenderse, sin embargo, que la intención no es limitar la invención a las realizaciones particulares descritas. Por el contrario, la invención pretende cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que caen dentro del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

Descripción detallada de algunas realizaciones de la invención

La invención es una combinación única de tecnología de motor conocida, tecnología de fuente de alimentación y tecnología digital y de software para dar como resultado un nuevo motor síncrono de campo enrollado o máquinas generadoras síncronas de campo enrollado. Estas máquinas y dispositivos solían hacer que las máquinas funcionaran o fueran capaces de funcionar a niveles de potencia superiores a 10 HP con controles menos costosos que las máquinas síncronas de campo enrollado actuales y a velocidades variables. Estas máquinas y dispositivos utilizados para hacer que las máquinas también funcionen o puedan funcionar a niveles de potencia del orden de 10 HP o menos sin imanes de rotor de tierras raras. Estas máquinas y dispositivos utilizados para fabricar estas máquinas reemplazan los motores y generadores de inducción de baja eficiencia energética utilizados en todos los niveles de potencia. La eficiencia de las máquinas de la invención y las máquinas fabricadas con dispositivos de la invención es de al menos el 95 por ciento en comparación con eficiencias de menos del 70 por ciento para las máquinas de inducción.

La máquina síncrona de campo enrollado de la invención y el dispositivo de la invención utilizados para fabricar una máquina síncrona de campo enrollado representan la convergencia de 150 años de tecnología de motores, 50 años de tecnología de suministro de energía y 30 años de ingeniería de software para hacer una máquina novedosa, no obvia y un nuevo aparato beneficioso. Cada una de estas áreas se discutirá ahora para proporcionar contexto a la invención.

Tecnología de motores

En un estudio de 2006, el IEEE informó que los motores consumían el 60 % de la energía eléctrica en los Estados Unidos y que la gran mayoría de esos motores eran motores de inducción que funcionaban con una eficiencia del 70 % o menos. En 2008 se aprobó una legislación, que entró en vigor en 2010, que elevó legalmente el nivel de eficiencia de los motores, haciendo que los motores de inducción más ineficientes y menos costosos fueran ilegales. Esta fue la misma legislación que causó un poco de revuelo en la prensa sobre el aumento de los estándares de eficiencia para la iluminación. Antes de esta legislación, los motores con el precio de adquisición más bajo y baja eficiencia eran los más atractivos. Después de la legislación, se prestó mucha más atención al costo total de propiedad de un motor. Para un motor que funciona las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los costos de energía durante la vida útil del motor podrían ser de 10 a 20 veces el costo inicial del motor.

En la industria del motor, los motores con diferentes eficiencias se clasifican de manera diferente. La clase más eficiente, súper premium, está dominada por motores que contienen imanes permanentes. En parte debido a la legislación de eficiencia en todo el mundo y en parte debido a la expansión de los mercados para estos motores, se espera que el mercado de esta clase de motor se multiplique por 9 entre 2011 y 2017.

Esto ha causado una serie de dificultades en el proceso de crecimiento. La más visible, aunque no la más grave, es el acaparamiento intencionado del mercado de materiales de tierras raras por parte de China. Al reducir el costo de

los minerales en bruto, China cerró efectivamente todas las operaciones mineras competidoras. Luego, aumentaron el precio o limitaron la disponibilidad del mineral en bruto e hicieron que el costo del producto procesado (imanes, etc.) fuera más competitivo, elevando efectivamente a sus clientes en la cadena alimentaria. Esto, sin embargo, es una distracción temporal. Contrariamente a su nombre de "tierras raras", los elementos de tierras raras no son tan raros. Existen depósitos sustanciales en todos los continentes, excepto en Europa occidental, donde los elementos se aislaron originalmente (de ahí la denotación "raro").

Un problema más serio es que el procesamiento de elementos de tierras raras en imanes es un proceso tóxico e intrincado y el mundo simplemente no puede soportar un aumento rápido de la producción de imanes de tierras raras. A largo plazo, esto establecerá una prima sostenida para los imanes de tierras raras, lo que hará que los generadores y motores de imanes permanentes sean inherentemente más caros que sus primos sin imanes.

Los motores de inducción de mayor eficiencia se han dado a conocer en los últimos años. Estos motores han logrado eficiencias de hasta un 81 % frente al 70 % de los motores de inducción normales. Se utiliza cobre en los rotores en lugar de aluminio y el tamaño de los rotores se incrementa en los motores para reducir la pérdida por corrientes de Foucault al reducir la densidad de flexión. Sin embargo, esto da como resultado estructuras más pesadas que las de los motores de inducción de eficiencia normal de la misma potencia nominal y costos que se acercan a los de los motores de imanes permanentes de potencia nominal similar.

Pero hay otras formas de hacer un motor eléctrico. El motor de reluctancia conmutada se remonta a 1830. El motor de CC bobinado en serie también existe desde la década de 1830. El motor de inducción existe desde 1885. El generador síncrono de campo enrollado, conocido originalmente como dinamo, existe desde la década de 1870. Su primo, el motor síncrono de campo enrollado, existe desde hace casi el mismo tiempo. Todos estos tipos de motores se basan en una o más estructuras electromagnéticas básicas en las que la corriente produce el campo magnético en el rotor del motor. Solo el motor de imanes permanentes no requiere energía para mantener el campo magnético en el rotor; sin embargo, esto tiene un costo más allá del propio imán.

En cualquier motor de imanes permanentes, la intensidad de campo del propio imán del rotor es fija. Esto es tanto una ventaja como una desventaja. Para aplicaciones que requieren un torque sustancial a velocidad cero, la presencia del campo magnético en el rotor hace que cumplir con este requisito sea fácil y eficiente. Sin embargo, el campo magnético fijo en el rotor significa que la velocidad de rotación está limitada por la tensión de la fuente a altas velocidades. Además, para aplicaciones en las que la velocidad del motor debe ser variable, debe controlarse toda la potencia del motor, con las consiguientes pérdidas asociadas con dicho control.

En todas las estructuras de motores sin imanes, la intensidad de campo del campo del rotor es ajustable, lo que permite optimizar el funcionamiento del motor. En el motor de CC enrollado en serie, esto implica el paso de corriente a través de un anillo deslizante mecánico, con implicaciones mecánicas y de mantenimiento adversas. En el motor de reluctancia conmutada, el campo magnético en el rotor cambia constantemente, dando lugar a pérdidas por corrientes de Foucault, pérdidas de hierro y una fuerza radial sustancial, lo que provoca ruido. Del mismo modo, el motor de inducción depende de que el rotor rote un poco más lento que el campo del estator, lo que también induce un campo magnético cambiante en el rotor y provoca corrientes de Foucault y pérdidas de hierro. El motor síncrono de campo enrollado no exhibe un campo magnético cambiante en el rotor, por lo que no hay corrientes de Foucault ni pérdidas de hierro. Además, el motor síncrono de campo enrollado de la invención sin ningún imán se acerca al rendimiento de eficiencia del motor de imanes permanentes.

Los motores síncronos de campo enrollado están actualmente limitados a niveles de potencia de 10 HP y superiores, se accionan principalmente a velocidades síncronas con la red eléctrica de suministro y se utilizan en aplicaciones estacionarias y en grandes aplicaciones de generadores estacionarios y portátiles. Esto se debe a que se debe proporcionar energía al rotor en movimiento para excitar el campo. Las técnicas utilizadas actualmente para hacer esto involucran anillos deslizantes, técnicas de inducción de baja frecuencia o de inducción de frecuencia fija, todas las cuales involucran problemas de mantenimiento, tamaño sustancial o restricciones de precisión mecánica, y solo son económicamente justificables en niveles de salida de eje más altos.

La aparición de aplicaciones de tracción eléctrica en automóviles y aplicaciones industriales ha llevado al desarrollo de máquinas generadoras/motores de inducción e imanes permanentes de alta potencia. En el caso del motor/generador de imanes permanentes, existen posibles condiciones de falla donde el rotor magnético puede continuar rotando accionado por energía mecánica externa. Esto genera condiciones peligrosas. En el caso del motor/generador de tracción de inducción, el funcionamiento de torque alto a baja velocidad es particularmente ineficiente debido a las altas pérdidas por corrientes de Foucault y de hierro de CA en el rotor. Los motores síncronos de campo enrollado no se utilizan actualmente en estas aplicaciones debido a las limitaciones actuales para proporcionar energía al devanado del rotor mencionado anteriormente.

Un método para proporcionar económicamente potencia de campo al rotor de una máquina síncrona de campo enrollado en general permitiría motores y generadores más pequeños y rentables de esta clase para todas las aplicaciones. Además, un método para proporcionar económicamente potencia de campo al rotor de un motor síncrono de campo enrollado a niveles de potencia de 10 HP o menos permitiría que este tipo de motor compita con

los motores de imanes permanentes. Las trayectorias de costos de los motores de imanes permanentes y los motores de inducción de mayor eficiencia están aumentando, mientras que la trayectoria de costos del motor síncrono de campo enrollado está disminuyendo.

5 Tecnología de suministro de energía

10 Durante los últimos 50 años, la tecnología de suministro de energía se ha concentrado en convertir la energía de la red convencional, la energía de la batería o la energía del generador en tensiones bajas aisladas para hacer funcionar los circuitos de estado sólido. Los niveles de potencia oscilaban entre milivatios y kilovatios y los objetivos de desarrollo eran de bajo costo, menor tamaño y alta eficiencia.

15 Todas las fuentes de alimentación aisladas dependen de un transformador para transferir energía electromagnéticamente desde la fuente de alimentación a la carga aislada. El tamaño de un transformador aumenta con el nivel de potencia y disminuye a medida que aumenta la frecuencia de funcionamiento. Más de cinco décadas de un flujo constante de investigación, mejoras en los materiales y mejores técnicas de producción han conducido al diseño de transformadores de potencia a frecuencias operativas superiores a 1 MHz y densidades de potencia superiores a 100 vatios/pulgada cúbica.

20 A medida que mejoró la tecnología de transformadores, los otros componentes de manejo de energía; transistores, diodos y componentes pasivos, también mejoraron en términos de pérdida, tamaño, velocidad y costo para mantener el ritmo.

25 Las topologías de circuitos también evolucionaron, con conceptos como la conversión resonante que eliminó más factores de pérdida simplemente evitando las condiciones operativas que los producen.

35 Tecnología Digital y de Software

30 La tecnología digital y de software llegó relativamente tarde al control de potencia, surgiendo a principios de la década de 1980 para proporcionar un rendimiento mejorado a aplicaciones de alta precisión, pero de baja potencia como los servos. A fines de la década de 1980, la potencia controlada digitalmente se aplicaba a todas las tecnologías de motores. Hoy en día, técnicas como el control de vector de campo proporcionan un alto grado de control de velocidad y par en todos los rangos de potencia, pero con la ineficiencia de tener que controlar estrictamente todo el flujo de potencia al motor.

35 La invención

40 Como se indicó anteriormente, existe una gran necesidad de reducir el consumo de energía eléctrica en los Estados Unidos. Al menos el 60 % de la energía eléctrica en los Estados Unidos es consumida por motores. En este momento hay un esfuerzo concertado para aumentar la eficiencia de estos motores, agregando transmisiones electrónicas, realizando costosas mejoras en los motores de inducción o cambiando a motores de imanes permanentes. Con una tendencia en la industria de los vehículos que pasa de los motores alimentados por gas a los motores eléctricos, existe la necesidad de motores eléctricos que sean menos costosos que los motores de imanes permanentes y tengan una mayor eficiencia energética que los motores de inducción. Estas características se pueden encontrar en los motores síncronos de campo enrollado de la invención. Además, con los numerosos
45 motores que funcionan a niveles de potencia de 10 HP e inferiores, es necesario alejarse de los motores de inducción relativamente ineficientes o de los costosos motores magnéticos.

50 La invención comprende tres aspectos, una máquina, un dispositivo que comprende un devanado de rotor que puede insertarse fácilmente en una máquina, y un dispositivo que puede unirse a un devanado de rotor.

Primer aspecto

55 El primer aspecto es un aparato que comprende cinco elementos. El primer elemento es una máquina síncrona de campo enrollado que tiene un devanado de rotor y no tiene imanes de rotor para la producción de torque. En algunas realizaciones, la máquina síncrona de campo enrollado comprende una máquina del grupo que consta de un motor, un generador de CA y un generador de corriente continua (CC). En algunas realizaciones, la máquina síncrona de campo enrollado está configurada para funcionar a una potencia nominal de 10 HP o menos. En algunas realizaciones, la máquina síncrona de campo enrollado está configurada para funcionar a una potencia nominal superior a 10 HP, algunas a niveles de potencia superiores a 50 HP, algunas a niveles de potencia superiores a 100 HP. Y algunas a niveles de potencia superiores a los 150 CV. En algunas realizaciones, la máquina síncrona de campo enrollado funciona en una aplicación de velocidad variable fuera de línea, tal como un motor de tracción. En algunas realizaciones, la máquina síncrona de campo enrollado funciona como una aplicación en línea o fuera de línea, tal como una bomba o un compresor.

65 El segundo elemento es al menos un generador de tensión de CA de onda cuadrada que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento. Es posible que el generador proporcione otras formas de tensión, tal como una

sinusoide o un triángulo, pero la onda cuadrada es la más simple y eficiente de producir para el transporte de energía.

El tercer elemento es al menos un excitador de campo resonante en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada. El excitador de campo resonante tiene (1) un marco de referencia rotativo, (2) un marco de referencia estático y (3) un circuito resonante que comprende en serie un condensador resonante y un transformador rotativo con una inductancia de fuga variable. El excitador de campo resonante está configurado para funcionar en un modo resonante a una frecuencia resonante de al menos 50 kHz. En algunas realizaciones, el aparato incluye solo un generador de tensión de CA de onda cuadrada y un excitador de campo resonante. En algunas realizaciones, los componentes rotativos del excitador de campo resonante pueden montarse en un conjunto de cableado impreso redondo (PWA). Para esas realizaciones, se debe tener cuidado para asegurar que este conjunto esté equilibrado ya que rota con el eje del motor/generador. En algunas realizaciones, el excitador de campo resonante incluirá un transformador rotativo, cuya inductancia de fuga, junto con un condensador, forma un circuito resonante.

El cuarto elemento es un dispositivo controlador en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada y el excitador de campo resonante. El dispositivo controlador está configurado para (1) medir la tensión y la corriente en el excitador de campo resonante, (2) rastrear la frecuencia de resonancia y (3) ajustar la frecuencia de accionamiento para que coincida sustancialmente con la frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de corriente CA. El dispositivo controlador es cualquiera que esté configurado para funcionar como se indica. Esto incluye, por ejemplo, un microcontrolador, un circuito integrado de aplicación específica y un dispositivo lógico programable. En la realización con un microcontrolador y un transformador rotativo, este monitorea la tensión y la corriente al primario del transformador rotativo y genera una señal de onda cuadrada de frecuencia variable en o cerca de la resonancia que se pasa a un controlador de potencia para accionar el primario del transformador rotativo.

El quinto elemento es un rectificador en comunicación con el excitador de campo resonante y la máquina síncrona de campo enrollado y se configura para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor de la máquina síncrona de campo enrollado.

La eficiencia del aparato de la invención es mayor que la de las máquinas de inducción configuradas para funcionar a niveles de potencia similares. Algunas realizaciones están configuradas para tener una eficiencia energética cercana a la de los motores de imanes premium configurados para funcionar a niveles de potencia similares. Algunas realizaciones de la invención están configuradas para tener una eficacia de al menos el 90 %, algunas de al menos el 92 %, algunas de al menos el 94 % y algunas de al menos el 95 %.

En algunas realizaciones de la invención, el excitador de campo resonante tiene características adicionales. El transformador rotativo tiene un primario estacionario y un secundario rotativo configurados para formar un espacio que produce la inductancia de fuga variable. El condensador resonante está en comunicación con el transformador rotativo y configurado para resonar con la inductancia de fuga variable a una frecuencia superior a 50 kHz. El dispositivo controlador en estas realizaciones se configura además para generar una señal de tensión de CA de onda cuadrada de frecuencia variable para accionar el primario del transformador rotativo.

En la realización anterior se mantiene la siguiente configuración. El primario del transformador rotativo está unido al marco de referencia estacionario de la máquina. El secundario del transformador rotativo está unido al marco de referencia rotativo de tal manera que la trayectoria del flujo alrededor del núcleo del transformador no cambia a medida que se mueve el marco de referencia rotativo. El espacio entre el primario y el secundario del transformador rotativo permite la rotación independiente del secundario, contribuye a determinar la inductancia de fuga del transformador rotativo y transfiere energía magnéticamente desde el marco estacionario al marco rotativo. El condensador resonante está conectado en serie con el devanado del primario o secundario del transformador rotativo. Por lo tanto, el circuito resonante puede estar en el marco de referencia rotativo o en el marco de referencia estático. El valor de este condensador se selecciona para resonar con la inductancia de fuga del transformador rotativo a una frecuencia superior a 50 kHz. En el lado del secundario, uno o más diodos están conectados en una configuración de rectificación, cuya salida está conectada al devanado del campo del rotor. En algunas realizaciones, un segundo condensador está conectado en paralelo con el devanado de campo para formar un filtro paso bajo.

Tanto en los motores síncronos de imán permanente como en los motores síncronos de campo enrollado, el campo magnético rotativo en el rotor produce una tensión de fuerza contraelectromotriz (EMF) que se opone a la fuente y que es proporcional al producto de la intensidad del campo magnético y la velocidad del rotor. En los motores síncronos de imanes permanentes, esto no solo limita la velocidad máxima del motor en una fuente dada, sino que también requiere que la potencia al estator del motor esté constantemente bajo control. Esto se logra mediante la modulación por ancho de pulso de la tensión en los devanados del estator del motor a frecuencias de hasta 20 kHz o más, lo que genera pérdidas adicionales en los componentes electrónicos de transmisión, problemas significativos de interferencia electromagnética (EMI) y efectos electrostáticos, como agujeros en los cojinetes.

En una realización del primer aspecto de la invención, el campo del rotor y, por lo tanto, la tensión EMF inversa se

pueden ajustar para que coincidan casi con la tensión de la fuente para eliminar la necesidad de modular el devanado del estator. Los devanados del estator se pueden cambiar o conmutar a una frecuencia igual al número de polos multiplicado por la velocidad del motor hasta una frecuencia de varios cientos de Hz. Esto elimina las pérdidas de conmutación moduladas por ancho de pulso (PWM) y reduce la huella EMI y los efectos electrostáticos en varios órdenes de magnitud.

Segundo aspecto

El segundo aspecto es un aparato que también comprende cinco elementos. El primer elemento es un devanado de rotor para una máquina síncrona de campo enrollado. El segundo elemento es al menos un generador de tensión de CA de onda cuadrada que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento. El tercer elemento es al menos un excitador de campo resonante en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada, el excitador de campo resonante (1) tiene un marco de referencia rotativo, (2) un marco de referencia estático y (3) un circuito resonante que comprende en serie un condensador resonante y un transformador rotativo con una inductancia de fuga variable. El excitador de campo resonante está configurado para funcionar en un modo resonante a una frecuencia resonante de al menos 50 kHz. El cuarto elemento es un dispositivo controlador en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada y el excitador de campo resonante y se configura para (1) medir la tensión y la corriente en el excitador de campo resonante, (2) rastrear la frecuencia de resonancia y (3) ajustar la frecuencia de accionamiento para que coincida sustancialmente con la frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de corriente CA. El quinto elemento es un rectificador en comunicación con el excitador de campo resonante y el devanado del rotor para una máquina síncrona de campo enrollado y configurado para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor cuando se fija a una máquina síncrona de campo enrollado. En algunas realizaciones, el devanado del rotor se puede utilizar de forma adaptada en lugar del rotor de imanes permanentes de una máquina síncrona de imanes permanentes o la jaula de ardilla de una máquina de inducción. Algunas realizaciones de este aspecto son adecuadas para adaptarlas a máquinas síncronas de campo enrollado existentes. Los elementos de este aspecto son similares a los discutidos anteriormente.

Tercer aspecto

El tercer aspecto es un aparato que comprende cuatro elementos. El primer elemento es al menos un generador de tensión de CA de onda cuadrada que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento. El segundo elemento es al menos un excitador de campo resonante en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada, el excitador de campo resonante (1) tiene un marco de referencia rotativo, (2) un marco de referencia estático y (3) un circuito resonante que comprende en serie un condensador resonante y un transformador rotativo con una inductancia de fuga variable. El excitador de campo resonante está configurado para funcionar en un modo resonante a una frecuencia resonante de al menos 50 kHz. El tercer elemento es un dispositivo controlador en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada y el excitador de campo resonante y configurado para (1) medir la tensión y la corriente en el excitador de campo resonante, (2) rastrear la frecuencia de resonancia y (3) ajustar la frecuencia de accionamiento para que coincida sustancialmente con la frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de corriente CA. El cuarto elemento es un rectificador en comunicación con el excitador de campo resonante y configurado para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor de una máquina síncrona de campo enrollado. Esto reemplaza las técnicas actuales como, por ejemplo, la sustitución de anillos rozantes y dispositivos de inducción de frecuencia baja o fija actualmente en uso. Algunas realizaciones del tercer aspecto son adecuadas para instalar en una máquina síncrona de campo enrollado durante la fabricación. Los elementos de este aspecto son similares a los discutidos anteriormente.

En cada uno de los tres aspectos, la potencia de la invención se puede regular o ajustar por diversos medios conocidos en la técnica, tal como un convertidor reductor, un convertidor de medio puente o un convertidor de puente completo, dependiendo del nivel de potencia. Otras técnicas conocidas de prácticamente cualquier tecnología de fuente de alimentación también pueden regular y ajustar la potencia al rotor de un motor síncrono de campo enrollado.

Uno de tales ejemplos es con un sistema de movimiento universal que utiliza un convertidor reductor para proporcionar una tensión de forma sinusoidal rectificadora sincronizada con una línea de alimentación de CA para modular la amplitud del generador de ondas cuadradas de alta frecuencia de la invención. Esto produce un campo magnético en forma de senoide rectificado y sincronizado con la línea de alimentación de CA en el rotor del motor síncrono de campo enrollado. El estator del motor síncrono de campo enrollado está conectado a través de un conmutador electrónico trifásico y un puente rectificador a la línea de alimentación de CA. La tensión al conmutador electrónico también es una onda sinusoidal rectificadora sincronizada con la línea de alimentación porque no hay un condensador de filtro después del puente rectificador. Dependiendo de la posición angular del rotor, el conmutador electrónico conecta los devanados del estator apropiados a esta tensión de onda sinusoidal rectificadora para producir un torque en la dirección deseada. Dado que los campos del rotor y del estator tienen la misma forma y están sincronizados, la corriente de la línea de alimentación de este aparato estaría en fase con la tensión de la línea de alimentación, funcionando con un factor de potencia unitario. Otras técnicas conocidas de prácticamente cualquier tecnología de suministro de energía también pueden regular y ajustar la tensión al rotor.

Una realización de esta invención ofrece un reemplazo directo para un tipo existente de motor universal que se está descontinuando. Los motores universales actuales utilizan escobillas. El extremo superior de la potencia operativa para este tipo de motor es de aproximadamente 1 kW. A ese nivel, la eficiencia energética es del orden del 40 % y la fiabilidad es baja. Cada vez más fabricantes están descontinuando el motor de escobillas universal de 1 kW a favor de motores sin escobillas de imanes permanentes. La combinación discutida anteriormente permite que un motor de escobillas universal de 1 kW actual se reemplace directamente con la invención que se combina con un sistema de movimiento universal para formar un motor universal sin escobillas que es competitivo en costos, confiable y altamente eficiente. La electrónica de control simple y la falta de imanes de tierras raras hacen que este motor sea más competitivo en costos con respecto a los motores de escobillas descontinuados que la alternativa del uso de motores sin escobillas de imanes permanentes. La incorporación de esta invención da como resultado un motor universal con eficiencias de potencia superiores al 90 %.

La misma realización de la invención también ofrece un reemplazo para motores de inducción monofásicos de baja eficiencia. Los motores de inducción monofásicos de baja eficiencia también se están reemplazando por motores de inducción con transmisión electrónica o motores sin escobillas de imanes permanentes con transmisión electrónica. Sin embargo, dado que estas transmisiones deben usar técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) para controlar toda la potencia del motor, estos sufren de armónicos de línea de alimentación alta, interferencia electromagnética alta y factor de potencia bajo, todo lo cual debe mitigarse mediante la adición de filtros y circuitos de corrección del factor de potencia costosos y voluminosos. Como se ha descrito anteriormente, el motor universal sin escobillas que utiliza la invención presenta un factor de potencia unitario a la línea de alimentación directamente, eliminando la necesidad de circuitos de corrección del factor de potencia. Dado que solo el 3 % de la potencia del motor se somete a técnicas PWM, la huella electromagnética del motor universal sin escobillas es mucho menor, lo que reduce en gran medida o incluso elimina la necesidad de voluminosos filtros EMI.

Los diversos aspectos de la invención pueden entenderse mejor a través de varias figuras que ilustran algunas realizaciones de la invención. Los mismos números se utilizarán para designar los mismos elementos. La figura 1 es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención conectados a una máquina síncrona de campo enrollado. Un aparato (100) comprende un generador de tensión de CA de onda cuadrada (110) que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento. El generador de tensión de CA de onda cuadrada 110 está en comunicación con un excitador de campo resonante (120) que tiene un marco estacionario y un marco rotativo, y que está en comunicación con un rectificador (130). Un dispositivo controlador (140) está en comunicación tanto con el generador de CA de onda cuadrada 110 como con el excitador de campo resonante 120. El rectificador 130 también está en comunicación con una máquina síncrona de campo enrollado (150) que tiene un rotor de campo enrollado (154) y un estator (158). La comunicación con la máquina síncrona de campo enrollado 150 es con el rotor de campo enrollado 154.

La figura 2A es un esquema de una realización del excitador de campo resonante que muestra el condensador en el marco de referencia rotativo. El excitador de campo resonante 120 comprende un transformador rotativo con un primario estacionario (122), un secundario rotativo (124) y un espacio (126). El transformador rotativo presenta una inductancia de fuga variable (127) y está en serie con un condensador resonante (128).

La figura 2B es un esquema de una realización del excitador de campo resonante que muestra el condensador en el marco de referencia estacionario. El excitador de campo resonante 120 comprende un transformador rotativo con un primario estacionario 122, un secundario rotativo 124 y un espacio 126. El marco de referencia estático del excitador de campo resonante 120 también comprende un transformador rotativo con inductancia de fuga variable 127 en serie con un condensador resonante 128.

La figura 3A es una vista lateral de una ilustración de una realización de un excitador de campo resonante que utiliza una configuración de transformador rotativo axial de núcleo en forma de olla. Se muestra una realización de un dispositivo excitador de campo resonante (200) con un rotor de campo enrollado (210) con un eje de máquina síncrona de campo enrollado (220) que lo atraviesa. Un núcleo en forma de olla magnético para el secundario (230) con un devanado del secundario de transformador rotativo no visible, un núcleo en forma de olla magnético para el primario (240) con un devanado del primario del transformador rotativo no visible, y un PWA con rectificador y condensador resonante (250) están en comunicación física con la máquina síncrona de campo enrollado y en comunicación eléctrica con el rotor de campo enrollado 210. Todos los elementos rotan excepto el primario estacionario y el núcleo magnético asociado (240).

La figura 3B es una vista posterior de la realización de la figura 3A a lo largo de la línea 260 a través del secundario del transformador rotativo en el núcleo en forma de olla magnético para el secundario 230. Se ilustran el eje del rotor de campo enrollado 220 rodeado por el secundario del transformador rotativo en el núcleo en forma de olla 230. El núcleo en forma de olla magnético para el secundario 230 rodea un devanado del secundario (270). La sección transversal del primario del transformador rotativo exhibe la misma construcción.

La figura 4A es una vista lateral de una ilustración de una realización de un excitador de campo resonante que utiliza un transformador rotativo radial. Se muestra otra realización de un dispositivo excitador de campo resonante (300) con un rotor de campo enrollado (310) con un eje de máquina síncrona de campo enrollado (320) que lo atraviesa.

Un núcleo magnético para el secundario (330) con un secundario del transformador rotativo (370), un núcleo magnético para el primario (340) con un primario del transformador rotativo (380) y un PWA con rectificador y condensador resonante (350) están en comunicación física con el eje de máquina síncrona de campo enrollado 320 y en comunicación eléctrica con el rotor de campo enrollado 310. Un devanado del secundario (370) y un devanado del primario (380) se muestran alrededor del eje de la máquina síncrona de campo enrollado 320 y separados por un espacio (390). Todos los elementos excepto el primario del transformador rotativo 340 rotan.

La figura 4B es una vista posterior de la realización de la figura 4A a lo largo de la línea 360 a través del secundario del transformador rotativo en el núcleo magnético 330 y el primario del transformador rotativo en el núcleo magnético 340. Se ilustra el eje del rotor de campo enrollado 320 rodeado por el devanado del secundario del transformador rotativo 370 en el núcleo magnético 330 y por el primario 380 del transformador rotativo en el núcleo magnético 340. El devanado del secundario (370) y el devanado del primario (380) están separados por el espacio 390.

La figura 5A es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención conectados a un rotor de campo enrollado. Este diagrama es similar al de la figura 1 excepto que un rotor enrollado (154) reemplaza a la máquina síncrona de campo enrollado 150. El rotor de campo enrollado 154 está destinado a reemplazar el rotor en un motor o generador de imanes permanentes o de inductancia.

La figura 5B es un diagrama de bloques de un sistema de movimiento eléctrico universal conectado al dispositivo de la invención que se muestra en la figura 5A. La combinación (400) incluye energía de línea de CA que pasa a un puente rectificador (410). El puente rectificador 410 está conectado a un conmutador electrónico (420) que a su vez está conectado a un estator de motor síncrono de campo enrollado (430). El puente rectificador 410 también está conectado a un convertidor reductor (440) que está conectado al generador de onda cuadrada 110 del aparato 100 de la figura 5A.

La figura 6 es un diagrama de bloques de los elementos del dispositivo de la invención que pueden ser conectados a un rotor de campo enrollado. Este diagrama es similar al de la figura 1, excepto que no se muestra ninguna máquina síncrona de campo enrollado 150. Esta realización está destinada a acoplarse al rotor de campo enrollado existente de una máquina síncrona existente tal como, por ejemplo, un generador síncrono de campo enrollado.

Se describirá el mecanismo operativo de una realización del tercer aspecto de la invención. Como se describió anteriormente, los elementos específicos pueden intercambiarse con otros que realizan funciones similares. El excitador de campo resonante usa resonancia eléctrica para transferir energía desde el marco de referencia estacionario del estator del motor al marco de referencia rotativo del rotor para proporcionar una corriente de CC ajustable al devanado de campo. El microcontrolador (1) monitorea tanto la forma de onda de la corriente del primario del transformador rotativo a través de un sensor de corriente o transformador de corriente como la tensión al primario del transformador rotativo, y (2) ajusta la frecuencia de la onda cuadrada que acciona el primario del transformador rotativo para que esté en o apenas por debajo de la resonancia. Esto no solo reduce al mínimo las pérdidas de conmutación en el circuito de accionamiento del primario, sino que también da como resultado la transferencia de energía más eficiente al secundario del transformador rotativo. Los diodos rectificadores convierten la corriente CA resonante en el secundario en CC para alimentar el devanado de campo. En algunas realizaciones, el microcontrolador también controla la tensión de salida del generador de CA de onda cuadrada para mantener un nivel de corriente deseado en el campo del rotor. Otras realizaciones funcionan de manera similar.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (100), que comprende,

al menos un generador de tensión de CA de onda cuadrada (110) que tiene una tensión y una frecuencia de accionamiento;
al menos un excitador de campo resonante (120) en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada (110), el excitador de campo resonante (120) tiene un marco de referencia rotativo, un marco de referencia estático y un circuito resonante que comprende en serie un condensador resonante y un transformador rotativo con una inductancia de fuga variable que comprende un núcleo magnético con un devanado del primario montado en el marco de referencia estático del marco del motor separado por un espacio de un segundo núcleo magnético con un devanado del secundario, y el excitador de campo resonante está configurado para funcionar en un modo resonante a una frecuencia resonante de al menos 50 kHz;
un dispositivo controlador en comunicación con el generador de CA de onda cuadrada (110) y el excitador de campo resonante (120) y configurado para medir la tensión y la corriente en el excitador de campo resonante (120), rastrear la frecuencia de resonancia y ajustar la frecuencia de accionamiento para coincidir sustancialmente con la frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de corriente CA; y
un rectificador (130) en comunicación con el excitador de campo resonante (120) y configurado para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor de una máquina síncrona de campo enrollado (150).

2. El aparato (100) según la reivindicación 1, que comprende además un devanado de rotor para una máquina síncrona de campo enrollado (150), el rectificador (130) está en comunicación con el excitador de campo resonante (120) y el devanado de rotor para una máquina síncrona de campo enrollado (150) y configurada para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor.

3. El aparato (100) según la reivindicación 1, que comprende además una máquina síncrona de campo enrollado (150) que tiene un devanado de rotor y no tiene imanes de rotor para la producción de torque, el rectificador (130) está en comunicación con el excitador de campo resonante y la máquina síncrona de campo enrollado (150) y configurado para convertir la corriente CA en corriente CC antes de que entre en el devanado del rotor de la máquina síncrona de campo enrollado (150).

4. El aparato (100) según la reivindicación 3, en donde la máquina síncrona de campo enrollado pertenece a un grupo que consiste en un motor de CA, un generador de CA y un generador de CC.

5. El aparato (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde hay un generador de tensión de CA de onda cuadrada (110) y un excitador de campo resonante (120).

6. El aparato (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde

el transformador rotativo tiene un primario estacionario (122) y un secundario rotativo (124) configurados para formar un espacio (126) que produce la inductancia de fuga variable;
el condensador resonante (128) está en comunicación con el transformador rotativo y está configurado para resonar con la inductancia de fuga variable (127) a una frecuencia superior a 50 kHz; y
el dispositivo controlador está configurado además para generar una señal de tensión de CA de onda cuadrada de frecuencia variable para accionar el primario del transformador rotativo (122).

7. El aparato (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el circuito resonante está en el marco de referencia estático.

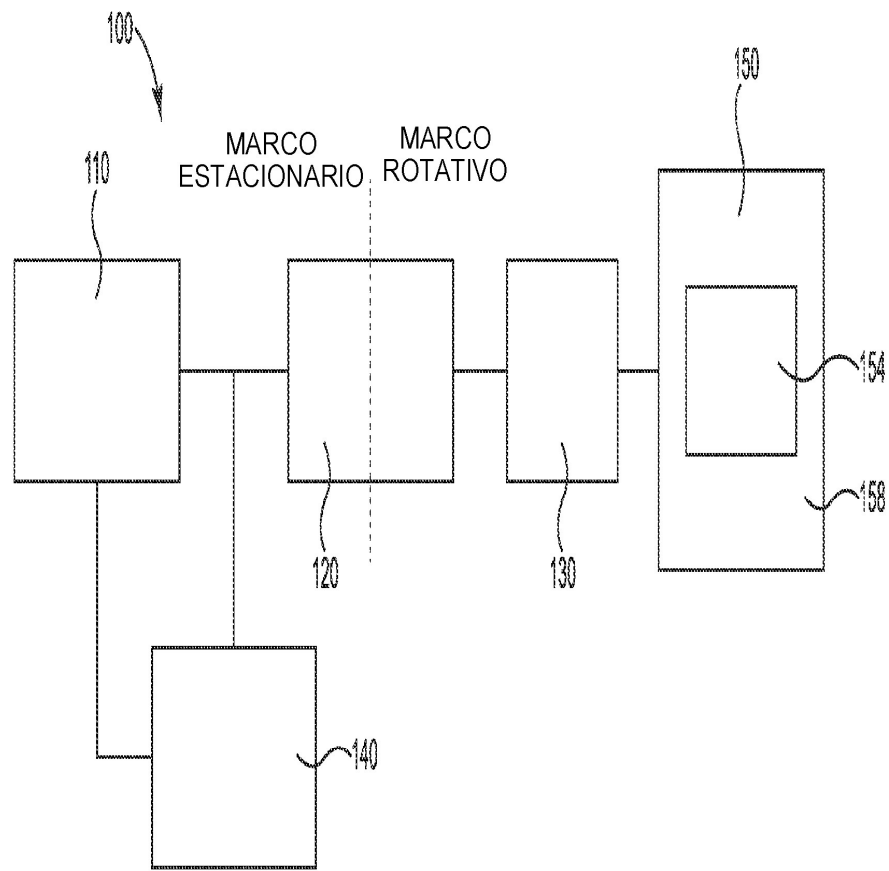


FIGURA 1

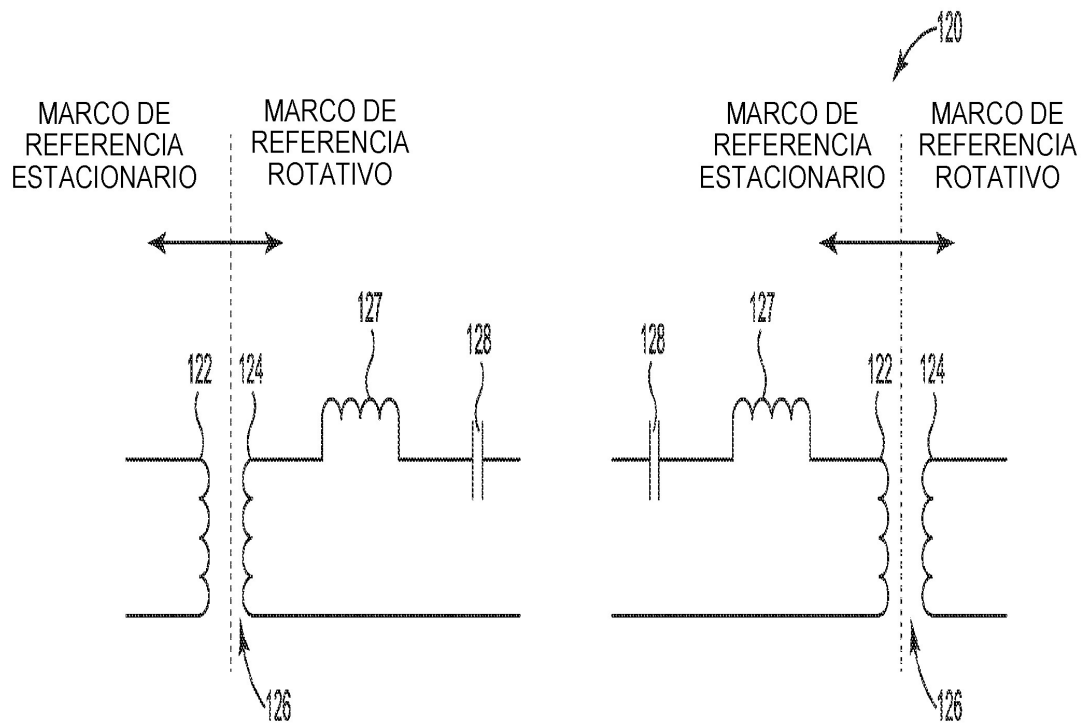


FIGURA 2A

FIGURA 2B

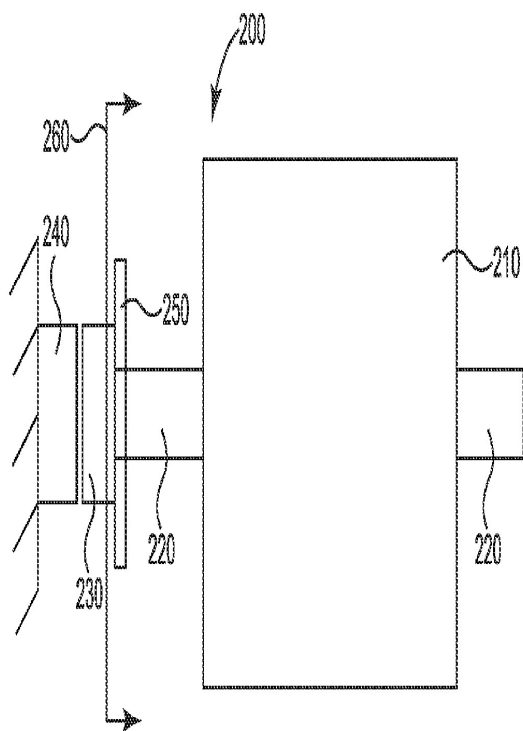


FIGURE 3A

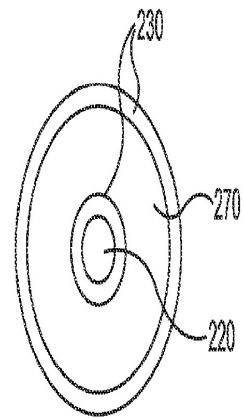


FIGURE 3B

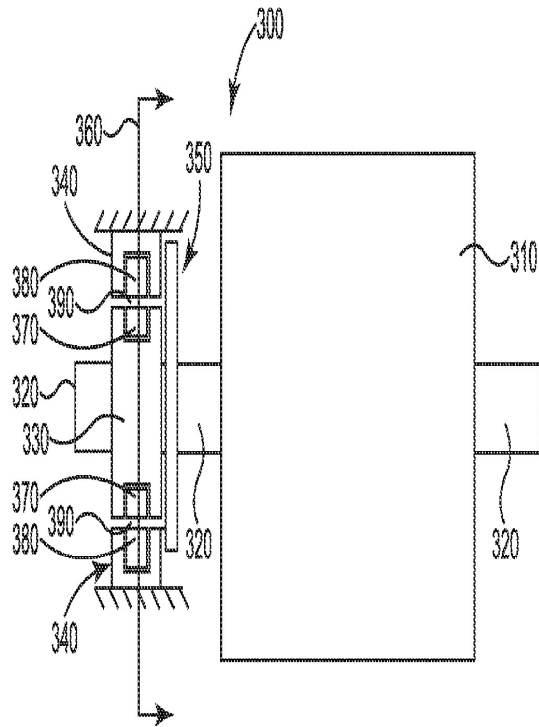


FIGURE 4A

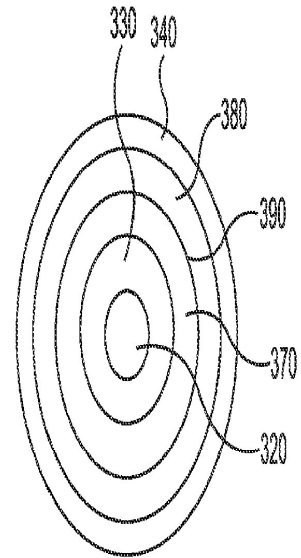


FIGURE 4B

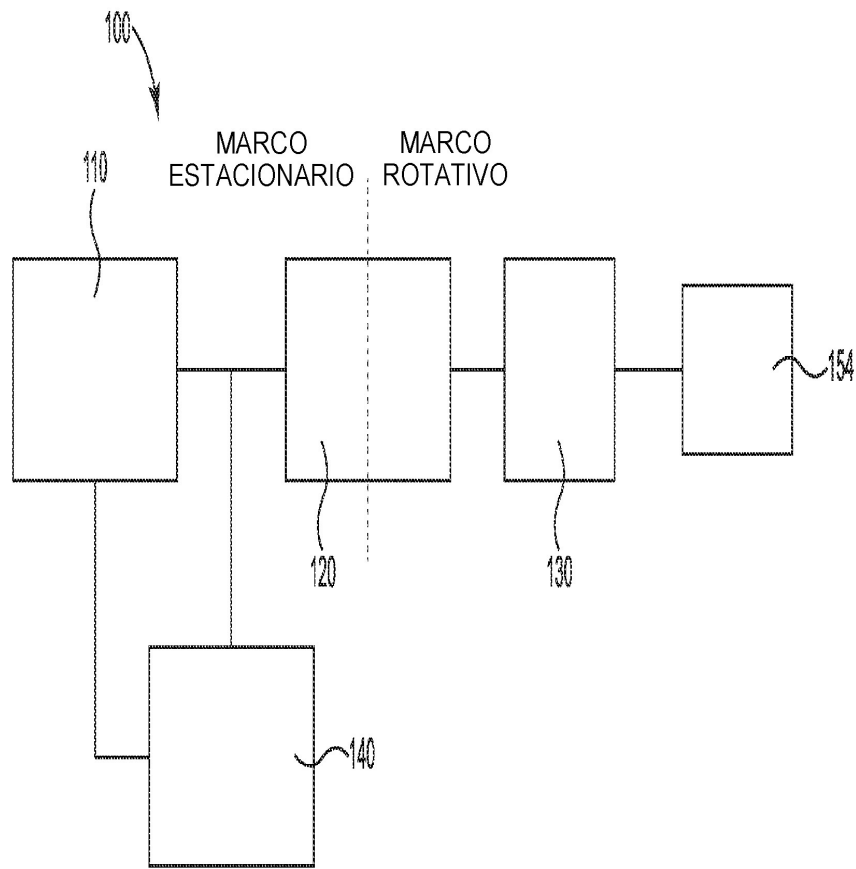


FIGURA 5A

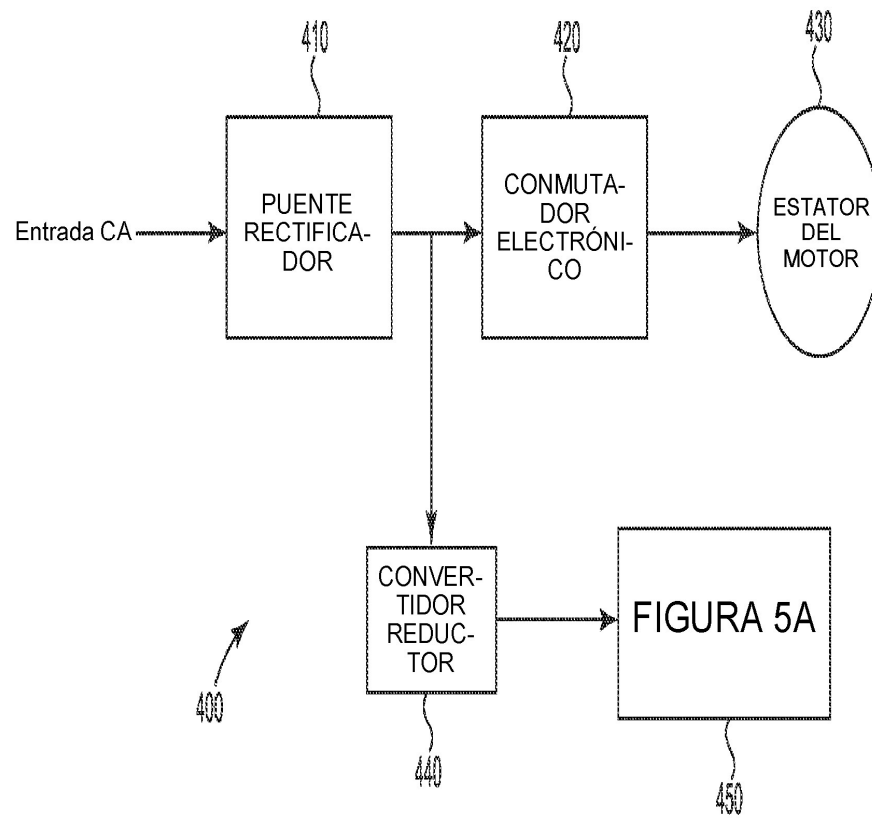


FIGURA 5B

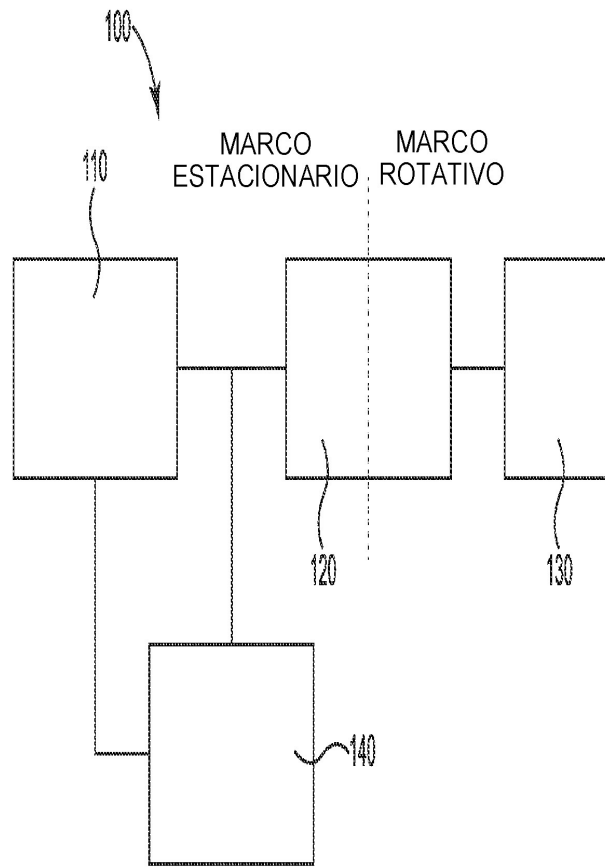


FIGURA 6